

## ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ КАО ПОДРШКА УПРАВЉАЊУ КАНАЛИЗАЦИОНИМ СИСТЕМИМА

## DIGITAL TWINS AS ASSET MANAGEMENT SUPPORT FOR URBAN DRAINAGE SYSTEMS

МИЛОШ МИЛАШИНОВИЋ<sup>1</sup>, ДАМЈАН ИВЕТИЋ<sup>2</sup>  
АЊА РАНЂЕЛОВИЋ<sup>3</sup>, РОБЕРТ ЉУБИЧИЋ<sup>4</sup>  
ЖЕЉКО ВАСИЛИЋ<sup>5</sup>, ОГЊЕН ГОВЕДАРИЦА<sup>6</sup>  
ВЕЉКО ПРОДАНОВИЋ<sup>7</sup>, ЛУКА ВИНОКИЋ<sup>8</sup>  
ЉИЉАНА БРАЈОВИЋ<sup>9</sup>, МИЛАН ГОЦИЋ<sup>10</sup>

Оригинални научни рад  
DOI: 10.5937/VI25121M

**Резиме:** Ефикасно управљање канализационим системима постаје све сложеније због застареле инфраструктуре, ограничених ресурса и недостатка кадра. Дигитализација пружа могућност да се овај процес унапреди кроз примену дигиталних близанаца – виртуелних реплика система које омогућавају праћење стања, детекцију проблема у

<sup>1</sup> Милош Милашиновић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, mmilasinovic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3296-5224

<sup>2</sup> Дамјан Иветић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, divetic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7475-6108

<sup>3</sup> Ања Ранђеловић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, arandjelovic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0804-8928

<sup>4</sup> Роберт Љубичић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, rljubicic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0218-2843

<sup>5</sup> Жељко Василић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, zvasilic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-9574-4509

<sup>6</sup> Огњен Говедарица, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, ogovedarica@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4995-3932

<sup>7</sup> Вељко Продановић, Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије, Фрушкогорска 1, Нови Сад, veljko.prodanovic@ivi.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3800-0765

<sup>8</sup> Лука Винокић, Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије, Фрушкогорска 1, Нови Сад, luka.vinokic@ivi.ac.rs, ORCID: 0009-0001-1879-430X

<sup>9</sup> Љиљана Брајовић, Грађевински факултет универзитета у Београду, Булевар краља Александра 73, Београд, brajovic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-2265-7308

<sup>10</sup> Милан Гоцић, Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет, Александра Медведева 14, Ниш, milan.gocic@gaf.ni.ac.rs, ORCID: 0000-0001-8398-6570

реалном времену, анализу екстремних сценарија и планирање интервенција. Примена ове технологије као подршке оперативном управљању канализационим системима захтева јасну архитектуру дигиталног близанца. У овом раду представља се концепт оперативног дигиталног близанца заснованог на DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM (DIKW) архитектури која се примењује за креирање виртуелне реплике дела канализационог система Новог Београда, која се спроводи у оквиру пројекта DIGIDRAIN.

**Кључне речи:** дигитализација, DIKW архитектура, DIGIDRAIN

**Abstract:** Efficient management of sewer systems is becoming increasingly challenging due to aging infrastructure, limited resources, and workforce shortages. Digitalization offers an opportunity to improve this process using digital twins - virtual replicas of systems that enable condition monitoring, real-time problem detection, extreme scenario analysis, and intervention planning. Implementing this technology as support for operational management of sewer systems requires a clear digital-twin architecture. This paper presents the concept of an operational digital twin based on the DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM (DIKW) architecture, applied to create a virtual replica of a section of the Novi Beograd sewer system, developed within the DIGIDRAIN project.

**Key Words:** digitalization, DIKW architecture, DIGIDRAIN

## 1. Увод

Канализациони системи представљају један од виталних делова градске инфраструктуре. Управљање оваквим системима постаје све сложеније због унутрашњих фактора као што су застарела инфраструктура, мањак финансија и стручног кадра, а у исто време и због појачаних спољашњих фактора у виду климатских промена које изазивају екстремније сценарије, повећање популације у градовима и непланске урбанизације. Дигитална трансформација, присутна у скоро свим сферама пословања, представља начин за прилазак решавању изазова у управљању канализационим системима. Међу различитим дигиталним технологијама, посебно се издваја потенцијал Дигиталних близанаца (енг. Digital Twins). Дигитални близанци представљају виртуелне реплике стварних система које одликује могућност интеграције података са сензора и континуално ажурирање реплика. Креирање и употреба динамички ажуриране реплике стварног система може помоћи комуналним предузећима да процене тренутно стање система и доносе оперативне одлуке фокусирајући се на уштеду ресурса и информисано планирање [1]. Динамика канализационих система и процеси који се одвијају унутар њих захтевају постављање мреже сензора (нпр. IoT мреже) која омогућава увид у стање система на изабраним локацијама. Са друге стране, изазови у прикупљању података и њиховој обради (аномалије у подацима, недостајући подаци) захтевају употребу мљшинског учења како би се обезбедио континуалан прилив информација из система.

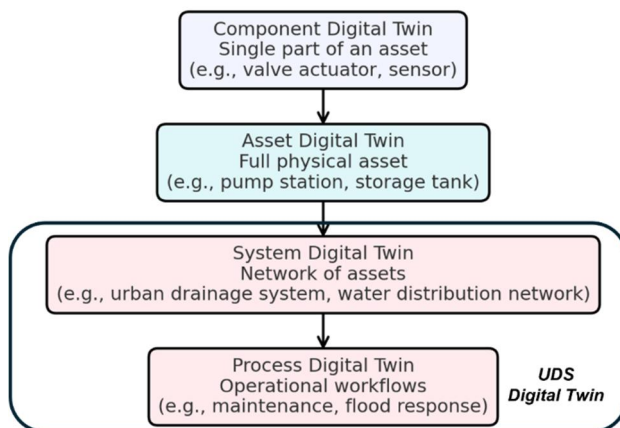
Обрађени подаци се интегришу у симулационе (математичке) моделе којима се добија процена стања целокупног система (изван локација покривених сензорима). Тиме се добија полазна основа за процену ефеката у различитим „шта-ако“ сценаријима, за избор оптималних управљачких процеса као и могућност оптималног планирања поправки и санација у систему [2] – [4].

У овом раду се приказује оквир за креирање интелигентних дигиталних близанаца као подршка управљању градским канализационим системима, са детаљним приказом појединачних корака које је неопходно спровести како би се оваква технологија применила у пракси.

## 2. Материјали и методе

### 2.1. Оквир дигиталних близанаца: DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM pipeline

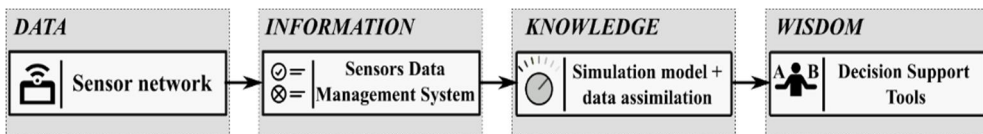
Формирање оперативних дигиталних близанаца за подршку управљању на дневном нивоу зависи од сврхе дигиталног близанца и скале за коју се формира. Начелно, постоји подела дигиталних близанаца [5] на: 1) дигиталне близанце компоненти (енг. component digital twin), 2) дигиталне близанце корисних средстава (eng. asset digital twin), 3) дигиталне близанце система (енг. system digital twin) и 4) дигиталне близанце процеса (енг. process digital twins) (слика 1).



Слика 1. Подела дигиталних близанаца

За дигиталне близанце канализационих система, узимајући у обзир њихову скалу као и сложеност рада, може се рећи да су дигитални близанци система као и процеса, у зависности од нивоа детаљности. Употреба ове технологије за оперативно управљање канализационим системима (детекција цурења воде,

инфилтрације, загушења, илегалних прикључака, оптималног управљања црпним станицама и уставама, предлози плана инспекције и поправки) потребна је јединствена архитектура која омогућава детаљан увид стање система и процесе који се одвијају. У ту сврху, овај рад приказује архитектуру засновану на DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM (DIKW) току информација (слика 2). У наставку је дат детаљнији опис сваке компоненте поменутог архитектуре.



Слика 2. DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM архитектура за дигиталне близанце канализационих система

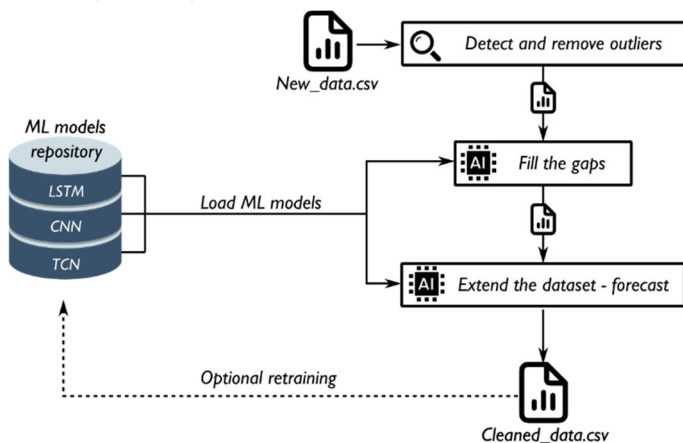
## 2.2. DATA - Сензори као основа дигиталних близанаца

Основу дигиталних близанаца канализационих система чини мрежа сензора за мониторинг хидрауличких величина (дубина воде у шахтовима, црпним станицама, протоци у цевима). Континуалним праћењем ових величина добија се увид у понашање система за различите спољне покретаче (киша и доток употребљене воде). Сензори који се користе за формирање догталних близанаца морају да буду прилагођени праћењу динамике релевантних величина, морају да буду оптимално позиционирани у систему, да мерење буде у реалном времену и да омогуће бежични пренос података до одређеног главног чвора [6]. Такође, због скале система који је потребно пратити и неопходне густине, тј. броја, сензора, битан фактор при одабиру сензора је и цена. Због тога, све чешће су у употреби тзв. приступачна (енг. low-cost) решења [7], [8].

## 2.3. INFORMATION – контрола квалитета података помоћу Веитачке интелигенције

Следећи ниво у DIKW је напредна обрада и употреба података прикупљених података помоћу мреже сензора. Ови подаци често могу бити незадовољавајућег квалитета због непоузданости сензора (неодржавање или физичка оштећења) и због различитих ограничења присутних у хардверској опреми за пренос података. Све то резултира присуством аномалија у подацима (грубе грешке, клизање нуле, „експлозија“ шума) и/или потпуним недостатком података за одређени период (рупе у временским серијама). Такви непоуздани подаци и одсуство података могу угрозити рад дигиталног близанца али и физичког система (нпр. немогућност детекције загушења у мрежи које може довести до изливања воде и плављења). Сложеност динамике канализационог система намеће употребу софистицираних технологија за обраду и даљу

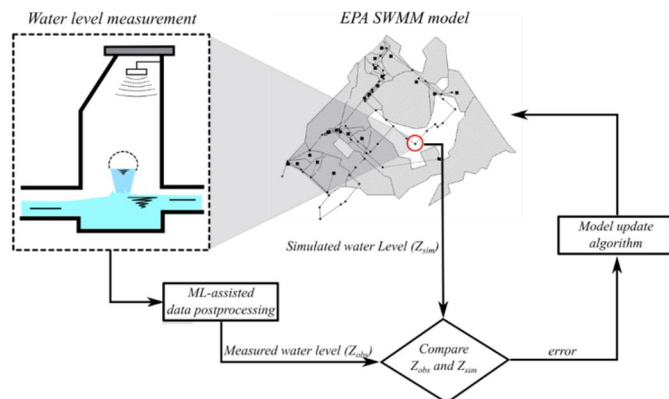
употребу података. DIKW архитектура, предложена у овом раду, трансформише сирове податке са сензора у корисне информације применом техника машинског учења. Концепт детекције аномалија у подацима и реконструкције недостајућих података заснива се на следећим фазама [7]: 1) хармонизацију података са сензора у облик временских серија, 2) креирање и тренирање скупа предиктивних модела машинског учења за процену података у временским серијама, 3) алгоритма за детекцију аномалија у временским серијама базираног на скупу модела машинског учења и 4) алгоритма за реконструкцију недостајућих података (слика 3).



Слика 3. Алгоритам за обраду података заснован на машинском учењу

#### 2.4. KNOWLEDGE – интеграција података са сензора и симулационих модела за детекцију стања система

Мрежа сензора и обрађени подаци, иако представљају основу дигиталног близанца, имају просторно ограничење, тј. могу да детектују промене настале на локацијама на којима су распоређени сензор. Са друге стране, промене у систему, које се детектују на сензору, често су последица неких промена на другим локацијама које нису покривене сензорима. Како би се систем за детекцију промене стања даље унапредио и корисне информације са сензора пресликале у стање целог система, неопходан корак у предложеној архитектури дигиталног близанца је формирање симулационог модела који опоноша физички процес у систему. Интеграцијом обрађених података са сензора у симулациони модел, кроз поступак асимилације података, омогућава детаљан увид у стање и система и може помоћи у тачнијој локализацији промена које настају (пуцање цеви и цурење, загушење итд). Овај рад приказује иновативну методу за асимилацију података засновану на теорији управљања (енг. control theory) која омогућава брзу процену стања у целом систему [8] (слика 4).



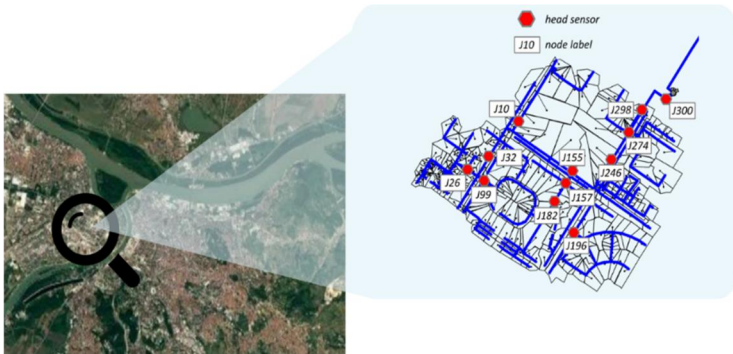
Слика 4. Схематски приказ алгоритма за интеграцију обрађених података са сензора у симулациони модел

### 2.5. WISDOM – интелигентно предлагање корака у одржавању и интервенцијама на систему

Финални корак у предложеној DIKW архитектури представља трансформацију свих података који су се односили на хидрауличке величине (и обрађени кроз DATA, INFORMATION и KNOWLEDGE кораке) у практичне препоруке за инспекцију система и евентуалну приоритизацију поправки. Детектовање стања система уз евентуалну локализацију промена у систему омогућава полазну основу (последње, тренутно стање система) над којом се могу анализирати различити сценарији (нпр. утицај различитих кишних сценарија) који може допринети одлуци шта се прво у систему поправља. Такође, процена стања система омогућава адаптирање контролних правила (за управљање пумпама) и потенцијалну оптимизацију у циљу уштеде потрошње енергије.

### 2.6. DIGIDRAIN – пилот пројекат

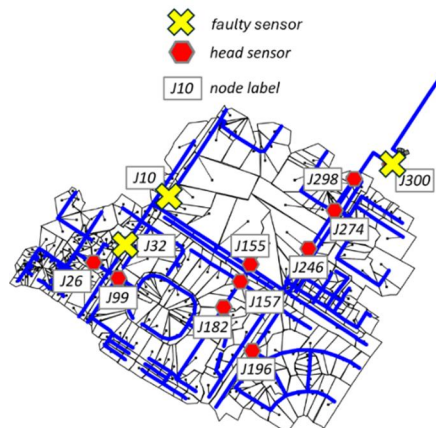
Претходно описана архитектура иза дигиталног близанца за канализационе системе развија се у оквиру пројекта чији је акроним DIGIDRAIN (пун назив: City-scale Digital Twins for Urban Drainage Systems). У оквиру овог пројекта развија се дигитални близанац за део канализационог система Новог Београда (слика 5). Поставља се мрежа сензора дубине у хатовима мреже као и мерило протока на потисном делу система (низводно од црпне станице Блок 13). Циљ пројекта је да на овој демо локацији: 1) испита поузданост приступачних сензора као допунске мреже за мониторинг система, 2) развије напредни систем за управљање подацима који пристижу са сензора применом вештачке интелигенције, 3) развије алгоритам за ефикасну интеграцију података у математички модел и 4) развије алгоритам за детекцију промена у систему и систем за информисање оператера.



Слика 5. Локација дела система атмосферске канализације на Новом Београду за коју се развија дигитални близанац, са макро положајем сензора

### 3. Резултати и дискусија

Како би се демонстрирао потенцијал предложене методологије дигиталног близанца за канализационе системе, приказује се значај алгоритама описаних под INFORMATION и KNOWLEDGE деловима предложене архитектуре. Алгоритам за детекцију аномалија и реконструкцију података са сензора приказан је за хипотетички сценарио у коме долази до квара на 3 од 12 сензора (3 сензора је без података) у временском периоду од 5 дана (слика 6).

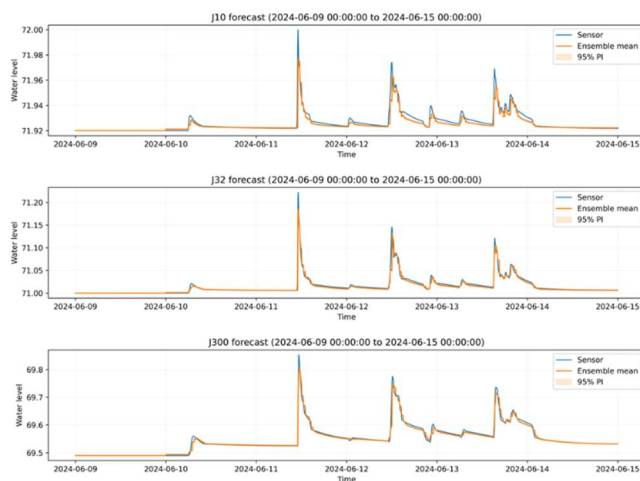


Слика 6. Локација дела система атмосферске канализације на Новом Београду за коју се развија дигитални близанац, са макро положајем сензора

Применом алгорита који се заснива на скупу модела машинског учења могуће је у значајној мери реконструисати недостајуће податке (табела 1, слика 7).

Табела 1. Индикатори квалитета реконструкције података на локацијама покварених сензора

	RMSE	MAE	MAPE	R2
J10_head	0.003	0.001	0.002	0.843
J26_head	0.006	0.001	0.002	0.921
J300_head	0.008	0.004	0.005	0.974



Слика 7. Реконструисане временске серије на локацијама покварених сензора

#### 4. Закључци и будући правци

Концепт вишенаменског дигиталног близанца за канализационе системе и предложена DIKW архитектура, развијена у оквиру пројекта DIGIDRAIN, илуструје како модерне дигиталне технологије могу фундаментално преобликовати начин на који се управља градском инфраструктуром. Праћењем понашања система у реалном времену путем сензора, робусним платформама за управљање подацима, напредним симулационим моделима и алгоритмима за асимилацију података, дигитални близанац постаје динамичан, живи систем, а не статички приказ.

Слојевита архитектура описана у овом раду показује да свака компонента има посебну улогу, а њихова права вредност се појављује када су међусобно повезани. Мрежа сензора оживљава систем, управљање подацима обезбеђује поузданост, модели проширују способност предвиђања, а алгоритми асимилације осигуравају усклађивање са стварношћу. Заједно, они чине основу система подршке одлучивању који претвара сирове податке у стварне увиде.

Предности дигиталних близанаца за оператере канализационих система су: рано откривање аномалија као што су инфилтрација, ексфилтрација или загушења; побољшани краткорочне прогнозе, као и побољшано одређивање приоритета у одржавању система.

Такође, у условима мањка квалификованог радног кадра за послове при управљању канализационим системима, повезивање дигиталних близанаца и агената вештачке интелигенције (eng. AI agents) представља неопходна наредни корак у аутоматизацији рада градских комуналних система.

## 5. Захвалница

Пројекат City-scale Digital Twins for Urban Drainage Systems: bringing „smart“ to water infrastructure (Акроним пројекта: DIGIDRAIN) финансира се од стране Фонда за науку Републике Србије у оквиру Програма подршке сарадњи са српском научном дијаспором – Заједнички истраживачки пројекти (ДИЈАСПОРА 2023), уговор бр. 17823 . Такође, овај пројекат је подржан од стране ЈКП Београдски водовод и канализација.

## 6. Литература

- [1] Милашиновић М, Иветић Д, Рањеловић А, Љубичић Р, Василић Ж, Говедарица О, Продановић В, Винокић Л, Брајовић Љ., Гоцић М, Дигитални близанци: корак напред у дигитализацији водоводних и канализационих система, *Вода и санитарна техника*, Удружење за технологију воде и санитарно инжењерство, 2025.
- [2] Bartos M, Kerkez B, Pipedream: An Interactive Digital Twin Model for Natural and Urban Drainage Systems, *Environmental modelling and software*, 2021.
- [3] Pedersen A. N, Borup M, Brink-Kjær A, Christiansen L, Mikkelsen P. S, Living and Prototyping Digital Twins for Urban Water Systems: Towards Multi-Purpose Value Creation Using Models and Sensors, *Water (Switzerland)* 13(5), 2021.
- [4] Kim Y, Jeil O. and Bartos M, Stormwater Digital Twin with Online Quality Control Detects Urban Flood Hazards under Uncertainty, *Sustainable Cities and Society*, 118., 2025
- [5] Kienzler R, Digital Twins and the Internet of Things: How to throw AI models at vast amount of historic and real-time IoT data, *IBM Developer Article*, 2024.
- [6] Ivetić D, Ljubičić R, Lakičević J, Brajović Lj, Milašinović M, Sensori kao deo digitalnih blizanaca kanalizacionih sistema: specifičnosti mernih metoda i mogućnosti primene pristupačnih rešenja, *LXVIII Konferencija ETRAN*, Čačak, 9-12. jun 2025.
- [7] Vinokić L, Milašinović M, Vasilic Ž, Ivetić D, Stojković M, Prodanović V, Digital Twins of Urban Drainage Systems: ML-assisted algorithm for processing sensor

- data. In: *13th Urban Drainage Modelling Conference - UDM 2025*, Innsbruck, Austria, September 2025.
- [8] Milašinović M, Vasilic Ž, Ivetić D, Digital Twins of Urban Drainage Systems: innovative data assimilation algorithm for continuous state update. In: *13th Urban Drainage Modelling Conference - UDM 2025*, Innsbruck, Austria, September 2025.