

PRIMJENA ITS-A, AI I DIGITALNIH BLIZANACA U UPRAVLJANJU I ODRŽAVANJEM PUTNE MREŽE

Osman Lindov¹

Univerzitet u Sarajevu-Fakultet za saobraćaj i komunikacije

Jasmina Olovčić

Roughton International Limited, Sarajevo

Samir Džaferović

Univerzitet u Sarajevu-Fakultet za saobraćaj i komunikacije

Rezime

Saobraćajni sistem se suočava sa rastućim izazovima održavanja putne infrastrukture zbog starenja mreže, povećanog saobraćajnog opterećenja, ograničenih finansijskih sredstava i klimatskih uticaja. Tradicionalni pristupi održavanju, zasnovani na periodičnim pregledima i reaktivnim intervencijama, sve češće postaju nedovoljni za zahtjeve efikasnosti, bezbjednosti i održivosti. Digitalizacija kroz ITS, IoT, AI i digitalne blizance nudi rješenja za modernizaciju upravljanja putevima, zasnovanom na podacima, uz podršku odlučivanju u realnom vremenu i prediktivnom planiranju intervencija. Vještačka inteligencija (AI) sve više transformiše planiranje, izgradnju, rad i održavanje putne infrastrukture. Rad analizira ulogu ovih tehnologija u nadzoru, planiranju i održavanju putne mreže sa fokusom na integraciju ITS podataka sa RAMS sistemima, primjenu edge computinga, te AI modele za detekciju oštećenja i prognozu degradacije. Posebno, u zemljama sa slabom razvijenošću putne infrastrukture, razmatraju se izazovi implementacije uključujući kvalitet i dostupnost podataka, institucionalnu spremnost, troškove i pitanja kibernetičke sigurnosti. Na kraju se sintetizuju ključne koristi i ograničenja te predlažu budući smjerovi istraživanja i fazni pristup implementaciji za otpornu i održivu putnu infrastrukturu.

Ključne riječi: ITS, IoT, AI, DT, održavanje puteva, digitalizacija, upravljanje infrastrukturom.

APPLICATION OF ITS, AI AND DIGITAL TWINS IN THE MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF THE ROAD NETWORK

Osman Lindov

University of Sarajevo-Faculty of Traffic and Communications

Jasmina Olovčić

Roughton International Limited, Sarajevo

Samir Džaferović

University of Sarajevo-Faculty of Traffic and Communications

Summary

The transport system faces growing challenges in maintaining road infrastructure due to network ageing, increased traffic loads, limited financial resources, and climate impacts. Traditional maintenance approaches, based on periodic inspections and reactive interventions, are increasingly becoming insufficient to meet the requirements of efficiency, safety, and sustainability. Digitalisation through ITS, IoT, AI, and digital twins offers solutions to modernise road management by enabling data-driven operations, supporting real-time decision-making, and improving predictive maintenance planning. Artificial intelligence (AI) is increasingly transforming the planning, construction, operation, and maintenance of road infrastructure. This paper analyses the role of these technologies in road network monitoring, planning, and maintenance, with a focus on integrating ITS data with Road Asset Management Systems (RAMS), applying edge computing, and using AI models for distress detection and degradation forecasting. In particular, for countries with less developed road infrastructure, the paper discusses key implementation challenges, including data availability and quality, institutional readiness, costs, and cybersecurity considerations. Finally, the paper synthesises the main benefits and limitations and proposes future research directions as well as a phased implementation approach towards resilient and sustainable road infrastructure.

Keywords: ITS, IoT, AI, DT, road maintenance, digitalization, infrastructure management

¹ Osman lindov, olindovgmail.com (osman,lindov@fsk.unsa.ba)

1. UVOD

Putna infrastruktura predstavlja ključni element ekonomskog i društvenog napretka, omogućavajući efikasnu mobilnost ljudi i dobara, regionalnu integraciju i pristup tržištima. U većini evropskih država, sve veći akcenat stavlja se na održavanje i unapređenje postojećih saobraćajnih mreža, umjesto na izgradnju novih. Ovakav trend proističe iz ograničenja budžeta, prostora, ali i potrebe za održivim upravljanjem infrastrukturom. Tradicionalne metode održavanja puteva oslanjaju se na vizuelne inspekcije, periodične tehničke preglede i intervencije usljed značajnih oštećenja, što često rezultira povećanim troškovima, smanjenjem bezbjednosti i neefikasnim korištenjem resursa što je detaljno analizirano u literaturi o upravljanju imovinom puteva [2], [19]. Napredak digitalnih tehnologija i njihova implementacija u sektoru saobraćaja nude nove perspektive za transformaciju modela upravljanja i održavanja putne infrastrukture. Time se nameće potreba za integracijom digitalnih rješenja u jedinstveni ekosistem koji omogućava donošenje odluka zasnovanih na relevantnim podacima.

2. ITS KAO OSNOVA DIGITALNE TRANSFORMACIJE

Inteligentni transportni sistemi (ITS) koriste informacione, komunikacione i upravljačke tehnologije za unapređenje bezbjednosti, efikasnosti i održivosti saobraćaja. ITS omogućava prikupljanje i razmjenu podataka o saobraćaju i stanju infrastrukture, što je ključno za nadzor i održavanje puteva. Saobraćajne kamere, detektori vozila i meteorološke stanice pružaju podatke neophodne za analizu i operativno odlučivanje. Integracija ovih sistema olakšava planiranje intervencija uz minimalan uticaj na protočnost saobraćaja, čineći ITS osnovom digitalne transformacije putne infrastrukture (Tabela 1). Integracija Inteligentnih transportnih sistema (ITS) sa sistemima upravljanja imovinom puteva (RAMS-Road Asset Management System) podrazumijeva kontinuirano povezivanje podataka sa terena (saobraćaj, stanje kolovoza, uslovi okoline puta) sa procesima planiranja, održavanja i finansiranja putne infrastrukture. Cilj je da se odluke o održavanju i investicijama donose na osnovu stvarnih, ažurnih i mjerljivih podataka, a ne periodičnih, sporih pregleda (Tabela 2).

Tabela 1. Tokovi podataka senzor-evidencija-analitika

Segment	Opis
ITS izvori podataka	detektori saobraćaja (volumen, brzina, zagušenje), kamere (AI detekcija oštećenja, nesreća), meteorološke stanice (kiša, led, temperatura), WIM (Weigh in Motion ²) sistemi (teška vozila, težina, osovinska opterećenja)
Integracioni sloj	API / ETL servisi, GIS referenciranje (svaki podatak vezan za tačnu dionicu)
RAMS modul	evidencija imovine (kolovoz, mostovi, signalizacija), indikatori stanja (PCI, IRI, nosivost)
Analitika i odlučivanje	prediktivno održavanje, optimizacija budžeta, prioriteti intervencija

Tabela 2. ITS podaci, indikatori i odluke

ITS podatak	RAMS indikator	Odluka
Povećan broj teških vozila	Brže propadanje kolovoza	Pojačano održavanje
Česta kočenja / zagušenja	Bezbedonosno/Sigurnosni rizik	Poboljšanje geometrije
Niske temperature + vlaga	Rizik poledice	Preventivno posipanje
Vibracije na mostu	Strukturni stres	Detaljna inspekcija

Integracija ITS-a i RAMS-a predstavlja ključni korak prema inovativnom, održivom i finansijski efikasnom upravljanju putnom infrastrukturom. Ona pretvara infrastrukturu iz „pasivne imovine“ u aktivni sistem koji sam daje signale kada i kako ga treba održavati.

3. EU DIREKTIVE I ARHITEKTURA ITS SISTEMA

Razvoj inteligentnih transportnih sistema (ITS) u Evropskoj uniji zasniva se na jasno definisanom regulatornom okviru čiji je cilj:

- interoperabilnost sistema,
- standardizacija razmjene podataka,
- povećanje bezbjednosti,
- digitalna transformacija infrastrukture,
- podrška održivoj mobilnosti.

² Weigh-in-Motion (WIM) senzori ugrađeni u put koji mjere opterećenja osovina vozila i bruto težinu dok su vozila u pokretu, bez potrebe za zaustavljanjem.

Direktiva 2010/40/EU uspostavlja obavezna prioritetna područja za implementaciju inteligentnih transportnih sistema (ITS) unutar Evropske unije, s ciljem osiguravanja efikasnijeg, bezbjednijeg, sigurnijeg i interoperabilnog drumskog saobraćaja. Direktiva posebno naglašava optimalno korištenje podataka o putevima, saobraćaju i putovanjima, razvoj interoperabilnih prekograničnih sistema te primjenu sigurnosnih i zaštitnih aplikacija, u potpunoj usklađenosti sa ciljevima definisanim kroz ITS Action Plan Evropske komisije. [9].

Član 6 Direktive predviđa donošenje zajedničkih tehničkih specifikacija i standarda kako bi se osigurala harmonizovana i dosljedna implementacija ITS rješenja unutar EU, uz izbjegavanje fragmentacije sistema između država članica. Najvažnija odredbe Direktive 2010/40/EU su:

- Član 3 – definisanje prioritetnih područja za razvoj i primjenu ITS sistem;
- Član 6 – uspostavljanje tehničke specifikacija radi osiguranja interoperabilnosti i standardizacije;
- Obaveza interoperabilnosti – ključni princip kojim se garantuje funkcionalna povezanost sistema.

Implementacija ITS sistema u skladu sa Direktivom 2010/40/EU je preduslov za harmonizaciju nacionalne putne infrastrukture sa evropskim transportnim prostorom. Usklađenost sa ovom Direktivom ne znači samo tehničko prilagođavanje, već i strateško pozicioniranje države u okviru jedinstvenog digitalnog tržišta transporta. Time se otvara pristup finansijskim instrumentima Evropske unije, uključujući CEF, Horizon Europe i IPA, koji sve više prioritet daju projektima digitalizacije, interoperabilnosti i pametne infrastrukture. U tom kontekstu, FRAME Architecture predstavlja referentni evropski okvir za planiranje i razvoj ITS sistema. Njeni najvažniji dijelovi obuhvataju funkcionalni model (definisanje funkcija i servisa sistema), komunikacione tokove (razmjenu informacija između podsistema) te referentnu arhitekturu (logičku i fizičku strukturu sistema). FRAME omogućava strukturiran pristup razvoju nacionalne ITS arhitekture, osiguravajući kompatibilnost sa evropskim standardima i budućim proširenjima sistema.

Standard DATEX II predstavlja temelj interoperabilne razmjene podataka u drumskom saobraćaju. Riječ je o XML standardu za razmjenu podataka o saobraćaju i putnim uslovima, koji je obavezan u kontekstu RTTI (Real-Time Traffic Information) usluga. Primjena DATEX II standarda omogućava pouzdanu, strukturiranu i prekogranično kompatibilnu razmjenu podataka između upravljača puteva, centara za upravljanje saobraćajem i pružalaca informacija korisnicima. Direktiva 2010/40/EU i FRAME Architecture zajedno predstavljaju temelj digitalne transformacije putne infrastrukture, što je potvrđeno kroz analize i izvještaje Evropske komisije i World Road Association (PIARC), [9], [3]. Standardizovana ITS arhitektura omogućava interoperabilnost, nadogradnju i sigurnost sistema, dok istovremeno stvara infrastrukturnu osnovu za implementaciju naprednih tehnologija poput vještačke inteligencije, prediktivne analitike i koncepta digitalnih blizanaca (digital twins). EU Direktiva 2010/40/EU i FRAME arhitektura predstavljaju temelj digitalne transformacije putne infrastrukture što je potvrđeno u izvještajima Evropske komisije i PIARC-a [9], [3]. Standardizovana ITS arhitektura omogućava interoperabilnost, skalabilnost i sigurnost sistema, dok istovremeno stvara infrastrukturnu osnovu za implementaciju naprednih tehnologija poput vještačke inteligencije i digitalnih blizanaca.

4. IOT I EDGE COMPUTING

Edge computing predstavlja pristup u kojem se obrada podataka vrši blizu izvora njihovog nastanka (na "ivici" mreže), umjesto isključivo u centralizovanom cloud sistemu. U kontekstu putne infrastrukture, to znači da se analiza podataka sa kamera, senzora i IoT uređaja vrši lokalno na terenskim uređajima ili mikrosistemima (npr. edge gateway, edge server, AI kamera). Takav pristup omogućava brže reakcije sistema, stabilniji rad u uslovima slabije komunikacione veze i racionalnije korištenje mrežnih resursa. Tabela 3 prikazuje primjenu Edge computinga u putnoj infrastrukturi kroz tri aktivnosti.

Tabela 3. Primjena Edge computinga u putnoj infrastrukturi

AI analiza oštećenja u realnom vremenu	Predobrada podataka sa senzora	Lokalna reakcija sistema
- Kamera + lokalni AI model (npr. CNN) - Detekcija pukotina, rupa, deformacija - Samo rezultati (ne cijeli video) šalju se u centralni sistem	- Filtriranje šuma - Agregacija podataka (min, max, prosjek) - Lokalna procjena rizika (npr. poledica)	- Automatsko aktiviranje signalizacije - Aktiviranje promjenjive signalizacije (VMS) - Pokretanje preventivnog posipanja

Tabela 4. Prednosti Edge modela

Element	Centralizovani sistem	Edge sistem
Latencija	Visoka	Niska
Količina podataka	Velika	Optimizovana
Privatnost	Veći rizik	Veća kontrola
Otpornost	Zavisno od mreže	Lokalna autonomija
Trošak prenosa	Veći	Manji

Implementacija edge computing arhitekture u kombinaciji sa međunarodnim standardima omogućava smanjenje latencije, povećanje pouzdanosti i sigurnosti podataka, te optimizaciju troškova digitalnog upravljanja putnom infrastrukturom. Standardizacija predstavlja preduslov interoperabilnosti i mogućnosti nadogradnje sistema, dok edge arhitektura osigurava operativnu efikasnost i otpornost sistema u realnom vremenu.

4.1. IoT u praćenju stanja putne infrastrukture

IoT (Internet of Things) označava mrežu međusobno povezanih senzora i uređaja koji omogućuju prikupljanje podataka u stvarnom vremenu. U području putne infrastrukture, IoT tehnologije osiguravaju kontinuirano praćenje stanja kolovoza, mostova, tunela i ostalih dijelova putne mreže. Senzori ugrađeni u kolovoz ili postavljeni uz put bilježe parametre poput težine, osovinskog opterećenja, vibracija, deformacija, temperature, vlažnosti i intenziteta saobraćaja. Prikupljeni podaci omogućuju pravovremeno otkrivanje oštećenja i potencijalnih rizika prije nastanka ozbiljnijih problema. IoT senzore koji se koriste u praćenju stanja putne infrastrukture i okoline puta mogu se svrstati u tri grupe i to:

- IoT senzori za praćenje stanja strukture (SHM-Structural Health Monitoring).
- IoT senzori za praćenje stanja kolovoza i površine puta (PSCS-Pavement & Surface Condition Sensors) i
- IoT senzori za praćenje stanja okoline i opterećenja puta (ETLS-Environmental & Traffic Load Sensors).

U tabeli 5. prikazani su IoT senzori grupisani po različitim oblastima praćenja putne infrastrukture.

Tabela 5. IoT senzori za praćenje stanja putne infrastrukture

Vrsta IoT senzora	Naziv	Namjena
IoT senzori za praćenje stanja strukture	Senzori vibracije i akcelerometri	Detektuju strukturne pokrete ili pomak frekvencije koji ukazuju na unutrašnja oštećenja (mostovi, vijadukti).
	Senzori naprezanja	Mjere deformaciju (kompresiju ili zatezanje) materijala pod velikim opterećenjem (mostovi, vijadukti).
	Senzori za detekciju pukotina	Prate rast i položaj pukotina u betonskim konstrukcijama, signalizirajući potencijalne osnovne kvarove (mostovi, vijadukti).
	Senzori nagiba (inklinometri)	Prate ugaone varijacije ili pomake u poravnanju mostova, stubova ili naslonjača.
	Optički senzori za naprezanje, temperature (Fiber Bragg)	Mjere deformaciju, pritisak i temperaturu, na koje ne utiču elektromagnetne smetnje.
IoT senzori za praćenje stanja kolovoza i površine puta	Piezoelektrični senzori	Mjerenje težine i sile vozila (u kretanju)
	Ultrazvučni senzori	Mjere nagla odstupanja između vozila i kolovoza (podloge), radi evidentiranja nepravilnosti podloge puta (udarne rupe, izbočine i dr.)
	Senzori protoka-Induktivni petlje	Mjere i detektuju prisustvo i prolaz vozila i kategorije vozila.
	Senzori vlage	Mjere nakupljanje vode na kolovozu (akvaplaning, smrzavanje i dr)
IoT senzori za praćenje stanja okoline i opterećenja puta	Senzori temperature i vlažnosti	Mjere temperaturu i vlažnost podloge -asfalta (vruć asfalt, razdvodnjen-vlažan).
	Akustični senzori	Mjere zvučne nepravilnosti (skokove) pri prolazu vozila (prelaz preko oštećenja, ispucalosti, naslaga i dr.).
	Senzori za brojanje vozila	Mjere prolaz i obim saobraćaja (kamere na raskrsnicama)
	Meteorološke stanice	Mjere brzinu, smjer vjetra, količinu padavina, temperaturu, vlažnost vazduha i dr.

Implementacija IoT sistema znatno doprinosi prelazu s reaktivnog na preventivno i prediktivno održavanje. Umjesto planiranja intervencija prema unaprijed definiranim vremenskim intervalima, moguće ih je bazirati na stvarnom stanju infrastrukture, čime se optimiziraju troškovi i produžuje životni vijek putne infrastrukture.

5. PRIMJENA (AI) VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE U ODRŽAVANJU PUTEVA

Vještačka inteligencija AI (postaje ključni alat u upravljanju i održavanju putne infrastrukture, posebno u kombinaciji sa ITS-om, RAMS-om i konceptom digitalnog blizanca. Njena osnovna prednost ogleda se u sposobnosti obrade velikih količina heterogenih podataka i donošenja odluka zasnovanih na obrascima koje je dugotrajno evidentirati klasičnim metodama. Tehnike vještačke inteligencije, naročito mašinsko učenje, sve više se koriste za analizu velikih skupova podataka dobijenih iz ITS i IoT sistema što je detaljno obrađeno u radovima Zhou et al. [26] i Shi et al. [20]. AI algoritmi omogućavaju obradu informacija bez ljudske intervencije, prepoznavanje obrazaca i prognozu budućih promjena na infrastrukturi. Među najčešćim upotrebama AI u održavanju puteva je automatsko otkrivanje oštećenja na kolovozu putem analize slika i video materijala korištenjem deep learning modela [20]. Pomoću kamera postavljenih na vozila ili dronove mogu se precizno uočiti pukotine, rupe i druga fizička oštećenja. AI se primjenjuje za predviđanje propadanja puteva na osnovu prethodnih opterećenja, klimatskih faktora i ranijih popravki korištenjem ML i prediktivnih modela [11], [22]. Ovakav pristup doprinosi boljem planiranju održavanja i omogućava efikasnije korištenje sredstava. Vještačka inteligencija ima potencijal da transformiše održavanje putne infrastrukture iz reaktivnog u prediktivni i optimizovani proces. Uspješna primjena AI u održavanju putne infrastrukture zahtijeva postepenu implementaciju, kvalitetne podatke, institucionalnu spremnost i jasne procedure odlučivanja. Primjena vještačke inteligencije u održavanju puteva, uprkos velikim mogućnostima, nailazi na brojne tehničke, organizacione i institucionalne barijere. AI sistemi zahtijevaju velike količine pouzdanih i standardizovanih podataka kroz duži vremenski period, ali u realnosti su ti podaci često nepotpuni, međusobno neusklađeni i prikupljeni različitim metodama (istorijski podaci radi „učenja“ i adekvatnog odlučivanja). Bez kvalitetnih informacija, rezultati AI modela mogu biti nepouzdan ili skloni pristrasnosti. Za uspješnu implementaciju potrebna je napredna IT infrastruktura, stručan kadar i integracija sa postojećim sistemima poput RAMS, GIS i ITS. Transparentnost odluka koje generiše AI posebno je važna u javnom sektoru, jer modeli bazirani na dubokom učenju (deep learning) često funkcionišu kao „crna kutija“, što otežava objašnjavanje prioriteta i prihvatanje rezultata od strane donosioca odluka što je identifikovano kao izazov u savremenim AI sistemima [26].³

Početna ulaganja u AI sisteme su značajna, a potrebno je kontinuirano održavanje i unapređenje, što može izazov za putne administracije ali prelazak je neminovan. Svakako da treba naglasiti i pravne i etičke izazove, uključujući pitanja vlasništva podataka, zaštite privatnosti, posebno kod video-nadzora i određivanja odgovornosti za pogrešne preporuke sistema. Prema tome, potrebno je uporedo sa razvojem AI u održavanju putne infrastrukture izgraditi i jasne regulatorne okvire.

5.1 AI softverska rješenja za životni ciklus putne infrastrukture

Već se pojavljuju posebna softverska rješenja bazirana na AI za cijeli opus životnog ciklusa putne infrastrukture (Tabela 6).

Tabela 6. AI softverska rješenja za životni ciklus putne infrastrukture

Faza	Softverska rješenja	Aplikacije vještačke inteligencije
Planiranje i dizajn (AI pomaže u analizi potražnje, optimizaciji poravnanja i predviđanju uticaja prije izgradnje)	– Bentley OpenRoads Designer (AI modules) [4] – Autodesk InfraWorks (ML extensions) – PTV Vissim / Aimsun Next (AI-enabled simulation tools) – Softree (Road Design Software)	– Predviđanje buduće potražnje za saobraćajem korištenjem ML modela. – Simulacije scenarija korištenja zemljišta i mobilnosti. – Analiza ekološkog otiska (CO₂, buka). – Projektovanje puteva/parkinga. – Softver za projektovanje puteva .
Izgradnja (AI podržava upravljanje projektima, kontrolu kvalitete i optimizaciju resursa)	– Buildots (AI-based construction monitoring) [5], [6] – Autodesk Construction Cloud (AI insights) – Versatile AI – Doxel AI – Civils.ai	– Upravljanje rizicima na gradilištu. – Detekcija nedostataka putem kompjuterskog vida (kvalitet asfalta, pukotine). – Optimizacija alokacije resursa (materijala, opreme). – Prediktivno upravljanje rizicima (kašnjenja, prekoračenja troškova). – Analizira PDF građevinske ugovore. – Inspekcije lokacije, – Pretraživanje građevinskih propisa. – CAD i izvještaje.

³ Prevod: „a gdje sam ja tu“.

Održavanje (AI omogućava prediktivno održavanje i pametno upravljanje imovinom)	– RoadBotics (AI road inspection platform) – NIRA Dynamics (Road Surface Monitoring System) [17] – Dynatest (AI pavement diagnostics) [7] – Geotab ITS	– Predviđanje propadanja kolovozne konstrukcije (ML modeli). – Automatsko otkrivanje pukotina/rupa putem dronova i životnog vozila. – Prioritizacija investicija u održavanje na osnovu bodovanja rizika vještačke inteligencije. – Nadzor, upravljanje i održavanje putne infrastrukture. – Automatsko otkrivanje pukotina na 3D asfaltnim površinam.
Saobraćajne operacije i bezbjednost (AI podržava korištenje puta, protok saobraćaja i sigurnost)	– Miovision AI traffic systems – Vivacity Labs (AI traffic monitoring) [23] – Google DeepMind (traffic optimization research) – Smartlight.ai	– Predviđanje saobraćaja u realnom vremenu i detekcija incidenata. – Adaptivno upravljanje signalom korištenjem RL-a. – Predviđanje žarišta nesreća korištenjem istorijskih podataka o nesrećama. – Praćenje saobraćaja.
Kraj životnog vijeka / Recikliranje (AI pomaže u procjeni mogućnosti ponovne upotrebe i kružne ekonomije)	– AMP Robotics (AI recycling systems) [1]	– Predviđanje vrijednosti recikliranja asfalta/betona. – Optimizacija strategija demontaže. – Baze podataka o materijalima za puta u kružnoj ekonomiji s ML-om.

5.2. Tehnička klasifikacija AI modela

U tabeli 7. prikazana je tehnička klasifikacija AI modela, u primjeni digitalne transformacije održavanja putne infrastrukture.

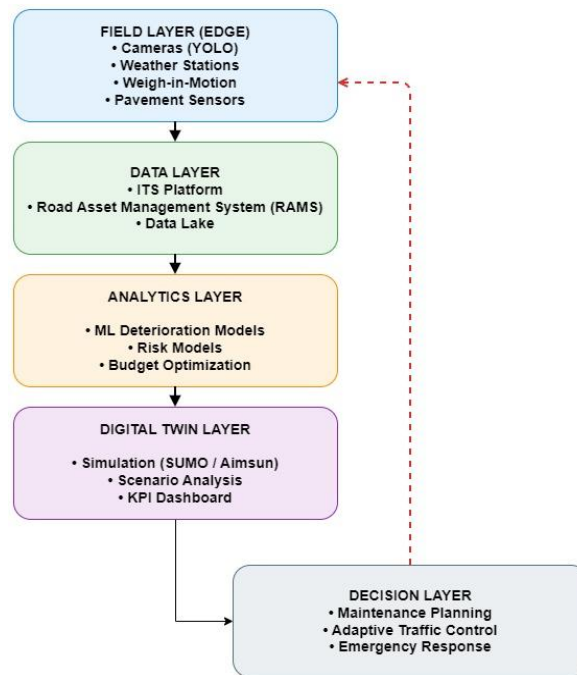
Tabela 7. Tehnička klasifikacija AI modela

Tip modela	Primjena
CNN	detekcija pukotina
LSTM	predviđanje degradacije
Random Forest	procjena rizika
Reinforcement Learning	adaptivni signal

Primjena CNN modela u detekciji pukotina dokumentovana je u [20], dok je Reinforcement Learning za adaptivno upravljanje signalima analiziran u [14], [27].

6. DIGITALNI BLIZANCI (DT) PUTNE INFRASTRUKTURE

Digitalni blizanac (DT-Digital Twin) je virtuelna replika fizičkog sistema koja se stalno ažurira pomoću aktuelnih podataka. Digitalni blizanci putne infrastrukture omogućavaju simulaciju i detaljnu analizu različitih scenarija održavanja i upravljanja u skladu sa konceptima digitalizacije infrastrukture opisanim od strane PIARC-a [3], [25]. Kombinovanjem informacija iz ITS, IoT i AI sistema, digitalni blizanac puta postaje "snažan" alat za podršku donošenju odluka. Simulacije pomažu da se procjeni kako saobraćajno opterećenje, vremenski uslovi i razne strategije održavanja utiču na stanje infrastrukture kroz vrijeme. Također, digitalni blizanci dozvoljavaju bezbjedno ispitivanje novih tehnologija i pristupa, što ima poseban značaj prilikom planiranja ulaganja i strateškog upravljanja putnom infrastrukturom.

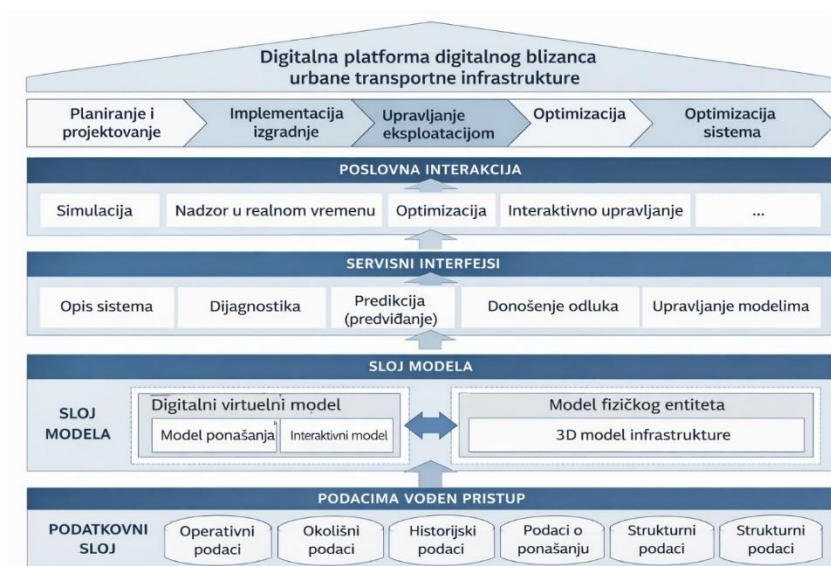


Slika 1. DT održavanje putne infrastrukture
Izvor: obrada autora

6.1. Arhitektura DT platforme

Arhitektura ITS-a omogućava kontinuiran nadzor putne infrastrukture i saobraćajnih tokova kroz integraciju senzora, komunikacionih mreža i centralnih sistema za upravljanje, čime se obezbeđuje osnova za dalju primjenu naprednih analitičkih i digitalnih tehnologija. Arhitektura slojeva DT Sistema se sastoji od 6 layera i to:

1. Podaci Layer (IoT, ITS).
2. Integracija Layer (API, ETL, GIS).
3. Analitika Layer (AI/ML).
4. Simulacija Layer (SUMO / VISSIM).
5. Odluka Layer (RAMS + budžetiranje).
6. Vizualizacija Layer (Dashboard, 3D GIS).



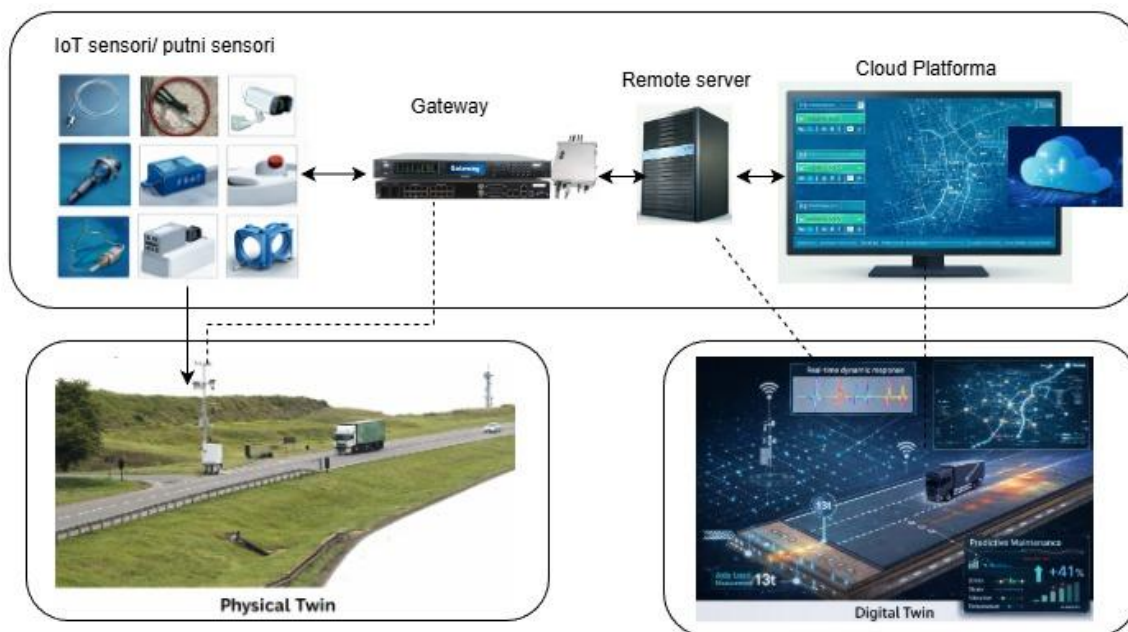
Slika 2. Digitalna platforma digitalnog blizanca urbane transportne infrastrukture
Izvor: Wu, D., Zheng, A., Yu, W., Cao, H., Ling, Q., Liu, J., & Zhou, D. (2025). Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure

Dijagram prikazuje klasičan tok arhitekture digitalnih blizanaca:

Podaci → Model → Usluge → Primjene → Optimizaciju životnog ciklusa

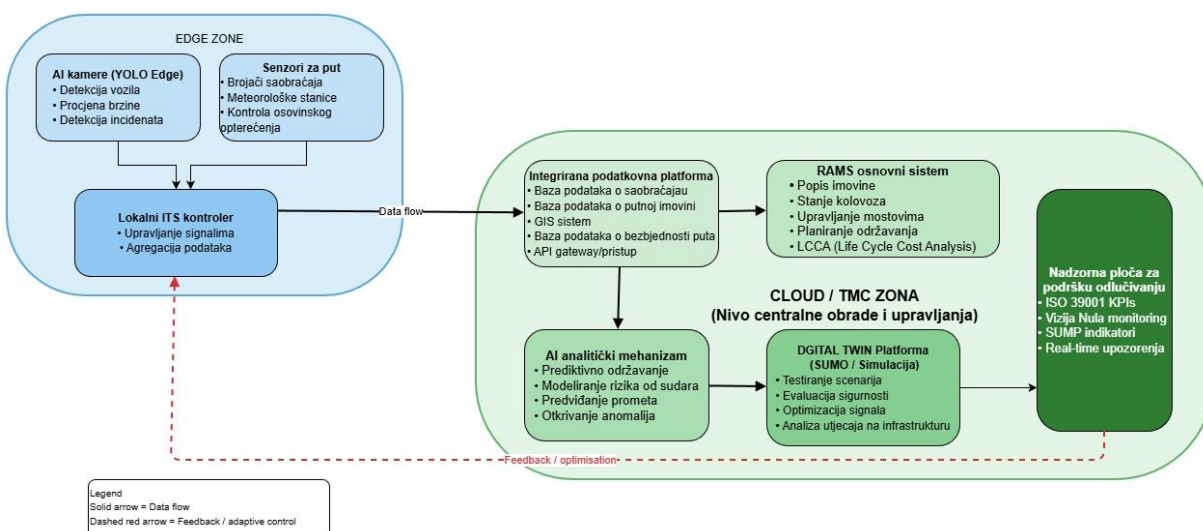
Na dijagramu se prikazuje:

- Strukturirano upravljanje.
- Modularna arhitektura.
- Razdvajanje po horizontalnoj integraciji.
- Vertikalna integracija.
- ISO-stil jasnoće.
- Institucionalni dizajn digitalnih platformi EU.



Slika 3. Integracija IoT i AI u održavanju putne infrastrukture

Izvor: obrada autora



Slika 4. Dijagram DT u održavanju putne infrastrukture

Izvor: obrada autora

6.2. Indikatori digitalizacije održavanja putne infrastrukture

U tabeli 8, prikazani su indikatori prelaska sa tradicionalnog na digitalni oblik održavanja putne infrastrukture. Vrijednosti su zasnovane na komparativnim analizama EU pilot projekata i dostupnim tehničkim izvještajima.

Tabela 8. KPI indikatori prije i poslije digitalizacije

Indikator	Tradicionalni sistem	AI/DT sistem	Poboljšanje
Vrijeme detekcije oštećenja	6–12 mjeseci	1–7 dana	-85%
Trošak reaktivne sanacije	100%	60–70%	-30%
Rizik nezgoda	Visok	Smanjen	-20–40%
Životni vijek kolovoza	100%	115–130%	+15–30%

7. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA _ANALIZA SLUČAJEVA EU

Rad se zasniva na kvalitativnoj komparativnoj analizi slučajeva (comparative case study analysis) primjene ITS, IoT, AI i Digital Twin (DT) tehnologija u upravljanju i održavanju putne infrastrukture u državama Evropske unije. Odabrani su reprezentativni primjeri EU prakse koji obuhvataju različite faze životnog ciklusa infrastrukture (Tabela 9).

Tabela 9. EU prakse primjene AI različitim fazama životnog ciklusa infrastrukture

Zemlja	Sektori primjene	Istraživanja
Engleska – AI prediktivno održavanje (National Highways)	Primjena AI modela za predviđanje degradacije kolovoza Integracija senzora + centralni RAMS Korištenje istorijskih podataka o opterećenju Rezultat: smanjenje neplaniranih intervencija i optimizacija budžeta	Rezultati su dokumentovani u izvještajima UK Highways [22]
Njemačka – Digital Twin mostova (Autobahn GmbH)	Primjena SHM (Structural Health Monitoring) sistema Fiber optic senzori + AI analiza naprežanja Digitalni blizanci mostova za simulaciju opterećenja Fokus na prevenciji strukturalnih kvarova	SHM sistemi analizirani su u [8]
Nizozemska – Integrirani Smart Mobility sistem	Integracija DATEX II standarda Edge obrada podataka + centralni DT model Interoperabilnost između saobraćaja i upravljanja imovinom Fokus na klimatskoj otpornosti infrastrukture	U skladu sa evropskim digitalnim okvirima [9], [10]

U tabeli 10 prikazana je opšta evaluacijska ocjena primjene ITS, IoT, AI i Digital Twin (DT) tehnologija u posmatranim zemljama. Evaluacija je izvedena na osnovu javno dostupnih tehničkih izvještaja, regulatornih dokumenata i stručnih analiza, koristeći kvalitativnu skalu (djelimično – visoko – vrlo visoko).

Tabela 10. Tabela evaluacije primjene ITS, IoT, AI i Digital Twin tehnologija u posmatranim zemljama

Kriterij	UK	Njemačka	NL
Nivo digitalne integracije	Visok	Visok	Vrlo visok
Edge implementacija	Djelimična	Napredna	Integrirana
DT platforma	U razvoju	Mostovi	Nacionalna
Standardizacija	Djelimična	Visoka	Visoka

8. IZAZOVI IMPLEMENTACIJE DT U ZEMLJAMA U TRANZICIJI

Vještačka inteligencija (AI) nastavlja se razvijati i sve će se više integrisati u inženjering, i dublju i sofisticiraniju saradnju između AI sistema i profesionalaca. Novi trendovi i istraživački pravci naglašavaju ključna područja koja će oblikovati sljedeću generaciju rješenja za upravljanje putnom infrastrukturom. Iako AI predstavlja značajne prednosti za putnu infrastrukturu, njena implementacija nije bez ograničenja i izazova, posebno gledajući na današnji razvoj i baze podataka. Neka od ograničenja AI u putnoj infrastrukturi prikazana su u Tabeli 11.

Tabela 11. Ograničenja vještačke inteligencije u putnoj infrastrukturi

Tema	Ključne tačke
Dostupnost i kvalitet podataka	-efikasnost vještačke inteligencije ovisi o kvaliteti podataka; -nedosljedni ili „šturi“ podaci mogu ometati performanse modela i generalizaciju; -neimplementacija senzora, platformi za dijeljenje podataka i standardizacija protokola pogoršava modele „učenja i odlučivanja“.
Etička i pitanja privatnosti	-kompjuterski vid i analiza mobilnih podataka dovode do problema sa privatnošću i nadzorom; -propisi GDPR (General Data Protection Regulation) moraju se poštovati prilikom prikupljanja i korištenja podataka za AI aplikacije u skladu sa evropskim regulatornim okvirima [9].
Kibernetička sigurnost i rizik infrastrukture	-infrastruktura vođena AI postaje povezanija; - kibernetička sigurnost se pojavljuje kao ključno razmatranje; -kontrola i nadzor saobraćaja zasnovane na AI, posebno „povezana vozila“ i IoT senzori su potencijalne opasnosti napada (direktno narušena sigurnost i bezbjednost transporta).
Troškovi i stručnost	- relativno visoki troškovi implementacije;

	-nedostatak kvalifikovanog osoblja; -finansijske prepreke za manje administracije
--	--

8.1. Model implementacije DT u zemljama Zapadnog Balkana

Imajući u vidu prisutnost IoT senzora, ITS sistema i cloud infrastrukture, na putevima Zapadnog Balkana i spremnosti na promjene administracije putne infrastrukture, potrebno je pristupiti Modelu fazne implementacije Digital Twin sistema u zemljama Zapadnog Balkana, koji bi uključio sljedeće 5 faza (Tabela 12).

Tabela 12. Faze implementacije DT u zemljama Zapadnog Balkana

Faza	Opis	Cilj
Faza 1	Uspostava osnovnog ITS-a	Prikupljanje podataka
Faza 2	IoT senzori kritičnih dionica	Praćenje stanja u realnom vremenu
Faza 3	Edge analitika	Lokalna obrada i brza reakcija
Faza 4	Integracija RAMS sistema	Budžetska optimizacija
Faza 5	Digital Twin platforma	Simulacija i strateško planiranje

9. ZAKLJUČAK

Digitalna transformacija upravljanja i održavanja putne infrastrukture predstavlja neminovan pravac razvoja savremenih transportnih sistema. Integracija inteligentnih transportnih sistema (ITS), IoT senzora, edge computinga, vještačke inteligencije (AI) i digitalnih blizanaca (DT) omogućava prelazak sa tradicionalnog, reaktivnog modela održavanja na preventivni i prediktivni pristup zasnovan na podacima. Takav model doprinosi povećanju bezbjednosti saobraćaja, optimizaciji troškova, produženju životnog vijeka infrastrukture i efikasnijem upravljanju javnim resursima. Analiza evropskih praksi pokazuje da je uspješna implementacija ovih tehnologija zasnovana na jasnom regulatornom okviru, standardizaciji (npr. interoperabilnost i razmjena podataka), institucionalnoj spremnosti i faznom pristupu digitalizaciji. Digitalni blizanac se u tom kontekstu nameće kao integrativna platforma koja povezuje podatke, analitiku i simulacije u jedinstven sistem podrške odlučivanju. Rezultati komparativne analize ukazuju da države koje su uspješno implementirale ITS, IoT i DT tehnologije ostvaruju mjerljive koristi u smislu smanjenja vremena detekcije oštećenja, optimizacije troškova održavanja, povećanja bezbjednosti saobraćaja i produženja životnog vijeka infrastrukture. Međutim, posebni izazovi prisutni su u zemljama u tranziciji, gdje su ograničeni finansijski i kadrovski kapaciteti. U tom kontekstu, predloženi fazni model implementacije (ITS → IoT → Edge → RAMS → DT) predstavlja realan i održiv put modernizacije. Budući razvoj treba usmjeriti ka jačanju standardizacije, unapređenju kvaliteta podataka, razvoju stručnih kompetencija i uspostavljanju interoperabilnih digitalnih platformi. Zaključno, primjena ITS-a, AI i digitalnih blizanaca ne predstavlja samo tehnološku inovaciju, već stratešku transformaciju sistema upravljanja putnom infrastrukturom u pravcu otpornosti, održivosti i dugoročne efikasnosti.

Reference

[1] AMP Robotics, *AI for Recycling Systems in Infrastructure Applications*. Louisville, CO, USA: AMP Robotics Tech. Rep., 2023.

[2] A. T. Papagiannakis and E. A. Masad, *Pavement Design and Materials*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.

[3] World Road Association (PIARC), *Artificial Intelligence in the Road Sector – A PIARC Special Project (High Impact)*. Paris, France, 2024.

[4] Bentley Systems, *OpenRoads Designer with AI Extensions – Technical Overview*. Exton, PA, USA, 2023.

[5] Buildots, *AI-Based Construction Monitoring Case Studies*. Tel Aviv, Israel, 2022.

[6] Construction Industry Institute (CII), *AI-Based Construction Monitoring Case Studies*. Austin, TX, USA, 2022.

[7] Dynatest, *AI Analytics for Pavement Condition Assessment*. Ballerup, Denmark, 2023.

[8] ETH Zurich, “AI-Based Structural Health Monitoring for Bridges,” *J. Infrastructure Monitoring*, vol. 12, no. 2, pp. 127–142, 2024.

[9] European Commission, *ITS Action Plan*. Brussels, Belgium, 2010.

[10] European Commission, *AI Roadmap for Sustainable Transportation*. Brussels, Belgium, 2023.

[11] Federal Highway Administration (FHWA), *AI-Driven Roadway Optimization Pilot Project*. Washington, DC, USA, 2023.

[12] F. Meier, L. Schmitt, and H. Reiner, “Deep Reinforcement Learning for Road Alignment Optimization,” *Transp. Res. Part C*, vol. 154, 104568, 2023.

[13] A. Gurko and V. Miroshynik, “Artificial Intelligence in Road Construction: Prospects and Challenges,” *Sci. Papers Silesian Univ. Technol.*, no. 210, 2024.

[14] H. Li and J. Sun, “Reinforcement Learning for Adaptive Traffic Signal Control: A Survey,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1001–1017, 2020.

- [15] W. Li, H. Zhang, and J. Liu, "AI-Driven Road Design Optimization for Sustainable Infrastructure," *J. Infrastructure Syst.*, vol. 27, no. 4, 04021057, 2021.
- [16] O. Lindov, "AI Solutions for Sustainable, Safety and Resilient Transport and Mobility," in *Proc. 3rd Sci. Conf. Artificial Intelligence in Industry 4.0*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Oct. 2024.
- [17] NIRA Dynamics, *Road Surface Information System – Technical Documentation*. Linköping, Sweden, 2023.
- [18] NITI Aayog, *India's AI-Powered Transportation Revolution*. Government of India, 2023.
- [19] World Road Association (PIARC), *Road Asset Management Manual*. Paris, France.
- [20] Q. Shi, K. Liu, and X. Zhao, "Deep Learning Models for Pavement Crack Detection and Maintenance Prediction," *Autom. Constr.*, vol. 152, 104978, 2023.
- [21] Transport for London (TfL), *AI-Enhanced Incident Detection Platform*. London, UK, 2022.
- [22] UK Highways Agency, *AI-Based Predictive Maintenance Results*. London, UK, 2023.
- [23] Vivacity Labs, *AI Traffic Monitoring Systems – Technical Overview*. London, UK, 2023.
- [24] World Bank, *AI for Developing Country Infrastructure Challenges*. Washington, DC, USA, 2023.
- [25] World Road Association (PIARC), *Digitalization of Road Infrastructure*. Paris, France.
- [26] Y. Zhou, C. Zhao, and J. Liu, "Artificial Intelligence and Its Impact on Smart Road Infrastructure," *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 37, no. 5, pp. 652–667, 2022.
- [27] Y. Zhang et al., "AI-Based Traffic Signal Optimization Using Reinforcement Learning," *Transp. Res. Part C*, 2022.