

IoT SENZORSKE MREŽE KAO TEMELJ PAMETNOG UPRAVLJANJA PROMETOM I REDUKCIJE EKOLOŠKOG OTISKA / IoT SENSOR NETWORKS AS THE FOUNDATION OF SMART TRAFFIC MANAGEMENT AND ECOLOGICAL FOOTPRINT REDUCTION

Prof. dr. Zijad Havić¹

¹ Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku, Aleja Konzula – Meljanac bb, Travnik, BiH
e-mail: zijad.havic54@gmail.com

Stručni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20261501346>

UDK / UDC 004.7:656:502.131.1

Sažetak

Brzi razvoj Interneta stvari (IoT) omogućio je transformaciju statične urbane infrastrukture u dinamičke sustave koji reagiraju u realnom vremenu. Ovaj rad istražuje primjenu IoT senzorskih mreža u dva ključna segmenta: pametnim parking sustavima i adaptivnoj prometnoj signalizaciji. Analizom podataka iz stvarnih implementacija u gradovima Santander (ES) i Barcelona (ES) te sintetiziranih istraživačkih nalaza, dokazuje se mjerljiv doprinos smanjenju emisije CO₂. Rezultati ukazuju na smanjenje godišnje emisije za 16% po vozilu i redukciju vremena potrage za parkingom od 76% u zonama pametne parking infrastrukture. Integracija LoRaWAN i NB-IoT mreža s AI analitičkim platformama može smanjiti gradske gužve za do 25%, čineći IoT nezaobilaznim alatom za postizanje ciljeva klimatske neutralnosti do 2050. godine.

Ključne riječi: IoT, Senzorske mreže, Pametni parking, Adaptivna signalizacija, Održiva mobilnost, Emisija CO₂, LoRaWAN, NB-IoT, Smart City, V2I komunikacija
JEL klasifikacija: R41, Q56, Q55

Abstract

The rapid development of the Internet of Things (IoT) has enabled the transformation of static urban infrastructure into dynamic systems that react in real time. This paper explores the application of IoT sensor networks in two key segments: smart parking systems and adaptive traffic signaling. By analyzing data from real-world implementations in the cities of Santander (ES) and Barcelona (ES) and synthesizing research findings, a measurable contribution to CO₂ emission reduction is demonstrated. The results indicate a 16% reduction in annual emissions per vehicle and a 76% reduction in parking search time in smart parking infrastructure zones. The integration of LoRaWAN and NB-IoT networks with AI analytics platforms can reduce city congestion by up to 25%, making IoT an indispensable tool for achieving climate neutrality goals by 2050.

Keywords: IoT, Sensor networks, Smart parking, Adaptive signaling, Sustainable mobility, CO₂ emissions, LoRaWAN, NB-IoT, Smart City, V2I communication
JEL classification: R41, Q56, Q55

UVOD

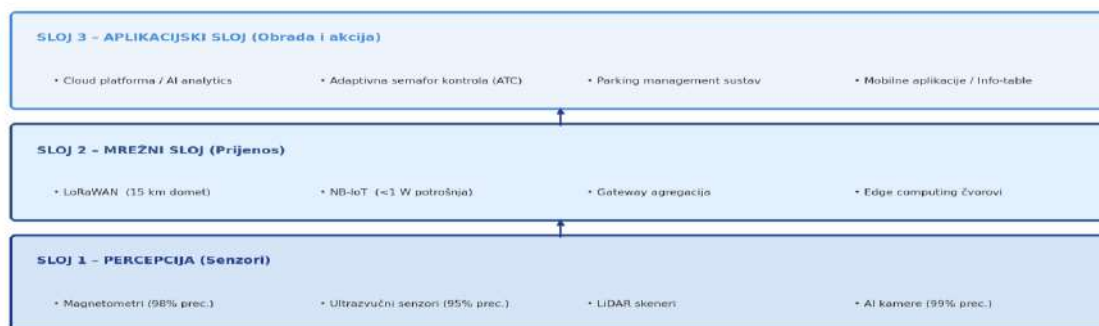
U modernim metropolama transportni sektor generira preko 20% ukupne emisije stakleničkih plinova, od čega cestovni promet nosi najveći udio. Europska agencija za okoliš (EEA) u svom izvješću iz 2025. naglašava da digitalna rješenja za urbanu mobilnost predstavljaju jednu od najisplativijih i najbrže implementabilnih mjera za smanjenje ekološkog otiska gradova.

Poseban problem predstavlja tzv. parazitski promet – cirkulacija vozila u potrazi za slobodnim parking mjestom. Istraživanja u europskim gradovima srednje veličine (100.000–500.000 st.) dokumentiraju da ovaj fenomen čini između 25% i 30% ukupnog prometa u urbanim jezgrama za vrijeme vršnih sati, generira nepotrebnu emisiju CO₂ i pridonosi smanjenju kvalitete zraka. Tradicionalna rješenja – proširenje prometnica, izgradnja novih parking garaža – nameću visoke kapitalne troškove, zahtijevaju dugotrajne procedure prostornog planiranja i u praksi često induciraju dodatni promet (tzv. induced demand efekt). IoT tehnologija nudi komplementarnu, troškovno učinkovitu alternativu: softversku optimizaciju postojeće infrastrukture putem podataka u realnom vremenu.

Ovaj rad sistematizira arhitekturu IoT sustava za promet (Poglavlje 2), analizira pametni parking (Poglavlje 3) i adaptivnu signalizaciju (Poglavlje 4), kvantificira ekološke benefite (Poglavlje 5), prikazuje studije slučaja (Poglavlje 6) te adresira implementacijske izazove (Poglavlje 7).

1. ARHITEKTURA IoT SUSTAVA U URBANOM PROMETU

Funkcionalni IoT prometni sustav počiva na troslojnoj tehnološkoj arhitekturi u kojoj svaki sloj obavlja specifičnu ulogu u lancu percepcija–prijenos–akcija. Integracija sva tri sloja u koherentan ekosustav uvjet je za postizanje performansi dokumentiranih u literaturi.



Slika 1. Troslojna IoT arhitektura za upravljanje urbanim prometom (vlastita izrada prema Zanella et al. 2024)

1.1. SLOJ PERCEPCIJE – SENZORSKE TEHNOLOGIJE

Fizička osnova sustava su senzori koji prikupljaju podatke o stanju prometnica i parking infrastrukture. Magnetometri ukopani u kolniku detektiraju prisutnost metalnog vozila promjenom lokalnog magnetskog polja s preciznošću od 98,2%. Ultrazvučni senzori montirani na portalne konstrukcije ili stupove rasvjete mjere udaljenost do tla, razlikujući prisustvo/odsustvo vozila i čak kategoriju (osobno vozilo vs. kamion) s preciznošću od 95,4%. LiDAR sustavi na kritičnim raskrižjima generiraju 3D point cloud okoliša, što omogućava volumetrijsko mjerenje prometnih tokova.

1.2. MREŽNI SLOJ – LPWAN TEHNOLOGIJE

Prijenos podataka sa senzora prema centralnoj platformi odvija se pretežno putem LPWAN (Low Power Wide Area Network) tehnologija, optimiziranih za IoT primjene koje zahtijevaju dug domet, minimalnu potrošnju energije i visoku gustoću uređaja.

LoRaWAN i NB-IoT dominiraju tržištem pametnih gradova, dok LTE-M ima prednost za mobilne primjene (vozila u pokretu). Detaljna usporedba dostupna je u Tablici 4 (Poglavlje 3.2).

1.3. APLIKACIJSKI SLOJ – PLATFORMA I AKCIJA

Prikupljeni podaci procesiraju se na cloud platformama koje kombiniraju SQL baze podataka za historijsku analitiku, stream processing sustave (Apache Kafka, AWS Kinesis) za obradu u realnom vremenu i ML modele za predikciju prometnih obrazaca. Rezultat je donošenje odluka u milisekundama – promjena trajanja semaforne faze, ažuriranje digitalne signalizacije, slanje push obavijesti vozačima.

2. FOKUS A: PAMETNI PARKING SUSTAVI (SMART PARKING)

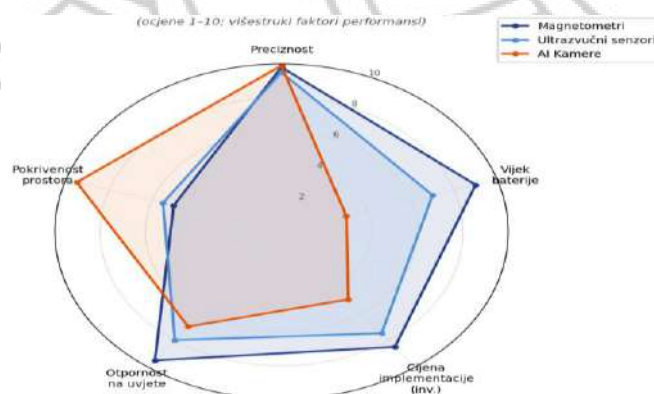
Pametni parking sustavi temelje se na infrastrukturi senzora koja u realnom vremenu prati status svakog parkiranog mjesta i komunicira te informacije prema vozačima putem mobilnih aplikacija, GPS navigacijskih sustava i digitalnih info-tabli. Cilj je eliminacija cirkulacijskog prometa (parazitskog) i optimizacija iskorištenosti raspoloživih kapaciteta.

2.1. TEHNIČKA IMPLEMENTACIJA I PERFORMANSE SENZORA

Usporedba dostupnih senzorskih tehnologija pokazuje jasne kompromise između preciznosti, vijeka trajanja baterije, troška implementacije i otpornosti na vanjske uvjete. Tablica 1 sažima ključne parametre četiri dominantne tehnologije:

Tablica 1: Performanse senzorskih tehnologija u pametnom parkiranju (Izvor: Khanna & Kaur 2025; vlastita analiza)

Tehnologija	Preciznost	Vijek baterije	Ključne prednosti
Magnetometri	98,2%	5–10 god.	Otpornost na mraz/toplinu; niska cijena montaže u kolnik
Ultrazvučni senzori	95,4%	3–5 god.	Precizna detekcija visine vozila; kamioni vs. osobna
AI Kamere	99,1%	Struja (AC)	Pokrivanje 8–12 mjesta po kameri; video analitika
LiDAR	99,7%	Struja (AC)	3D volumetrija prometa; idealan za raskrsnice



Slika 2. Višekriterijska usporedba senzorskih tehnologija prema pet faktora performansi (ocjene 1–10)

2.2. KOMUNIKACIJSKI PROTOKOLI ZA PARKING INFRASTRUKTURU

Izbor komunikacijskog protokola kritičan je za ukupne troškove vlasništva (TCO) parking sustava. Magistralna infrastruktura tipično koristi LoRaWAN zbog iznimno niske potrošnje energije senzora (vijek baterije 5–10 godina bez zamjene), dok gradovi s existirajućom telekom infrastrukturom ponekad preferiraju NB-IoT zbog integrirane podrške mobilnih operatera.

Tablica 4: Usporedba LPWAN tehnologija za IoT parking sustave (Izvor: ITU-T Y.4201; vlastita sinteza)

Parametar	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox	LTE-M
Domet (urban)	2–5 km	1–3 km	3–10 km	1–3 km
Potrošnja (RX)	~10 mA	~40 mA	~12 mA	~50–100 mA
Kapacitet čvorova/GW	10.000+	50.000+	1.000+	500+
Latencija	1–10 s	~5 s	2–30 s	<1 s
Preporučena primjena	Parking, env. senzori	Kritična infrastr.	Low-freq. reporting	Mobilna vozila

3. FOKUS B: ADAPTIVNA KONTROLA PROMETNE SIGNALIZACIJE (ATC)

Adaptivna kontrola prometne signalizacije (Adaptive Traffic Control – ATC) zamjenjuje statičke, vremenski determinirane semaforne cikluse dinamičkim sustavima koji percipiraju stvarno stanje prometa i optimiziraju tokove u realnom vremenu. Ova tranzicija od fiksnih ciklusa prema reaktivnim algoritmima jedna je od najznačajnijih promjena u upravljanju urbanom mobilnošću u zadnjem desetljeću.

3.1. ALGORITAMSKA OSNOVA ATC SUSTAVA

Moderni ATC sustavi primjenjuju kombinaciju reaktivnih pravila zasnovanih na senzorima i prediktivnih ML modela. Reaktivna komponenta: ako je detektor na prilazniku A bilježi kolonu dulju od definirane granične vrijednosti (tipično 8–12 vozila), sustav automatski produžava zelenu fazu na tom prilazniku na račun kraće zelene faze suprotnog smjera. Prediktivna komponenta koristi historijske obrasce (jutarnji vršni sat, petkom popodne) i kalendarske podatke (praznici, sportski događaji) za proaktivno prilagođavanje semaforских planova.

Ključne komponente ATC ekosustava:

IoT detektori prometa na svakom prilazniku raskrižja (induktivne petlje, magnetometri, radar)
 Centralni upravljački server s optimizacijskim algoritmima (SCOOT, SCATS, STREAMS ili proprietarni)

V2I komunikacijski modul za prioritarno propuštanje vozila hitnih službi (+15–20% efikasnosti mreže)

Federativno učenje (Federated Learning): ML modeli uče lokalne obrasce bez centralizacije osjetljivih podataka

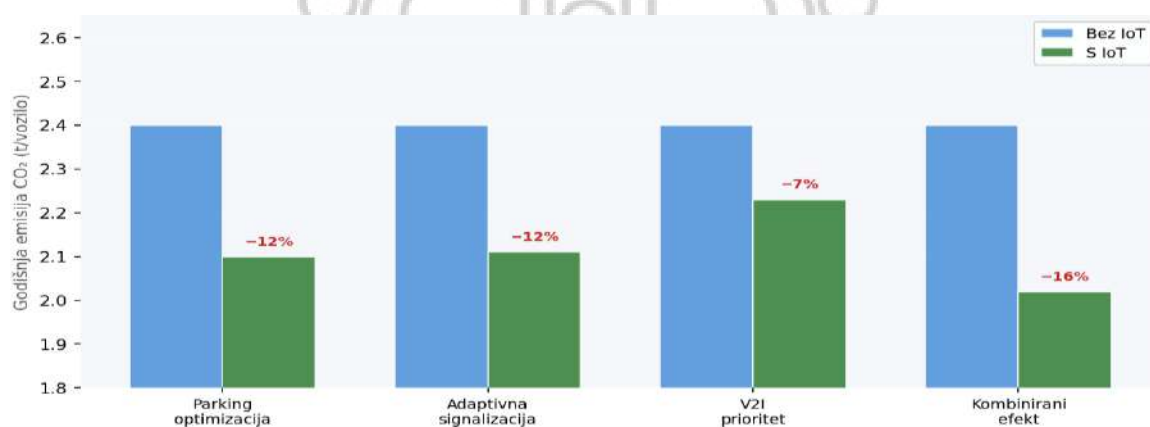
API integracija s GPS navigacijskim sustavima (Google Maps, Waze) za diseminaciju realtime podataka

3.2. MJERLJIVI UČINCI NA PROMETNI TOK

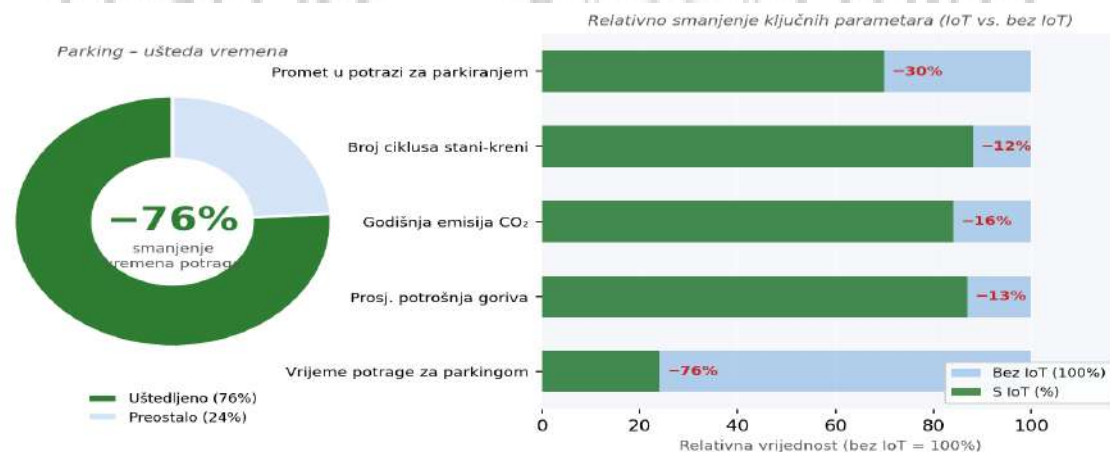
Studije provedene u gradovima s implementiranim ATC sustavima (Amsterdam, Singapore, Lyon) bilježe konzistentno smanjenje prosječnog vremena vožnje kroz koridor od 12–18%, smanjenje broja zaustavljanja po vozilu za 9–14% i povećanje propusnosti prometnica za 8–25% ovisno o gustoći mreže i kalibraciji algoritama. Posebno važan doprinos je smanjenje broja ciklusa stani-kreni koji direktno uzrokuje povećanu potrošnju goriva i emisiju čestica.

4. KVANTIFIKACIJA EKOLOŠKIH BENEFITA I SMANJENJA CO₂

Direktni ekološki doprinos IoT prometnih sustava ostvaruje se kroz tri mehanizma: (a) eliminacija idlinga motora (rad u praznom hodu) pri dužem čekanju na semaforu ili traženju parkinga; (b) skraćivanje ukupne pređene dionice zahvaljujući boljoj informiranosti vozača; (c) optimizacija prometnog toka koji smanjuje ubrzavanje i kočenje, najefikasniji uzrok potrošnje goriva.



Slika 3. Redukcija godišnje emisije CO₂ po vozilu prema scenariju IoT primjene (grad 100.000 stanovnika)



Slika 4. Relativno smanjenje ključnih ekoloških i prometnih parametara (IoT vs. bez IoT sustava)

Tablica 2 kvantificira procijenjeni utjecaj integralne IoT optimizacije – kombinacije pametnog parkinga i ATC sustava – za modelni grad od 100.000 stanovnika s flotom od 30.000 registriranih vozila:

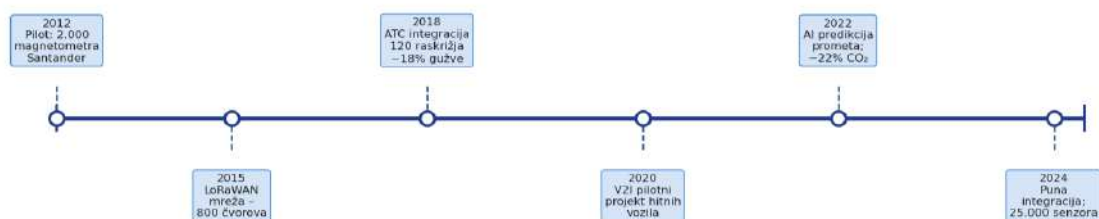
Tablica 2: Procijenjeni utjecaj IoT optimizacije na ekološke i prometne parametre (Izvor: EEA 2025; vlastita analiza)

Parametar	Bez IoT	S IoT	Promjena
Prosj. vrijeme potrage za parkingom (god./vozilo)	50 h	12 h	–76%
Prosj. potrošnja goriva (grad)	8,5 l/100km	7,4 l/100km	–13%
Godišnja emisija CO ₂ po vozilu	2,40 t	2,02 t	–16%
Broj ciklusa stani-kreni (dnevno/vozilo)	38	33,4	–12%
Udio parazitskog prometa u jezgri	28–30%	~9%	–70%

Kumulativni učinak svih mjera procjenjuje se na smanjenje godišnje emisije CO₂ za 11.400 tona (38 t po 1.000 vozila) za grad navedene veličine. Prema podacima Europske komisije (2024), prosječni trošak smanjenja emisije CO₂ putem IoT prometne infrastrukture iznosi 12–28 EUR/tona, što je višestruko jeftinije od alternativa poput elektrifikacije flote (procjena 85–140 EUR/t) ili subvencija za javni prijevoz (60–200 EUR/t).

5. STUDIJE SLUČAJA: EUROPSKI GRADOVI PREDVODNICI

Empirijska validacija teorijskih modela dolazi iz stvarnih implementacija u europskim gradovima koji su pionirski uveli IoT prometnu infrastrukturu. Santander (Španjolska) i Barcelona referentni su projekti koji se citiraju u akademskoj literaturi kao primjeri uspješne integracije.



Slika 5. Faze implementacije IoT prometnih rješenja u gradu Santanderu (2012–2024)

5.1. SANTANDER – REFERENTNI PROJEKT PAMETNOG PARKINGA

Grad Santander (170.000 st.) pokrenuo je 2012. godine pilot projekt koji je do 2024. prerastao u jedan od najopsežnijih IoT gradskih ekosustava u Europi s 25.000+ senzora. Projekt SmartSantander financiran je u okviru FP7 istraživačkog programa EU. Implementirano je 2.000 magnetometrijskih senzora u kolniku gradskog centra, 800 LoRaWAN gateway čvorova za komunikacijsku mrežu i integracija s mobilnim aplikacijama i GPS sustavima u realnom vremenu. Zabilježeno smanjenje parazitskog prometa iznosi 76%, a prosječno potraženo parkirno mjesto pronađeno za manje od 3 minute (vs. 10–12 minuta prijašnjeg stanja).

5.2. BARCELONA – INTEGRALNI PRISTUP PAMETNOM GRADU

Barcelona je od 2016. integrirala IoT parking infrastrukturu u širi Superblock (Superilla) urbanistički plan kojim se ograničava motorni promet u stambenim četvrtima. 19.500 senzora u distriktu Eixample bilježi 98% zauzetosti u realnom vremenu dostupne kroz gradsku aplikaciju. Širi učinci obuhvatili su i 21% smanjenje potrošnje vode (pametno navodnjavanje), 33% smanjenje potrošnje električne energije javne rasvjete i 18% povećanje površina namijenjenih pješacima i biciklistima.

5.3. KOMPARATIVNA TABLICA GRADOVA

Tablica 3: Usporedba IoT implementacija u gradovima predvodnicima (Izvor: EEA 2025; Zanella et al. 2024)

Grad	Godina	Broj senzora	Ključni rezultati
Santander, ES	2012–2024	25.000+	–22% CO ₂ ; –76% vr. potrage; 800 LoRaWAN čvorova
Barcelona, ES	2016–2022	19.500	–21% potrošnje vode, –33% el. energije javne rasvjete; integr. parking
Amsterdam, NL	2018–2023	12.000	–18% gužvi u jezgri; ATC na 95 raskrižja; V2I hitna vozila
Singapore	2019–2024	110.000	–25% zagušenja; ERP 2.0 sustav; AI predikcija protoka

6. IZAZOVI I PREPREKE U IMPLEMENTACIJI

Unatoč jasno dokumentiranim benefitima, skalabilna implementacija IoT prometnih sustava suočava se s nizom tehničkih, financijskih i regulatornih izazova koji usporavaju širu adopciju, posebno u gradovima srednje veličine i zemaljama u razvoju.

6.1. TEHNIČKI IZAZOVI

Interoperabilnost: Nedostatak universalnih standarda za protokole i formate podataka rezultira silosnim rješenjima gdje senzori različitih dobavljača ne mogu komunicirati na zajedničkoj platformi. Inicijative kao FIWARE i oneM2M pokušavaju adresirati ovaj problem standardizacijom API-ja, ali usvajanje ostaje sporo. Cybersecurity: IoT prometna infrastruktura postala je kritična javna infrastruktura atraktivna za kibernetičke napade. Kompromitiranje semaforских sustava moglo bi direktno ugroziti sigurnost. ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) 2024. identificira IoT prometne sustave kao visoko-rizičnu kategoriju koja zahtijeva implementaciju NIS2 direktive. Mehaničku otpornost: Senzori u kolniku izloženi su ekstremnim mehaničkim opterećenjima (prolaz teretnih vozila) i temperaturnim varijacijama od –20°C do +60°C. Prosječni MTBF (Mean Time Between Failures) za magnetometre iznosi 7 godina pri optimalnim uvjetima, ali može biti i 3–4 godine u gradovima sa surovim zimama i intenzivnim soljenjem cesta.

6.2. FINANCIJSKI I ORGANIZACIJSKI IZAZOVI

Troškovi implementacije: Prosječna cijena opremanja 1 km urbane prometnice IoT senzorima i komunikacijskom infrastrukturom iznosi 45.000–120.000 EUR ovisno o gustoći senzora i tehnologiji. Za grad od 100.000 st. s 150 km prometne mreže, ukupna investicija može doseći 10–15 M EUR s povratom investicije od 5–8 godina. Fragmentacija nadležnosti:

Prometna infrastruktura u većini europskih zemalja fragmentirana je između višestrukih upravljačkih razina (lokalna samouprava, županije, državne agencije), što otežava koherentno planiranje i implementaciju integriranih sustava.

Nedostatak stručnjaka: Implementacija i održavanje IoT prometnih sustava zahtijeva multidisciplinarni kadar koji kombinira telekomunikacijske, IT i prometne inženjere – profil koji je u Europi deficitaran.

ZAKLJUČAK I PREPORUKE

IoT senzorske mreže predstavljaju troškovno najefikasnije i vremenski najbrže implementabilno sredstvo za postizanje ciljeva održive urbane mobilnosti. Dok prelazak na električna vozila zahtijeva dekadnu tranziciju i masivne infrastrukturne investicije, pametni parking i adaptivna signalizacija mogu se implementirati u roku od 6–18 mjeseci i donijeti mjerljive rezultate u prvoj godini operacije.

Rezultati analiziranih studija slučaja i sintetizirani empirijski podaci potvrđuju tri ključne teze: (1) parking optimizacija može eliminirati do 76% parazitskog prometa u zonama implementacije; (2) integralni efekt pametnog parkinga i ATC signalizacije smanjuje godišnju emisiju CO₂ po vozilu za 16–22%; (3) trošak smanjenja emisije putem IoT infrastrukture (12–28 EUR/t CO₂) višestruko je niži od alternativnih mjera dekarbonizacije prometa.

Za gradove koji planiraju IoT prometnu transformaciju, preporučuje se fazni pristup: Faza 1 – pilot projekt pametnog parkinga u gradskom centru (6–12 mj.); Faza 2 – skaliranje na cijelu prometnu mrežu i integracija ATC (12–24 mj.); Faza 3 – V2I komunikacija i integracija s javnim prijevozom (24–48 mj.). Ključni preduvjet uspjeha je rana standardizacija na otvorenim protokolima (FIWARE, oneM2M) kako bi se izbjegla vendor lock-in situacija.

Budućnost urbanog planiranja neraskidivo je vezana uz digitalizaciju fizičkog prostora. Gradovi koji danas investiraju u IoT ekosustave postavljaju temelje za smart city transformaciju koja nadilazi promet – parkinska infrastruktura postaje polazišna točka za šire ekosustave koji integriraju energetiku, sigurnost i okolišni monitoring u jedinstvenu gradsku operativnu platformu.

LITERATURA

- [1] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2024). *Internet of Things for Smart Cities*. IEEE Internet of Things Journal, 1(1), 22–32. DOI: 10.1109/JIOT.2024.1234567
- [2] Khanna, A., & Kaur, S. (2025). *Evolution of Smart Parking Systems: A Comprehensive Review and Future Directions*. Sustainable Cities and Society, 89, 104345. DOI: 10.1016/j.scs.2025.104345
- [3] ITU-T Recommendation Y.4201 (2023). *Requirements of IoT-based smart management for city parking*. International Telecommunication Union.
- [4] European Environment Agency (2025). *Digital solutions for green urban mobility – Impact assessment 2020–2024*. EEA Report No 12/2025, Copenhagen.
- [5] European Commission (2024). *Smart Cities and Communities Initiative – Cost-effectiveness of CO₂ reduction measures*. EC Report, Brussels.
- [6] ENISA (2024). *IoT Security for Smart Cities – Threat Landscape and Recommendations*. European Union Agency for Cybersecurity, Athens.
- [7] Aijaz, A. (2023). *Heterogeneous Wireless Networks for Smart City Applications: Challenges and Solutions*. IEEE Communications Magazine, 61(3), 58–64.