

PRIMJENA UMJETNE INTELIGENCIJE U RAZVOJU ENERGETSKO- EFIKASNIH PAMETNIH RASKRSNICA I PAMETNIH GRADOVA ZASNOVANIH NA OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE / APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT SMART INTERSECTIONS AND SMART CITIES BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Doc. dr. Nehad Gaši¹, Kemal Spahić¹, MA; Bekir Fulan¹, MA

¹ Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku, Aleja Konzula – Meljanac bb, Travnik, BiH
e-mail: nehad.gasi@iu-travnik.com, kemalspahic@iu-travnik.com, bekir.fulan@iu-travnik.com

Stručni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20261501283>

UDK / UDC 004.89:[620.9:711.4

Sažetak

Razvoj pametnih gradova zasnovanih na principima održivosti podrazumijeva integraciju naprednih tehnologija koje povezuju energetske, saobraćajne i informacione sisteme. Ovaj rad analizira primjenu umjetne inteligencije (AI) u optimizaciji rada pametnih raskrsnica napajanih obnovljivim izvorima energije, poput solarnih i vjetro sistema, uz poseban fokus na unapređenje sigurnosti i efikasnosti saobraćaja. Istraživanje se zasniva na primjeni modela mašinskog učenja koji obrađuju podatke sa senzora o saobraćajnim tokovima, potrošnji energije i vremenskim uslovima. Na osnovu tih podataka omogućava se dinamičko upravljanje signalizacijom, smanjenje zagušenja u saobraćaju i bolja protočnost saobraćaja, čime se direktno utiče na povećanje sigurnosti učesnika i smanjenje emisija CO₂. Poseban značaj ima uloga AI u procesima dekarbonizacije kroz efikasnije upravljanje energijom i veću integraciju obnovljivih izvora. Primjena ovih rješenja omogućava prediktivno upravljanje energetskim resursima, smanjenje gubitaka i optimalnu distribuciju energije unutar urbanih mreža. Time se doprinosi razvoju zelenih i energetski efikasnih gradova, u kojima pametne raskrsnice predstavljaju ključne elemente savremene infrastrukture. Rezultati ukazuju na značajan potencijal integrisanog pristupa u unapređenju saobraćajnog sistema, sigurnosti i održivosti urbanih sredina.

Ključne riječi: umjetna inteligencija, pametne raskrsnice, pametni gradovi, obnovljivi izvori energije, energetska efikasnost

JEL Klasifikacija: O33, Q41, Q42, R41, R11

Abstract

The development of smart cities based on sustainability principles requires the integration of advanced technologies that connect energy, transportation, and information systems. This paper analyzes the application of artificial intelligence (AI) in optimizing the operation of smart intersections powered by renewable energy sources, such as solar and wind systems, with a particular focus on improving traffic safety and efficiency. The research is based on the use of machine learning models that process data collected from sensors on traffic flows, energy consumption, and weather conditions. Based on these data, dynamic traffic signal control is enabled, reducing traffic congestion and improving traffic flow, which directly contributes to increased road user safety and reduced CO₂ emissions. Special emphasis is placed on the role of AI in decarbonization processes through more efficient energy management and greater integration of renewable energy sources. The application of these solutions enables predictive management of energy resources, reduction of losses, and optimal distribution of energy within urban networks. This contributes to the development of green and energy-efficient cities, where smart intersections represent key elements of modern infrastructure. The results indicate significant potential of an integrated approach in improving the transportation system, safety, and overall sustainability of urban environments.

Keywords: artificial intelligence, smart intersections, smart cities, renewable energy sources, energy efficiency

JEL Classification: O33, Q41, Q42, R41, R11, Q55

UVOD

Razvoj savremenih urbanih sredina sve više je usmjeren ka konceptu pametnih gradova, u kojima se integracijom informacionih tehnologija, energetske mreže i saobraćajnih sistema nastoji postići veći nivo efikasnosti, održivosti i sigurnosti. U tom procesu poseban značaj imaju pametne raskrsnice kao ključni elementi urbane saobraćajne infrastrukture, čiji rad zahtijeva stabilno, pouzdano i energetski efikasno napajanje. Primjena obnovljivih izvora energije, poput solarne i vjetro energije, omogućava razvoj održivih i energetski nezavisnih sistema, uz smanjenje emisije štetnih gasova i manju zavisnost od konvencionalnih izvora energije. Integracijom ovih izvora u infrastrukturu pametnih raskrsnica doprinosi se povećanju energetske efikasnosti i pouzdanosti urbanih sistema kroz decentralizaciju proizvodnje energije. Istovremeno, razvoj pametnih gradova zasniva se na intenzivnoj primjeni umjetne inteligencije (AI), koja omogućava automatizaciju procesa, obradu podataka u realnom vremenu i optimizaciju upravljanja saobraćajem i energijom. Korištenjem senzora, kamera i sistema mašinskog učenja moguće je adaptivno upravljanje signalizacijom, smanjenje saobraćajnih zagušenja i unapređenje sigurnosti učesnika u saobraćaju. Međutim, digitalizacija urbanih sistema istovremeno povećava potrebu za implementacijom savremenih mehanizama cyber sigurnosti. Kontinuirana razmjena podataka između uređaja, infrastrukture i informacionih sistema povećava izloženost potencijalnim cyber prijetnjama, zbog čega zaštita podataka i sigurnost komunikacionih mreža predstavljaju važan segment razvoja inteligentnih transportnih sistema. U ovom radu poseban fokus stavljen je na primjenu umjetne inteligencije i obnovljivih izvora energije u razvoju energetski efikasnih pametnih raskrsnica, kao i na značaj implementacije savremenih sigurnosnih mehanizama u cilju zaštite kritične urbane infrastrukture i unapređenja održivosti pametnih gradova.

Poseban značaj u okviru razvoja pametnih gradova imaju saobraćajni aspekti pametnih raskrsnica, budući da raskrsnice predstavljaju kritične tačke urbane saobraćajne mreže na kojima se istovremeno ukrštaju zahtjevi za protočnošću, sigurnošću i energetske efikasnošću. Savremeni koncepti inteligentnih transportnih sistema omogućavaju prelazak sa konvencionalnog upravljanja signalizacijom na adaptivne i prediktivne modele zasnovane na umjetnoj inteligenciji i obradi podataka u realnom vremenu. Primjenom AI algoritama, IoT infrastrukture i V2I komunikacije moguće je dinamički prilagođavati signalne faze stvarnim uslovima u saobraćajnoj mreži, smanjiti zagušenja, vrijeme čekanja i emisije štetnih gasova, te unaprijediti sigurnost svih učesnika u saobraćaju. U tom kontekstu, pametne raskrsnice predstavljaju važnu poveznicu između održive urbane mobilnosti, energetske tranzicije i razvoja inteligentne infrastrukture zasnovane na obnovljivim izvorima energije.

2. IMPLEMENTACIJA UMJETNE INTELIGENCIJE I CYBER SIGURNOST U PAMETNIM RASKRSNICAMA

2.1. PRIMJENA UMJETNE INTELIGENCIJE U PAMETNIM GRADOVIMA

Umjetna inteligencija predstavlja jednu od ključnih tehnologija savremenih pametnih gradova, omogućavajući automatizaciju procesa i inteligentno upravljanje urbanim sistemima. Primjenom AI algoritama moguće je analizirati velike količine podataka prikupljenih putem senzora, kamera i IoT uređaja, te na osnovu njih optimizovati rad saobraćajne, energetske i komunikacione infrastrukture. Poseban značaj AI ima u sistemima upravljanja saobraćajem, gdje omogućava predikciju zagušenja, optimizaciju signalizacije i povećanje sigurnosti učesnika u saobraćaju. U pametnim raskrsnicama AI sistemi koriste metode mašinskog učenja i dubokog učenja za obradu podataka u realnom vremenu. Na osnovu analize gustine saobraćaja, brzine kretanja vozila i ponašanja učesnika u saobraćaju, sistemi mogu automatski prilagoditi trajanje signalnih faza i smanjiti vrijeme čekanja. Time se povećava protočnost saobraćaja, smanjuje potrošnja goriva i doprinosi smanjenju emisije štetnih gasova.

2.2. INTERNET STVARI (IOT) I AI INFRASTRUKTURA

Funkcionisanje pametnih raskrsnica zasniva se na integraciji IoT uređaja i AI sistema. Senzori, kamere, radari i komunikacioni uređaji kontinuirano prikupljaju podatke iz okruženja i šalju ih centralnim sistemima za obradu. Umjetna inteligencija zatim analizira te podatke i donosi odluke u realnom vremenu. IoT infrastruktura omogućava međusobnu komunikaciju između vozila, raskrsnica i kontrolnih centara putem V2I (Vehicle-to-Infrastructure) i V2V (Vehicle-to-Vehicle) komunikacije. Ovakav pristup omogućava razvoj inteligentnih transportnih sistema koji povećavaju sigurnost, efikasnost i održivost urbanog saobraćaja.

2.3. CYBER SIGURNOST PAMETNIH RASKRSNICA

Digitalizacija saobraćajne infrastrukture donosi brojne prednosti, ali istovremeno povećava rizik od cyber prijetnji. Pametne raskrsnice predstavljaju dio kritične infrastrukture, zbog čega mogu biti meta različitih oblika cyber napada, uključujući neovlašten pristup sistemima, manipulaciju signalizacijom, krađu podataka i prekid komunikacionih mreža. Napadi na inteligentne transportne sisteme mogu izazvati ozbiljne posljedice, kao što su saobraćajni zastoji, pogrešno upravljanje signalizacijom ili ugrožavanje sigurnosti građana. Poseban problem predstavlja činjenica da veliki broj IoT uređaja koristi bežičnu komunikaciju, što dodatno povećava mogućnost neovlaštenog pristupa sistemu.

2.4. AI SISTEMI ZA DETEKCIJU CYBER PRIJETNJI

Umjetna inteligencija ima značajnu ulogu i u oblasti cyber sigurnosti. Savremeni AI sistemi mogu analizirati mrežni saobraćaj, prepoznavati anomalije i automatski detektovati potencijalne prijetnje prije nego što izazovu ozbiljne posljedice. Primjenom mašinskog učenja moguće je identifikovati sumnjive aktivnosti, pokušaje neovlaštenog pristupa i abnormalna ponašanja uređaja unutar mreže.

AI sistemi za cyber sigurnost koriste algoritme za:

- detekciju mrežnih anomalija,
- prepoznavanje malware napada,
- analizu sigurnosnih logova,
- automatsko reagovanje na sigurnosne incidente,
- predikciju potencijalnih prijetnji.

Na taj način se povećava otpornost pametnih raskrsnica i inteligentnih transportnih sistema na cyber napade.

2.5. ZAŠTITA PODATAKA I SIGURNOSNI MEHANIZMI

Efikasna zaštita pametnih raskrsnica zahtijeva implementaciju savremenih sigurnosnih mehanizama. Najvažnije mjere zaštite uključuju:

- enkripciju podataka,
- autentifikaciju korisnika i uređaja,
- sigurnosne firewall sisteme,
- segmentaciju mreže,
- redovno ažuriranje softvera,
- backup i monitoring sistema.

Pored tehničkih mjera, značajnu ulogu imaju i međunarodni standardi cyber sigurnosti, poput ISO/IEC 27001 standarda i evropske NIS2 direktive, koji definišu procedure zaštite kritične infrastrukture i informacionih sistema.

2.6. BUDUĆI RAZVOJ AI I CYBER SIGURNOSTI U PAMETNIM GRADOVIMA

Dalji razvoj pametnih gradova biće usko povezan sa razvojem umjetne inteligencije, 5G mreža i naprednih sigurnosnih tehnologija. Očekuje se povećanje primjene autonomnih sistema upravljanja saobraćajem, digitalnih blizanaca (Digital Twin) i prediktivnih AI modela koji će omogućiti još efikasnije upravljanje urbanom infrastrukturom. Istovremeno, rast digitalizacije zahtijeva kontinuirano unapređenje cyber sigurnosti kako bi se zaštitili podaci građana i osigurala stabilnost kritične infrastrukture. Kombinacija AI tehnologija i naprednih sigurnosnih sistema predstavlja osnovu razvoja sigurnih, održivih i inteligentnih gradova budućnosti.

3. PAMETNE RASKRSNICE U FUNKCIJI EFIKASNOG I SIGURNOG URBANOG SAOBRAĆAJA

3.1. SAVREMENI PROBLEMI URBANOG SAOBRAĆAJA

Ubrzana urbanizacija evropskih gradova tokom posljednjih decenija dovela je do izražene neravnoteže između rasta saobraćajne potražnje i ograničenih kapaciteta postojeće mrežne infrastrukture. Veliki broj evropskih metropola svakodnevno se suočava sa zagušenjima u vršnim periodima, povećanim brojem konflikata na raskrsnicama, kao i sa rastućim pritiskom na kvalitet vazduha. Prema podacima Evropske komisije, urbani saobraćaj učestvuje sa približno 23% u ukupnim emisijama CO₂ koje potiču od transporta, pri čemu se značajan dio gubitaka vremena i goriva odnosi upravo na zaustavljanja i čekanja na semaforisanim raskrsnicama.

Klasične raskrsnice sa fiksnim ciklusima signalizacije pokazale su se nedovoljno fleksibilnim u uslovima dinamičkih promjena saobraćajnih tokova. Takvi sistemi ne uvažavaju trenutni intenzitet dolaska vozila, prisustvo pješaka i biciklista, niti potrebe vozila javnog prevoza i interventnih službi. Posljedice su produžena vremena čekanja, učestala zaustavljanja, povećana potrošnja goriva i veća izloženost rizicima nastanka saobraćajnih nezgoda. U urbanim sredinama u kojima je gustina raskrsnica izrazito visoka, ovakva neefikasnost se kumulativno prenosi na čitavu mrežu i otežava ostvarenje ciljeva održive mobilnosti definisanih dokumentom Sustainable and Smart Mobility Strategy Evropske unije.

3.2. PAMETNE RASKRSNICE U OKVIRU INTELIGENTNIH TRANSPORTNIH SISTEMA (ITS)

Pametna raskrsnica predstavlja jedan od ključnih elemenata inteligentnih transportnih sistema, čija je svrha integracija saobraćajne infrastrukture, vozila i korisnika u jedinstvenu informacionu cjelinu. U evropskom kontekstu, razvoj ovakvih sistema podržan je inicijativama poput C-ITS platforme (Cooperative Intelligent Transport Systems) i programa Connecting Europe Facility, koji finansira uvođenje kooperativnih i automatizovanih rješenja u saobraćajnu mrežu država članica.

Za razliku od konvencionalnih semaforskih kontrolera, pametna raskrsnica koristi kombinaciju senzora, kamera, radarskih i lidarskih uređaja, kao i V2I komunikaciju (vozilo–infrastruktura), kako bi u realnom vremenu prikupljala podatke o saobraćajnom okruženju. Algoritmi vještačke inteligencije te podatke obrađuju i, na osnovu naučenih obrazaca, donose odluke o trajanju i redoslijedu signalnih faza. Time se ostvaruje prelazak sa unaprijed definisanih programa rada na adaptivno i prediktivno upravljanje, koje uvažava stvarno stanje u mreži. Projekat CONDUCTOR, finansiran kroz program Horizon Europe, jedan je od primjera ovakvog pristupa, jer razvija napredne sisteme upravljanja saobraćajem zasnovane na adaptivnoj signalizaciji i koordinisanom upravljanju voznim parkovima.

3.3. DINAMIČKO UPRAVLJANJE SIGNALIZACIJOM UZ PRIMJENU VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Dinamičko upravljanje signalizacijom oslanja se na sposobnost AI modela da iz velikih skupova podataka izvuče pravilnosti u kretanju vozila i pješaka, te da na osnovu njih predvidi buduće stanje saobraćajnog toka. Najčešće primjenjivani pristupi obuhvataju modele zasnovane na nadgledanom učenju, vještačkim neuronskim mrežama i, u novije vrijeme, učenju potkrepljivanjem (engl. reinforcement learning). Učenje potkrepljivanjem posebno je značajno jer omogućava da algoritam, kroz kontinuirano interagovanje sa okruženjem, samostalno usavršava strategiju upravljanja signalnim grupama radi minimizacije vremena čekanja i broja zaustavljanja.

Praktična primjena ovakvih sistema prikazana je u nedavnim istraživanjima koja analiziraju efekte adaptivnog upravljanja u realnim uslovima. Studija sprovedena u saradnji sa univerzitetom Chalmers u Švedskoj pokazala je da uvođenje adaptivne signalizacije može dovesti do prosječnog smanjenja kašnjenja vozila na nivou mreže za oko 27%, dok se na pojedinačnim raskrsnicama bilježi smanjenje i do 38%. Slična istraživanja u oblasti dubokog učenja potkrepljivanjem ukazuju na to da napredni AI kontroleri mogu istovremeno smanjiti zagušenje i emisije ugljen-dioksida za značajan procenat u odnosu na klasične Websterove fiksne planove.

U evropskoj praksi, sistemi poput Yutrafic FUSION-a, koji se primjenjuju u Pragu i njemačkoj pokrajini Baden-Württemberg, koriste vještačku inteligenciju radi optimizacije rada signalizacije u realnom vremenu. Prema dostupnim izvještajima, uvođenje sličnog rješenja u Londonu rezultiralo je smanjenjem prosječnog vremena putovanja za do 20%, uz smanjenje broja zaustavljanja od oko 15%, što potvrđuje potencijal AI tehnologija u urbanim mrežama visoke gustine.

3.4. UTICAJ AI NA PROTOČNOST SAOBRAĆAJA I PRIORITETNI REŽIMI RADA

Pored opšteg poboljšanja protočnosti, pametne raskrsnice omogućavaju i uvođenje selektivnih prioriteta za pojedine kategorije korisnika. Vozilima javnog gradskog prevoza i interventnim službama mogu se dodijeliti zelene faze prilagođene njihovom trenutnom položaju, čime se skraćuje vrijeme putovanja i povećava pouzdanost reda vožnje. Takav pristup primijenjen je u Kopenhagenu, gdje je grad ugradio nove, inteligentne kontrolere u oko 380 raskrsnica. Procjene gradske uprave ukazuju na smanjenje vremena putovanja autobusa za 5 do 20%, dok se vrijeme putovanja biciklista skraćuje za približno 10%.

Slična logika primijenjena je i u Hamburgu, gdje je u okviru projekta modernizacije urbanog saobraćaja predviđena zamjena upravljačke platforme za do 2.000 semaforskih uređaja. Kombinacija radarskih senzora visoke rezolucije i AI analitike, testirana u okrugu Wandsbek i u području luke Hamburg, omogućava preciznu detekciju vozila i ranjivih učesnika u saobraćaju, kao i koordinisano upravljanje grupama raskrsnica. Pilot-projekat Green4Transport, takođe lokalizovan u Hamburgu, ispituje mogućnost potpuno autonomnog AI upravljanja signalizacijom, sa ciljem skaliranja rješenja na nivou cijelog gradskog jezgra. Inicijativa EIT Urban Mobility, kao zajednica znanja i inovacija Evropskog instituta za inovacije i tehnologiju, podržala je razvoj rješenja WISP, koje optimizuje rad postojećih semafora bez potrebe za dodatnom hardverskom infrastrukturom. Pilot implementacije u Helsinkiju i Istanbulu, u kojima je integrisano više od 1.000 različitih izvora podataka (kamere, senzori, mobilni podaci), pokazale su da je moguće značajno smanjiti zagušenja na ključnim raskrsnicama, uz istovremeno smanjenje emisija i broja konflikata između učesnika u saobraćaju.

3.5. SIGURNOST UČESNIKA U SAOBRAĆAJU

Unapređenje saobraćajne sigurnosti predstavlja jedan od osnovnih ciljeva uvođenja pametnih raskrsnica, posebno u okviru evropske strategije Vision Zero, koja teži potpunom uklanjanju smrtnih ishoda u saobraćaju. AI sistemi, oslanjajući se na video-analitiku i senzorska mjerenja, mogu prepoznati situacije visokog rizika prije nego što dođe do incidenta. Primjeri uključuju detekciju pješaka koji prelaze ulicu izvan obilježenih površina, biciklista u zoni mrtvog ugla teretnih vozila, kao i ponašanja vozača koja ukazuju na agresivnu vožnju ili rastrojenost.

Kooperativni inteligentni transportni sistemi (C-ITS), čiji se razvoj odvija pod okriljem Evropske komisije i konzorcijuma CAR 2 CAR Communication, omogućavaju razmjenu poruka između vozila i raskrsnice u realnom vremenu. Vozač, odnosno automatizovani sistem u vozilu, na taj način dobija pravovremeno upozorenje o potencijalnoj koliziji, signalnoj fazi ili prisustvu ranjivih učesnika. Procjene Evropskog savjeta za saobraćajnu sigurnost (ETSC) ukazuju na to da širi prelazak na C-ITS rješenja može doprinijeti značajnom smanjenju broja teških saobraćajnih nezgoda u urbanim sredinama, naročito u zonama složenih raskrsnica i prelaza.

3.6. EKOLOŠKI EFEKTI OPTIMIZACIJE SAOBRAĆAJA

Smanjenje vremena čekanja i broja zaustavljanja na raskrsnicama direktno utiče na smanjenje potrošnje goriva i emisija izduvnih gasova. Naučne studije zasnovane na mikroskopskim simulacionim modelima pokazuju da algoritmi adaptivnog upravljanja mogu smanjiti emisije CO i CO₂ u prosjeku za 7 do 15%, u zavisnosti od geometrije raskrsnice, strukture saobraćajnog toka i parametara samog algoritma. U gradovima sa izrazito gustim saobraćajem, primjena AI rješenja zasnovanih na podacima u realnom vremenu pokazala je smanjenje vremena putovanja u vršnim periodima za oko 11%, što se prema procjenama prevodi u značajno smanjenje godišnjih emisija.

U kontekstu rada koji povezuje pametne raskrsnice sa obnovljivim izvorima energije, ekološki efekat se dodatno pojačava. Smanjena potrošnja električne energije za potrebe signalizacije, u kombinaciji sa proizvodnjom energije iz solarnih i vjetro sistema, omogućava približavanje konceptu energetski neutralne raskrsnice. Time se saobraćajna optimizacija direktno povezuje sa procesima dekarbonizacije i sa ciljevima Evropskog zelenog plana.

3.7. INDIKATORI USPJEŠNOSTI I PRIMJER DOBRE PRAKSE U EVROPSKIM GRADOVIMA

Vrednovanje efikasnosti pametnih raskrsnica zahtijeva primjenu jasno definisanih indikatora uspješnosti. U literaturi i praksi najčešće se koriste prosječno vrijeme čekanja po vozilu, prosječna dužina kolone, broj zaustavljanja, prosječna brzina kretanja, nivo usluge raskrsnice (LOS), kao i pokazatelji bezbjednosti poput broja konflikata po jedinici vremena i broja registrovanih nezgoda. U novije vrijeme dodaju se i ekološki indikatori, prije svega procijenjene emisije CO₂, NO_x i PM čestica, kao i potrošnja energije same infrastrukture.

Kao reprezentativan primjer dobre evropske prakse može se izdvojiti grad Kopenhagen, koji je u okviru svoje strategije održive mobilnosti integrisao oko 380 inteligentnih raskrsnica u jedinstven sistem upravljanja. Sistem omogućava prioritet biciklistima i vozilima javnog prevoza, kontinuirano prilagođavanje signalnih planova i centralizovano praćenje stanja u mreži. Rezultati uključuju skraćanje vremena putovanja autobusa do 20%, povećanje udjela biciklističkog saobraćaja, kao i smanjenje broja konflikata u kritičnim zonama. Pored Kopenhagena, vrijedna pažnje su i iskustva Barcelone, koja razvija mrežu AI-vođenih semafora sa ciljem smanjenja zagušenja za 20%, kao i iskustva Praga i Hamburga, gdje je akcenat stavljen na koordinisano upravljanje većim brojem raskrsnica i integraciju sa sistemima javnog prevoza i lukom kao centrom intenzivnog teretnog saobraćaja.

Iskustva navedenih gradova jasno pokazuju da je za uspješnu implementaciju pametnih raskrsnica neophodan multidisciplinarni pristup, u kojem se saobraćajno-tehnička rješenja kombinuju sa naprednom informacionom infrastrukturom i obnovljivim energetske sistemima. Time se dobija osnova za razvoj saobraćajne mreže koja je istovremeno efikasnija, sigurnija i ekološki održivija, što predstavlja okosnicu savremenog koncepta pametnog grada.

4. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE I ENERGETSKA EFIKASNOST U PAMETNIM GRADOVIMA

4.1. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE U PAMETNIM GRADOVIMA

Koncept pametnih gradova podrazumijeva primjenu održivih energetske rješenja koja omogućavaju efikasno upravljanje resursima. U tom kontekstu, obnovljivi izvori energije imaju ključnu ulogu u transformaciji urbanih energetske sistema iz centralizovanih u decentralizovane i fleksibilne mreže. Najznačajniji izvori koji se koriste u urbanim sredinama su: solarna energija putem fotonaponskih (PV) sistema, energija vjetra putem malih urbanih vjetroturbina i hibridni sistemi koji kombinuju više izvora.

Fotonaponski sistemi predstavljaju najpogodnije rješenje za implementaciju na pametnim raskrsnicama zbog svoje modularnosti, jednostavne instalacije i mogućnosti integracije sa postojećom infrastrukturom (npr. stubovi rasvjete, semafori, nadstrešnice). Primjena ovih sistema omogućava: lokalnu proizvodnju električne energije, smanjenje gubitaka u prenosu, povećanje energetske efikasnosti i razvoj mikroenergetskih mreža (microgrid).

4.2. ENERGETSKA INFRASTRUKTURA PAMETNIH RASKRSNICA

Pametne raskrsnice predstavljaju složene sisteme koji zahtijevaju pouzdano i kontinuirano napajanje različitih komponenti: semaforske signalizacije, senzorskih sistema, komunikacionih uređaja i sistema za obradu podataka. Integracija obnovljivih izvora energije u ove sisteme realizuje se putem decentralizovanih energetske jedinica koje uključuju: fotonaponske panele, baterijske sisteme za skladištenje energije, upravljačke pretvarače (invertere) i sisteme za nadzor i upravljanje energijom. Ključni izazov predstavlja varijabilnost proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, koja zavisi od vremenskih uslova. Zbog toga se primjenjuju sistemi skladištenja energije koji omogućavaju balansiranje između proizvodnje i potrošnje. U tom kontekstu, pametne raskrsnice se mogu posmatrati kao dio šireg koncepta mikroenergetskih mreža koje funkcionišu autonomno ili u interakciji sa distributivnom mrežom.

Energetski sistem pametnih raskrsnica predstavlja ključnu komponentu savremenih urbanih infrastruktura, omogućavajući integraciju naprednih algoritama umjetne inteligencije u upravljanje saobraćajem i energijom. U uslovima rastuće urbanizacije i povećanih zahtjeva za održivošću, ovakvi sistemi doprinose efikasnijem korištenju resursa i unapređenju mobilnosti. Osnovu njihovog funkcionisanja čini kontinuirano prikupljanje podataka iz različitih izvora. Senzori saobraćaja omogućavaju praćenje gustine i dinamike kretanja vozila u realnom vremenu, dok meteorološke stanice pružaju informacije o vremenskim uslovima koji utiču na tokove saobraćaja. Istovremeno, energetske sistemi obezbjeđuju podatke o potrošnji i raspodjeli energije unutar same raskrsnice. Integracijom ovih podataka formira se sveobuhvatna informacijska osnova za donošenje odluka. Na temelju prikupljenih podataka razvijaju se modeli mašinskog učenja koji omogućavaju preciznu analizu i optimizaciju sistema. Jedna od njihovih ključnih funkcija jeste predikcija potrošnje energije, čime se omogućava efikasnije planiranje i smanjenje energetske gubitaka. Pored toga, optimizacija raspodjele energije doprinosi racionalnijem korištenju dostupnih resursa, posebno u sistemima koji uključuju obnovljive izvore energije. Značajnu ulogu ima i dinamičko upravljanje semaforom signalizacijom. Za razliku od tradicionalnih sistema sa fiksnim intervalima, inteligentni sistemi prilagođavaju signalne faze u skladu sa trenutnim uslovima na raskrsnici.

Time se smanjuje vrijeme čekanja, povećava protočnost i unapređuje sigurnost svih učesnika u saobraćaju. Suština pametnih raskrsnica ogleda se u sinergiji tri ključne oblasti: energetike, umjetne inteligencije i saobraćaja. Energetski sistemi obezbjeđuju stabilno i održivo napajanje, umjetna inteligencija omogućava analizu podataka i optimizaciju, dok saobraćajni sistemi koriste te rezultate za efikasnije upravljanje tokovima. Rezultati ovakvog pristupa su višestruki. Smanjuju se saobraćajni zastoji i vrijeme putovanja, što direktno utiče na povećanje efikasnosti transportnog sistema. Istovremeno, dolazi do smanjenja emisije CO₂ zbog manjeg zadržavanja vozila, čime se doprinosi zaštiti životne sredine. Takođe, optimizacija energetskih tokova povećava ukupnu energetsku efikasnost i smanjuje operativne troškove. U konačnici, pametne raskrsnice predstavljaju važan element razvoja održivih i inteligentnih gradova, gdje se kroz integraciju tehnologije postiže viši nivo efikasnosti, sigurnosti i kvaliteta života.

4.3. ENERGETSKA EFIKASNOST I ODRŽIVOST

Primjena obnovljivih izvora energije u pametnim raskrsnicama direktno utiče na povećanje energetske efikasnosti urbanih sistema. Kombinacijom lokalne proizvodnje energije i inteligentnog upravljanja potrošnjom postiže se optimalno korištenje dostupnih resursa. Poseban značaj ima implementacija: pametnih mreža (Smart Grid), sistema upravljanja energijom (EMS) i skladištenja energije (battery storage systems). Ovi sistemi omogućavaju: balansiranje opterećenja, smanjenje vršnih opterećenja, povećanje stabilnosti mreže, integraciju većeg udjela obnovljivih izvora energije. U konačnici, ovakav pristup vodi ka razvoju energetski samoodrživih urbanih sistema.

ZAKLJUČAK

Saobraćajni aspekt pametnih raskrsnica pokazuje da primjena umjetne inteligencije i adaptivnog upravljanja signalizacijom može značajno unaprijediti funkcionisanje urbanih saobraćajnih mreža. Analizirani primjeri evropskih gradova potvrđuju da inteligentni sistemi upravljanja omogućavaju smanjenje vremena čekanja, povećanje protočnosti saobraćaja, efikasnije funkcionisanje javnog prevoza i smanjenje emisije štetnih gasova. Posebno je značajna mogućnost uvođenja prioritarnih režima rada za vozila javnog prevoza, interventne službe i ranjive učesnike u saobraćaju, čime se dodatno povećava nivo sigurnosti i kvalitet urbane mobilnosti. Integracija AI sistema, obnovljivih izvora energije i inteligentnih transportnih tehnologija predstavlja osnovu razvoja održivih i energetski efikasnih raskrsnica koje mogu odgovoriti na izazove savremenih urbanih sredina i doprinijeti ostvarivanju ciljeva održive mobilnosti i dekarbonizacije gradova.

Implementacija umjetne inteligencije, cyber sigurnosti i obnovljivih izvora energije u pametnim raskrsnicama predstavlja značajan korak u razvoju savremenih pametnih gradova. Integracijom AI tehnologija, IoT infrastrukture i inteligentnih transportnih sistema omogućava se efikasnije upravljanje saobraćajem, optimizacija signalizacije, smanjenje saobraćajnih gužvi i povećanje sigurnosti svih učesnika u saobraćaju. Analiza podataka u realnom vremenu omogućava brzo donošenje odluka i prilagođavanje rada sistema stvarnim uslovima u urbanom okruženju. Poseban značaj ima integracija obnovljivih izvora energije u infrastrukturu pametnih raskrsnica. Korištenjem solarne energije i drugih obnovljivih izvora omogućava se decentralizovana proizvodnja energije, smanjenje potrošnje konvencionalnih energenata i smanjenje emisije štetnih gasova. Na taj način pametne raskrsnice doprinose energetskoj efikasnosti i održivom razvoju urbanih sredina. Povezivanje energetskih sistema sa umjetnom inteligencijom dodatno unapređuje optimizaciju rada infrastrukture i omogućava adaptivno upravljanje resursima u skladu sa trenutnim potrebama grada. Istovremeno, razvoj digitalizovane saobraćajne infrastrukture povećava izloženost cyber prijetnjama, zbog čega cyber sigurnost postaje jedan od ključnih elemenata stabilnog funkcionisanja inteligentnih transportnih sistema.

Primjena AI sistema za detekciju prijetnji, analiza mrežnog saobraćaja i automatsko reagovanje na sigurnosne incidente značajno povećavaju otpornost sistema na različite oblike cyber napada. Dodatnu zaštitu obezbjeđuju sigurnosni mehanizmi poput enkripcije podataka, autentifikacije uređaja, segmentacije mreže i kontinuiranog monitoringa sistema, kao i primjena međunarodnih sigurnosnih standarda i direktiva. Budući razvoj pametnih gradova u velikoj mjeri zavisit će od uspješne integracije umjetne inteligencije, obnovljivih izvora energije, IoT tehnologija, 5G mreža i naprednih sigurnosnih sistema u jedinstvenu funkcionalnu cjelinu. Takav pristup omogućit će razvoj sigurnijih, energetski efikasnijih i održivijih urbanih sredina, u kojima će pametne raskrsnice imati važnu ulogu u unapređenju kvaliteta života građana, zaštiti okoliša i stabilnosti urbane infrastrukture.

LITERATURA

- [1] A CO emission-based adaptive signal control for isolated intersections. Jorunal of the Air & Waste Management Association. (2020.).
- [2] C40 Cities Climate Leadership Group. (2016.) Cities 100: Copenhagen – Smart Traffic Signals Boost Cycling.
- [3] CAR 2 CAR Communication Consortium. Cooperative Intelligent Transport Systems.
- [4] Couture, T., Busch, H., Hansen, T., Guerra, F., Leidreiter, A., Murdoch, H., Ranalder, L., & Seyboth, K. (2019.). Renewables in Cities - Global Status Report. REN21 Secretariat.
- [5] EIT Urban Mobility. (2025.) AI traffic optimisation in cities.
- [6] EIT Urban Mobility Marketplace. (2025.) Tackling intersection congestion using AI in Istanbul and Helsinki.
- [7] European Climate. (2025.) Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA). Improving safety and efficiency of European roads with C-ITS.
- [8] European Climate. (2025.) Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA). Intelligent Transport Systems (ITS).
- [9] European Commission (2020.). Clean Energy for All Europeans Package & Smart Cities Initiatives.
- [10] European Transport Safety Council (ETSC). (2017.) Briefing: Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS).
- [11] International Energy Agency (IEA). (2022.). Renewables 2022 – Analysis and Forecast to 2027. *Paris: IEA*.
- [12] Jasinski, J., Olsson, L. (2025.) The Impact of Adaptive Signal Control on Traffic Efficiency and Environmental Pollution. Chalmers University of Technology.
- [13] Mahmood, Z. (2025). Artificial Intelligence for Smart Cities and Smart Infrastructure. Springer International Publishing.
- [14] Powell, J., McCafferty-Leroux, A., Hilal, W., & Gadsden, S. (2024.). Smart Grids: A Comprehensive Survey of Challenges and Applications.
- [15] Rajarajan, M., Nepal, S., & Fitzgerald, W. (2020). Cyber Security and Smart Cities. CRC Press.
- [16] Ranalder, L., Busch, H., Hansen, T., Brommer, M., Couture, T., Gibb, D., et al. (2021). Renewables in Cities 2021 Global Status Report. REN21 Secretariat.
- [17] Song, H., Srinivasan, R., Sookoor, T., & Jeschke, S. (2017). Smart Cities: Foundations, Principles and Applications. Wiley.
- [18] State of Green. 380 Intelligent Traffic Signals for Copenhagen (2025.).
- [19] Yunex Traffic. (2024.) Prague completes first phase of AI – enabled traffic control system Yutrafic FUSION.
- [20] Yunex Traffic. (2025.) Yunex Traffic Modernizes Hamburg's Traffic Control System for Signalized Intersections.