

Od transportnog modela do digitalnog blizanca: metodološki okvir postepene transformacije sistema upravljanja saobraćajem¹²

Stamenka Stanković, Saobraćajni fakultet, Beograd, s.stankovic@sf.bg.ac.rs

Nikola Čelar, Saobraćajni fakultet, Beograd, n.celar@sf.bg.ac.rs

Jelena Kajalić, Saobraćajni fakultet, Beograd, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

Rezime: Koncept digitalnog blizanca poslednjih godina postaje jedan od ključnih pravaca razvoja inteligentnih transportnih sistema, omogućavajući kontinuirano praćenje stanja saobraćajnog sistema, analizu podataka u realnom vremenu i podršku donošenju operativnih odluka. Istovremeno, brojni gradovi već raspolažu transportnim modelima, a u pojedinim slučajevima i razvijenim sistemima upravljanja saobraćajem, uključujući adaptibilne sisteme upravljanja i druge ITS podsisteme. Iako se u literaturi intenzivno razmatraju arhitektura, tehnologije i primena digitalnih blizanaca, nedostaje metodološki okvir koji bi definisao postepeni razvoj postojećih sistema upravljanja saobraćajem ka digitalnom blizancu.

Cilj ovog rada je da predloži metodološki okvir koji polazi od transportnog modela kao osnovne komponente sistema upravljanja saobraćajem i definiše put njegove postepene evolucije ka digitalnom blizancu kroz integraciju različitih funkcionalnih komponenti, odnosno raspoloživih ITS podsistema. Predloženi okvir definiše razvojne faze koje prethode uspostavljanju operativnog digitalnog blizanca i predstavlja vezu između tradicionalnog transportnog modelovanja i daljeg razvoja digitalnih blizanaca kroz postojeće modele zrelosti. Na ovaj način se obezbeđuje praktična osnova za planiranje digitalne transformacije gradova različitog nivoa razvijenosti.

Ključne reči: transportni model, digitalni bliznac, ITS, upravljanje saobraćajem.

1 UVOD

Savremeni sistemi upravljanja saobraćajem prolaze kroz intenzivnu digitalnu transformaciju uslovljenu razvojem inteligentnih transportnih sistema (ITS), Interneta stvari (IoT), velikih podataka (Big Data) i veštačke inteligencije. Razvoj ovih tehnologija omogućio je kontinuirano prikupljanje i obradu podataka o stanju saobraćajnog sistema u realnom vremenu, stvarajući uslove za prelazak sa tradicionalnog pristupa planiranju i upravljanju ka sistemima zasnovanim na podacima i naprednoj analitici.

Paralelno sa razvojem novih tehnologija, brojni gradovi danas raspolažu različitim funkcionalnim komponentama sistema planiranja i upravljanja saobraćajem, uključujući transportne modele, adaptibilne sisteme upravljanja svetlosnom signalizacijom i druge ITS podsisteme. Međutim, ove komponente su najčešće razvijane nezavisno i sa ograničenim nivoom međusobne integracije.

¹² CC-BY licenca

Koncept digitalnog blizanca predstavlja jedan od najznačajnijih pravaca daljeg razvoja sistema upravljanja saobraćajem. Za razliku od tradicionalnih transportnih modela, digitalni blizanc omogućava kontinuiranu sinhronizaciju digitalnog i fizičkog sistema, objedinjavanje podataka iz različitih izvora, analizu stanja u realnom vremenu, simulaciju različitih scenarija i podršku donošenju operativnih odluka. Zbog navedenih karakteristika, digitalni blizanci se sve češće prepoznaju kao ključna tehnologija budućih sistema upravljanja saobraćajem [1].

Dosadašnja istraživanja uglavnom su usmerena na razvoj arhitekture digitalnih blizanaca, tehnologija koje omogućavaju njihovu implementaciju ili prikaz pojedinačnih studija slučaja [2], [3]. Istovremeno, znatno manje pažnje posvećeno je procesu kojim se postojeći sistemi upravljanja saobraćajem postepeno razvijaju ka digitalnom blizancu. U literaturi nije identifikovan jedinstven metodološki okvir koji bi definisao kako gradovi, polazeći od postojećih transportnih modela i raspoloživih ITS komponenti, mogu planirati ovu transformaciju.

Cilj ovog rada je da predloži metodološki okvir postepene transformacije sistema upravljanja saobraćajem od transportnog modela ka digitalnom blizancu. Predloženi okvir definiše razvojne faze zasnovane na integraciji raspoloživih funkcionalnih komponenti sistema upravljanja saobraćajem i uspostavlja vezu između tradicionalnog transportnog modelovanja i postojećih modela zrelosti digitalnih blizanaca.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 *Razvoj koncepta digitalnog blizanca u transportu*

Koncept digitalnog blizanca razvijen je kao digitalna reprezentacija fizičkog sistema koja omogućava kontinuiranu razmenu podataka između fizičkog i virtuelnog okruženja tokom celog životnog ciklusa sistema. Iako je prvobitno razvijen za potrebe industrijske proizvodnje, poslednjih godina njegova primena se intenzivno proširila i na oblast inteligentnih transportnih sistema. Rudskoy i saradnici [4] među prvim ukazuju da digitalni blizanc predstavlja prirodnu evoluciju postojećih sistema upravljanja saobraćajem, omogućavajući objedinjavanje različitih ITS servisa u jedinstvenu digitalnu platformu.

Ge i Qin [2] digitalni blizanc posmatraju kao novu razvojnu fazu inteligentnih transportnih sistema (DT-ITS). Njihov pregled obuhvata referentne arhitekture, komunikacione tehnologije kao i potencijalne ITS usluge koje mogu biti podržane primenom digitalnih blizanaca. Autori zaključuju da razvoj digitalnog blizanca zahteva visok nivo interoperabilnosti između različitih podsistema, pouzdanu razmenu podataka u realnom vremenu i primenu naprednih analitičkih metoda.

Najobuhvatniji pregled primene digitalnih blizanaca u saobraćaju dali su Nag i saradnici [3], analizirajući više od sto naučnih radova objavljenih u periodu od 2000. do 2024. godine. Rezultati njihovog istraživanja pokazuju da najveći broj radova obrađuje arhitekturu sistema, razvoj tehnoloških platformi i pojedinačne studije slučaja, dok je znatno manje pažnje posvećeno metodologijama njihove implementacije u postojećim sistemima upravljanja saobraćajem.

2.2 *Primena digitalnih blizanaca u upravljanju saobraćajem*

Razvojem komunikacionih tehnologija i sistema za prikupljanje podataka u realnom vremenu stvoreni su uslovi za prve praktične implementacije digitalnih blizanaca u upravljanju saobraćajem. Kušić i saradnici [5] razvili su digitalni blizanac deonice autoputa korišćenjem mikrosimulacionog modela SUMO i podataka sa automatskih brojača saobraćaja. Predloženi pristup omogućava kontinuiranu kalibraciju simulacionog modela u realnom vremenu i predstavlja osnovu za razvoj prediktivnih scenarija u upravljanju saobraćajem.

Sličan pristup prikazali su Llagostera-Brugarola i saradnici [6], koji su razvili digitalni blizanac međugradskog autoputa zasnovan na podacima prikupljenim putem V2X komunikacija i putne infrastrukture. Njihov sistem omogućava testiranje različitih strategija upravljanja, uključujući sistem dinamičkog ograničenja brzine, upravljanje incidentima i dinamičko rutiranje. Akcenat rada je na funkcionalnostima razvijenog digitalnog blizanca, a ne na procesu njegove evolucije iz postojećeg sistema upravljanja saobraćajem.

Primena digitalnih blizanaca na nivou raskrsnica analizirana je u radu Afshari i saradnika [7], koji integrišu LiDAR senzore i mikrosimulacioni model VISSIM radi automatske kalibracije modela i kontinuiranog praćenja rada signalisanih raskrsnica. Autori pokazuju da ovakav pristup omogućava preciznije procene pokazatelja efikasnosti saobraćaja i unapređuje podršku operaterima u upravljačkim centrima. Iako autori potvrđuju potencijal digitalnih blizanaca za upravljanje raskrsnicama, njihov pristup polazi od unapred definisane arhitekture sistema.

Pregled mogućnosti primene digitalnih blizanaca u upravljanju transportnom infrastrukturom dali su Wu i saradnici [8] i Gao i saradnici [9], koji ukazuju da digitalni blizanci predstavljaju osnovu za planove održavanja, upravljanje infrastrukturom i podršku donošenju odluka zasnovanih na podacima u realnom vremenu.

Prikazane studije potvrđuju da su digitalni blizanci već našli primenu u različitim segmentima upravljanja saobraćajem. Međutim, zajednička karakteristika većine ovih istraživanja jeste da se fokusiraju na razvoj ili primenu konkretnih rešenja, dok pitanje njihove postepene izgradnje iz postojećih sistema upravljanja saobraćajem ostaje nedovoljno razmotreno.

2.3 *Ograničenja postojećih istraživanja*

Analiza dostupne literature pokazuje da se postojeća istraživanja mogu svrstati u tri dominantna pravca istraživanja:

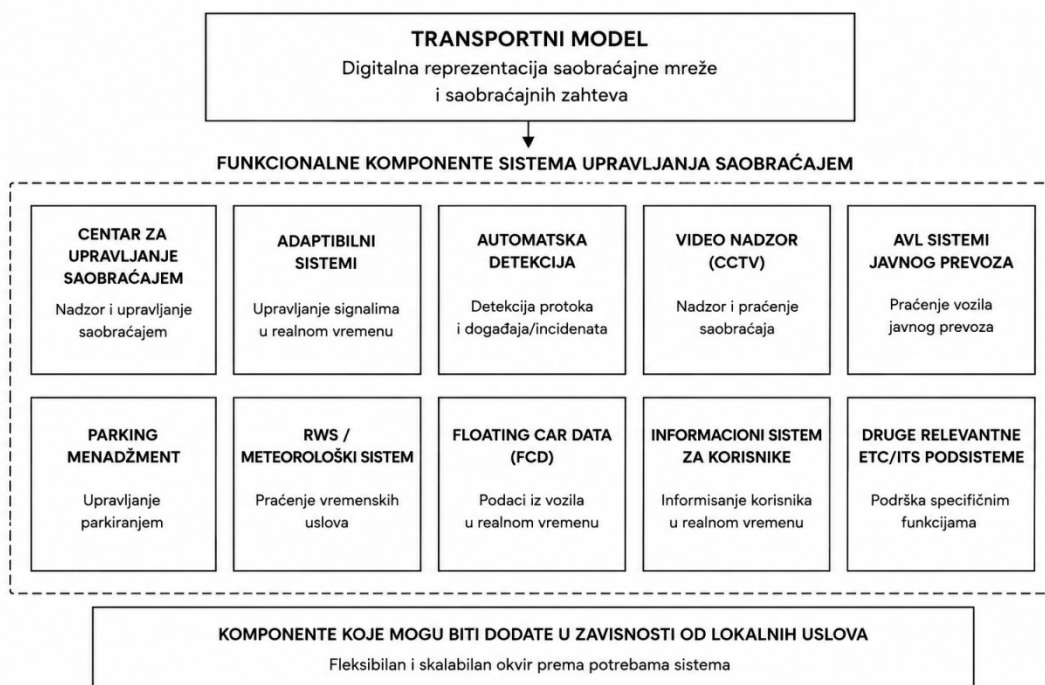
- razvoj referentnih arhitektura digitalnih blizanaca;
- razvoj tehnologija koje omogućavaju njihovu implementaciju;
- razvoj i analiza pojedinačnih studija slučaja.

Analizirana istraživanja uglavnom polaze od pretpostavke da su ključne komponente digitalnog blizanca već razvijene ili se fokusiraju na implementaciju pojedinačnih funkcionalnosti u unapred definisanim uslovima. Zbog toga u dostupnoj literaturi nije identifikovan metodološki okvir koji bi definisao postepenu transformaciju postojećih sistema upravljanja saobraćajem u digitalni blizanac. Upravo ovaj nedostatak predstavlja polaznu osnovu za metodološki okvir predložen u ovom radu.

3 POLAZNE PRETPOSTAVKE ZA RAZVOJ DIGITALNOG BLIZANCA

Razvoj digitalnog blizanca sistema upravljanja saobraćajem predstavlja postepen proces koji zavisi od postojećih karakteristika sistema kojim se upravlja. Iako se digitalni blizanci danas razvijaju za različite elemente transportne infrastrukture i sisteme upravljanja saobraćajem, u ovom radu fokus je usmeren na urbane sisteme, odnosno gradove, u kojima početni uslovi značajno variraju u pogledu razvijenosti transportnih modela, sistema upravljanja saobraćajem i ITS podсистема. Posledično, nije moguće definisati jedinstven put razvoja primenljiv na sve gradove.

Polazeći od postojećeg stanja, može se zaključiti da većina gradova raspolaže određenim skupom funkcionalnih komponenti sistema upravljanja saobraćajem koje predstavljaju osnovu za dalju digitalnu transformaciju. Njihov broj, funkcionalnosti i međusobna povezanost razlikuju se od grada do grada, ali zajedno predstavljaju početni nivo razvoja na kome se može graditi digitalni bliznac. U ovom radu pod funkcionalnim komponentama sistema upravljanja saobraćajem podrazumevaju se svi podсистemi koji učestvuju u prikupljanju, obradi, razmeni ili korišćenju podataka neophodnih za upravljanje saobraćajem. Njihova uloga u razvoju digitalnog blizanca nije identična, niti je neophodno da budu prisutni u svakom gradu. Naprotiv, predloženi metodološki okvir polazi od pretpostavke da se razvoj digitalnog blizanca zasniva na postepenoj integraciji raspoloživih funkcionalnih komponenti.



Slika 1: Funkcionalne komponente sistema upravljanja saobraćajem kao polazna osnova za razvoj digitalnog blizanca

Transportni model predstavlja polaznu funkcionalnu komponentu ovog procesa. On obezbeđuje digitalnu reprezentaciju saobraćajne mreže, geometriju, karakteristike transportnih zahteva, i drugih parametara neophodnih za analizu funkcionisanja sistema.

Međutim, tradicionalni transportni modeli prvenstveno su namenjeni planiranju i analizi unapred definisanih scenarija i u najvećoj meri koriste periodično prikupljene podatke, zbog čega sami po sebi ne mogu ostvariti funkcionalnosti digitalnog blizanca.

Pored transportnog modela, u pojedinim gradovima razvijene su i druge funkcionalne komponente sistema upravljanja saobraćajem. To mogu biti sistemi adaptibilnog upravljanja svetlosnom signalizacijom, sistemi za automatsko prikupljanje podataka, video nadzor, sistemi za upravljanje parkiranjem, sistemi za praćenje javnog prevoza, meteorološki i drugi ITS podsistemi. Njihova zajednička karakteristika jeste da obezbeđuju podatke ili funkcionalnosti koje mogu predstavljati osnovu razvoju digitalnog blizanca, ali su u postojećoj praksi često razvijani nezavisno i sa ograničenim nivoom međusobne integracije.

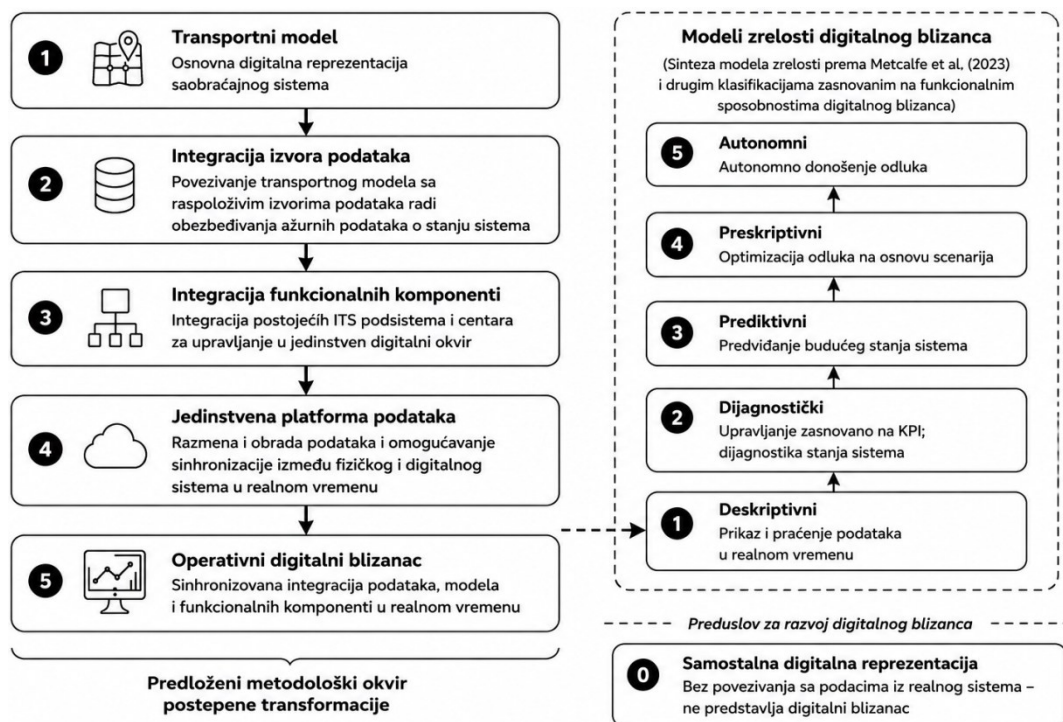
Funkcionalne komponente predstavljaju osnovne gradivne elemente predloženog metodološkog okvira, jer njihov stepen razvijenosti i međusobne integracije određuje početne uslove za razvoj digitalnog blizanca.

4 METODOLOŠKI OKVIR POSTEPENE TRANSFORMACIJE

Predloženi metodološki okvir zasniva se na pretpostavci da razvoj digitalnog blizanca predstavlja evolutivni proces u kome se postojeće funkcionalne komponente sistema upravljanja saobraćajem postepeno integrišu u jedinstvenu digitalnu celinu. U skladu sa tim, okvir je organizovan kroz pet međusobno povezanih razvojnih faza (Slika 2):

- Prva faza podrazumeva uspostavljanje transportnog modela kao osnovne digitalne reprezentacije sistema. Ova faza obezbeđuje prostornu i funkcionalnu osnovu na koju se u narednim fazama integrišu podaci i funkcionalne komponente sistema upravljanja saobraćajem.
- U drugoj fazi transportni model povezuje se sa raspoloživim izvorima podataka radi obezbeđivanja ažurnih podataka o stanju sistema. Cilj ove faze nije potpuna sinhronizacija realnog i virtuelnog sistema, već unapređenje transportnog modela korišćenjem raspoloživih izvora podataka.
- Treća faza podrazumeva integraciju funkcionalnih komponenti sistema upravljanja saobraćajem, uključujući centre za upravljanje, adaptibilne sisteme upravljanja signalizacijom i druge raspoložive ITS podsisteme. Ova faza, pored objedinjavanja različitih izvora podataka, uključuje i različite upravljačke funkcionalnosti koje su prethodno razvijane nezavisno.
- U četvrtoj fazi uspostavlja se jedinstvena platforma za razmenu i obradu podataka, čime se omogućava sinhronizacija između fizičkog i digitalnog sistema u realnom vremenu. Uspostavljanjem jedinstvene platforme omogućava se interoperabilnost svih komponenti i kontinuirana razmena podataka između fizičkog i digitalnog sistema.
- U petoj fazi uspostavlja se operativni digitalni blizanač kao jedinstvena digitalna reprezentacija sistema upravljanja saobraćajem, zasnovana na kontinuiranoj sinhronizaciji transportnog modela, funkcionalnih komponenti i podataka iz realnog sistema. Takav sistem predstavlja osnovu za naprednu analitiku, simulaciju scenarija i podršku donošenju operativnih odluka u realnom vremenu.

Predloženi metodološki okvir ne podrazumeva strogo linearnu implementaciju niti jedinstven redosled integracije funkcionalnih komponenti sistema upravljanja saobraćajem. Obim i redosled njihove integracije prilagođavaju se postojećem nivou razvijenosti sistema, pri čemu je zajednički cilj svih razvojnih puteva uspostavljanje operativnog digitalnog blizanca. Na taj način metodološki okvir omogućava njegovu primenu u gradovima koji raspolažu različitim skupom funkcionalnih komponenti i različitim nivoom razvijenosti sistema upravljanja saobraćajem.



Slika 2: Predloženi metodološki okvir postepene transformacije sistema upravljanja saobraćajem i njegov odnos prema modelima zrelosti

Nakon uspostavljanja operativnog digitalnog blizanca, njegov dalji razvoj može se posmatrati kroz postojeće modele zrelosti digitalnih blizanaca, koji opisuju unapređenje funkcionalnosti od osnovne digitalne reprezentacije sistema do autonomnog donošenja odluka [3]. U tom smislu, predloženi metodološki okvir ne predstavlja model zrelosti digitalnog blizanca, već definiše razvojne faze koje prethode primeni postojećih modela zrelosti i uspostavlja vezu između tradicionalnog transportnog modelovanja postojećih sistema upravljanja saobraćajem i modela zrelosti digitalnih blizanaca. Na taj način metodološki okvir i modeli zrelosti predstavljaju međusobno komplementarne, a ne alternativne pristupe razvoju digitalnog blizanca.

U većini postojećih modela zrelosti nivo 0 predstavlja samostalnu digitalnu reprezentaciju sistema bez povratne sprege sa realnim sistemom. U ovom radu takva reprezentacija ne smatra se digitalnim blizancem, već polaznom osnovom za njegov razvoj. Iz tog razloga predloženi metodološki okvir prethodi modelima zrelosti i završava

se uspostavljanjem operativnog digitalnog blizanca, nakon čega je moguće primeniti postojeće modele zrelosti.

5 ZAKLJUČAK

Digitalni blizanci predstavljaju jedan od najznačajnijih pravaca razvoja sistema upravljanja saobraćajem. Analiza dostupne literature pokazuje da su dosadašnja istraživanja pretežno usmerena na razvoj arhitektura, tehnologija i pojedinačnih studija slučaja, dok je znatno manje pažnje posvećeno metodološkom pristupu koji bi definisao postepenu transformaciju sistema upravljanja saobraćajem ka digitalnom blizancu.

U radu je predložen metodološki okvir koji polazi od transportnog modela kao osnovne digitalne reprezentacije saobraćajnog sistema i zasniva se na postepenoj integraciji raspoloživih funkcionalnih komponenti sistema upravljanja saobraćajem. Predloženi okvir definiše pet razvojnih faza koje omogućavaju postepeni prelaz od postojećeg sistema upravljanja saobraćajem do operativnog digitalnog blizanca, pri čemu se razvoj prilagođava postojećem nivou razvijenosti sistema i raspoloživim funkcionalnim komponentama.

Poseban doprinos rada ogleda se u uvođenju funkcionalnih komponenti sistema upravljanja saobraćajem kao osnovnih gradivnih elemenata metodološkog okvira i u razdvajanju metodološkog procesa razvoja digitalnog blizanca od njegovih modela zrelosti. Za razliku od postojećih modela zrelosti, koji polaze od već uspostavljenog operativnog digitalnog blizanca, predloženi metodološki okvir definiše razvojne faze koje prethode njegovom uspostavljanju i time predstavlja vezu između tradicionalnog transportnog modelovanja i daljeg razvoja digitalnih blizanaca. Istovremeno, pokazano je da prisustvo većeg broja ITS podsistema ili funkcionalnih komponenti sistema upravljanja saobraćajem ne podrazumeva automatski postojanje digitalnog blizanca. Digitalni blizanc nastaje tek njihovom funkcionalnom integracijom u jedinstven sistem zasnovan na kontinuiranoj sinhronizaciji sa realnim sistemom.

Predloženi metodološki okvir predstavlja konceptualnu osnovu za buduća istraživanja usmerena na njegovu primenu i validaciju u realnim sistemima upravljanja saobraćajem. Dalja istraživanja trebalo bi usmeriti na definisanje kriterijuma za procenu spremnosti sistema za razvoj digitalnog blizanca, razvoj kvantitativnih pokazatelja kojima bi se vrednovao napredak kroz pojedine faze transformacije, kao i primenu metodološkog okvira u gradovima različitog nivoa razvijenosti.

LITERATURA

- [1] FHWA, "Developing Future Traffic Management Systems Using Hybrid Twins," Washington, DC, 2022.
- [2] C. Ge and S. Qin, "Digital twin intelligent transportation system (DT-ITS)— A systematic review," *IET Intell. Transp. Syst.*, pp. 2325–2358, 2024, doi: 10.1049/itr2.12539.
- [3] D. Nag, F. Brandel-Tanis, Z. A. Pramestri, K. Pitera, and Y. K. Frøyen, "Exploring digital twins for transport planning: a review," *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 17, 2025, doi: 10.1186/s12544-025-00713-0.
- [4] A. Rudskoy, I. Ilin, and A. Prokhorov, "Digital Twins in the Intelligent Transport Systems," *Transp. Res. Procedia*, vol. 54, no. 2021, pp. 927–935, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.152.

- [5] K. Kušić, R. Schumann, and E. Ivanjko, "A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 55, 2023, doi: 10.1016/j.aei.2022.101858.
- [6] E. Llagostera-Brugarola, E. Corpas-Marco, C. Victorio-Vergel, E. Lopez-Aguilera, F. Vázquez-Gallego, and J. Alonso-Zarate, "A Digital Twin for Intelligent Transportation Systems in Interurban Scenarios," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 13, pp. 1–27, 2025, doi: 10.3390/app15137454.
- [7] A. Afshari, J. Lee, and D. Besenski, "A Digital Twin Platform for Real-Time Intersection Traffic Monitoring, Performance Evaluation, and Calibration," *Infrastructures*, vol. 10, 2025, doi: 10.3390/infrastructures10080204.
- [8] D. Wu et al., "Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 4, 2025, doi: 10.3390/app15041911.
- [9] C. Gao, L. Jia, M. Sun, and J. Luo, "Current Status and Future Prospects of Digital Twin Technology Applications in Intelligent Transportation Infrastructure Management," *IET Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–22, 2025, doi: 10.1049/itr2.70011.

SUMMARY

From Transport Models to Digital Twins: A Methodological Framework for the Gradual Transformation of Traffic Management Systems

Abstract: The concept of the digital twin has emerged as one of the key directions in the development of Intelligent Transportation Systems (ITS), enabling continuous monitoring of traffic system conditions, real-time data analysis, and support for operational decision-making. At the same time, many cities already possess transport models of varying levels of maturity and, in some cases, advanced traffic management systems, including adaptive traffic control systems and other ITS subsystems. Although existing research extensively addresses digital twin architectures, enabling technologies, and practical applications, there is still a lack of a methodological framework defining the gradual transformation of existing traffic management systems into digital twins.

The aim of this paper is to propose a methodological framework that considers the transport model as the fundamental component of a traffic management system and defines its gradual evolution into a digital twin through the integration of various functional components, i.e., available ITS subsystems. The proposed framework identifies the development stages that precede the establishment of an operational digital twin and establishes a link between traditional transport modeling and the further evolution of digital twins through existing maturity models. In this way, it provides a practical basis for planning the digital transformation of cities with different levels of traffic management system development.

Keywords: transport model; digital twin; intelligent transportation systems; traffic management.