

IMPLEMENTACIJA PAMETNIH TEHNOLOGIJA U SUSTAVIMA VODOOPSKRBE: IZAZOVI I MOGUĆNOSTI

ELVIS ŽIC ¹, VANJA TRAVAŠ ¹, GORAN VOLF ¹, IVANA LUČIN ²

¹ Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Hrvatska

² Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Hrvatska

Sažetak

U radu se analizira primjena pametnih tehnologija u suvremenim vodoopskrbnim sustavima s ciljem povećanja njihove učinkovitosti, pouzdanosti i održivosti. Poseban naglasak stavljen je na ulogu automatiziranih mjernih sustava (AMI i AMR), tehnologija Interneta stvari (IoT) i LoRaWAN mreža, digitalnih blizanaca te metoda umjetne inteligencije i prediktivne analitike. Metodologija istraživanja temelji se na analizi znanstvene literature i studija slučaja iz Barcelone, Singapura, Melbournea, Ivanić-Grada i drugih urbanih sredina. U radu se razmatraju mogućnosti daljinskog očitavanja potrošnje i ranog otkrivanja gubitaka vode, te poboljšanja kvalitete usluge korisnicima. Posebna pozornost posvećena je primjeni prediktivnih modela, uključujući LSTM i Prophet, za prognoziranje potrošnje vode i planiranje kapaciteta. Istodobno se ističu ključni izazovi implementacije, poput visokih početnih troškova, nedostatka standardizacije, potrebe za stručnim kadrom i kibernetičke sigurnosti. U radu su analizirane pametne tehnologije koje predstavljaju strateški alat za dugoročni razvoj i otpornost vodoopskrbnih sustava.

Ključne riječi

Pametni vodoopskrbni sustavi, IoT, LoRaWAN tehnologija, AMI/AMR sustavi, digitalni blizanci, umjetna inteligencija, prediktivna analitika.

1 Uvod

Tradicionalni sustavi vodoopskrbe suočavaju se s brojnim izazovima, poput gubitaka vode, zastarjele infrastrukture i niske energetske učinkovitosti (Ward, 2025). Urbanizacija i klimatske promjene dodatno povećavaju pritisak na vodne resurse (Alvisi i sur., 2020). U tom kontekstu razvijaju se pametne tehnologije temeljene na Internetu stvari (engl. *Internet of Things*, IoT), umjetnoj inteligenciji (engl. *Artificial Intelligence*, AI), digitalnim blizancima (engl. *Digital Twins*, DT), prediktivnoj analitici (engl. *Predictive Analytics*, PA) te sustavima AMI (engl. *Advanced Metering Infrastructure*) i AMR (engl. *Automatic Meter Reading*) (Hemdan i sur., 2023). Cilj rada je prikazati mogućnosti, rezultate i izazove njihove primjene. Pametne tehnologije imaju sve važniju ulogu u modernizaciji vodoopskrbe, osobito zbog rastuće potražnje za vodom i potrebe za održivim upravljanjem resursima. Klasične mreže često karakteriziraju nedovoljna transparentnost, složen nadzor, sporo otkrivanje kvarova i visoki troškovi održavanja (Ward, 2025; Di Nardo i sur., 2021). Oslanjanje na periodična očitavanja i reaktivno održavanje povećava gubitke vode i smanjuje pouzdanost opskrbe, osobito u uvjetima klimatskih i urbanizacijskih pritisaka. Posljedica su smanjena prilagodljivost promjenama potrošnje vode i ograničene mogućnosti dugoročnog planiranja. Digitalna transformacija omogućuje prelazak na proaktivni model upravljanja temeljen na kontinuiranom prikupljanju i analizi podataka. Primjenom senzora, sustava daljinskog očitavanja i platformi za obradu podataka, operateri dobivaju uvid u stanje mreže u stvarnom vremenu (Al-Qaisi i sur., 2025; Di Nardo i sur., 2021). Time se omogućuje rano otkrivanje curenja vode, optimizacija tlaka, učinkovitije korištenje energije i pouzdanija prognoza potrošnje vode, uz primjenu strojnog učenja (Hemdan i sur., 2023; Ahmed i sur., 2024). Digitalizacija također doprinosi većoj transparentnosti i povjerenju korisnika.

Primjeri dobre prakse potvrđuju učinkovitost pametnih rješenja. U Europi se ističe Amsterdam, gdje se integrirani sustavi nadzora i analitike koriste za smanjenje gubitaka vode i optimizaciju održavanja (Di Nardo i sur., 2021; Das, 2024). Digitalne platforme povezuju podatke o protoku, tlaku i kvaliteti vode, što omogućuje donošenje odluka u realnom vremenu. Na globalnoj razini, Tokio primjenjuje automatizirane sustave mjerenja i modele predviđanja, čime postiže niske gubitke i visoku pouzdanost opskrbe (Alvisi i sur., 2020; Machnoor i Malagatti, 2024).

Unatoč prednostima, implementacija pametnih tehnologija suočava se s izazovima poput visokih početnih troškova, potrebe za edukacijom kadrova, problema interoperabilnosti te pitanja kibernetičke sigurnosti (Di Nardo i sur., 2021; Alexandra i sur., 2023). Posebno je zahtjevna integracija novih rješenja s postojećom infrastrukturom i osiguravanje stabilnosti kibernetičko-fizičkih sustava (Alexandra i sur., 2023; Khairullah i sur., 2025). Uvođenje pametnih tehnologija zahtijeva i prilagodbu organizacijskih procesa. Stoga uspješna primjena ovisi ne samo o tehničkim inovacijama, već i o strateškom pristupu, institucionalnoj potpori i dugoročnom planiranju razvoja sustava (Ward, 2025; Gacu i sur., 2025).

2 Metode

Rad se temelji na analizi najnovije znanstvene i stručne literature te studija slučaja u gradovima Singapur, Barcelona i Melbourne i Ivanić grada. Studije slučaja odabrane su s ciljem prikazivanja različitih razina digitalizacije i različitih tipova vodoopskrbnih sustava, od velikih globalnih metropola do manjih lokalnih sustava. U fokusu su različiti tipovi tehnologija koje doprinose digitalizaciji vodoopskrbnih sustava (Di Nardo i sur., 2021). AMR sustavi omogućuju jednosmjerno prikupljanje podataka kroz „walk-by“ i „drive-by“ metode, dok AMI uvodi dvosmjernu komunikaciju između brojila i centralnog sustava te kontinuirano očitavanje u stvarnom vremenu (Khairullah i sur., 2025). Time se postiže bolja kontrola potrošnje vode, ranija detekcija anomalija i smanjenje operativnih troškova (Gacu i sur., 2025). IoT i LoRaWAN rješenja (engl. *Long Range Wide Area Network* - komunikacijski protokol namijenjen povezivanju IoT uređaja na velikim udaljenostima uz vrlo nisku potrošnju energije) omogućuju pouzdan prijenos podataka na velikim udaljenostima uz dugotrajan rad senzora i visoku razinu sigurnosti, dok SCADA sustavi i digitalne platforme omogućuju centralizirani nadzor i upravljanje mrežom u stvarnom vremenu (Di Nardo i sur., 2021). Posebno značajna inovacija su digitalni blizanci, „virtualne replike“ stvarnih sustava koje se nadopunjuju podacima iz AMI i IoT mreža, a omogućuju simulaciju i optimizaciju rada (Alexandra i sur., 2023; Machnoor i Malagatti, 2024). U kombinaciji s algoritmima umjetne inteligencije, osobito onima temeljenima na dubokom učenju i analizi vremenskih nizova, digitalni blizanci predstavljaju snažan alat za planiranje održavanja i kriznih scenarija. Metodologija uključuje evaluaciju učinkovitosti kroz smanjenje gubitaka vode, energetska optimizaciju i poboljšanje kvalitete usluge korisnicima (Das, 2024).

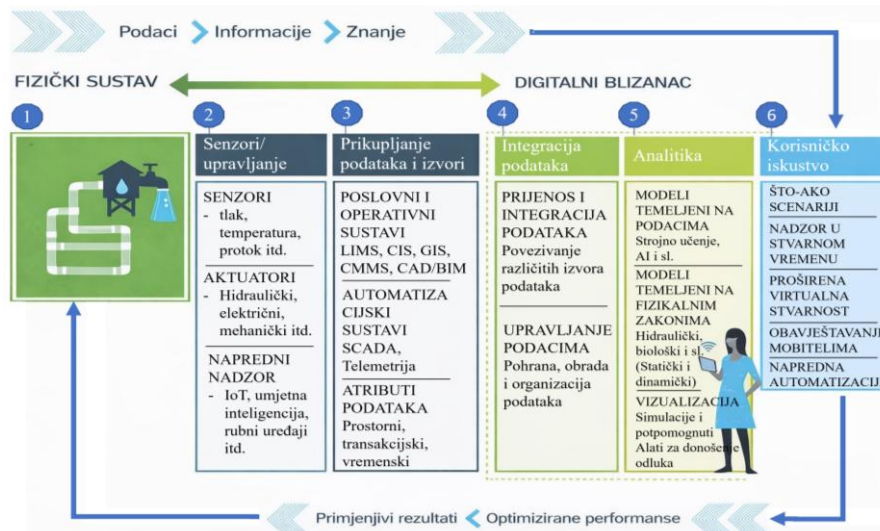
2.1 Automatizirani sustavi mjerenja potrošnje vode (AMI/AMR)

Automatizirani sustavi mjerenja potrošnje vode predstavljaju temeljnu komponentu suvremenih vodoopskrbnih sustava. Posebno se ističu AMI i AMR sustavi, koji omogućuju digitalizaciju očitavanja, kontinuirano praćenje potrošnje vode i učinkovitije upravljanje mrežom, Slika 1. Njihova primjena doprinosi smanjenju operativnih troškova, optimizaciji resursa i povećanju pouzdanosti sustava (Al-Qaisi i sur., 2025). Tradicionalni sustavi očitavanja, temeljeni na ručnom prikupljanju podataka, povezani su s kašnjenjem obrade, povećanim troškovima rada i ograničenom mogućnošću pravovremene reakcije na kvarove. U uvjetima rastuće potražnje za vodom i klimatskih izazova, takav pristup postaje nedostatan (Ward, 2025). Automatizirani sustavi omogućuju prelazak na proaktivni model upravljanja temeljen na kontinuiranim i pouzdanim podacima.

AMR sustavi funkcioniraju na načelu jednosmjerne komunikacije između vodomjera i uređaja za očitavanje. Podaci se prikupljaju metodama „walk-by“ i „drive-by“, bez potrebe za fizičkim pristupom brojilu. Ovakav sustav smanjuje vrijeme očitavanja i povećava točnost u odnosu na ručne metode, te je pogodan za područja bez

razvijene komunikacijske infrastrukture (Di Nardo i sur., 2021). Međutim, ograničen je nemogućnošću daljinskog upravljanja i kontinuiranog praćenja u stvarnom vremenu. Unatoč tome, AMR sustavi često služe kao prijelazno rješenje, osobito u manjim i ruralnim sredinama.

AMI sustavi temelje se na dvosmjernoj komunikaciji između vodomjera i centralnog sustava, čime se omogućuje prijenos podataka, ali i slanje upravljačkih naredbi prema brojilu. Time se postiže visoka razina fleksibilnosti i prilagodljivosti sustava (Al-Qaisi i sur., 2025). Očitavanje se provodi kontinuirano, često na satnoj razini, što omogućuje detaljnu analizu potrošnje vode i rano uočavanje odstupanja, curenja i promjena tlaka (Hemdan i sur., 2023). Dodatna prednost AMI tehnologije jest mogućnost upravljanja tarifnim modelima te primjena varijabilnih cijena ovisno o opterećenju sustava. Integracijom s IoT platformama omogućuje se povezivanje s drugim pametnim uređajima i razvoj inteligentnih vodnih mreža (Das, 2024).



Slika 1. Automatizirani sustavi mjerenja i upravljanja potrošnjom vode.

Primjena AMI i AMR sustava važan je korak prema razvoju pametnih urbanih vodnih mreža. Integracijom s analitičkim platformama omogućuje se obrada velikih količina podataka i primjena strojnog učenja za predviđanje potrošnje vode i optimizaciju rada mreže (Ahmed i sur., 2024; Machnoor i Malagatti, 2024). Napredni modeli omogućuju prepoznavanje obrazaca ponašanja korisnika, prognoziranje vršnih opterećenja i planiranje održavanja, čime se povećava učinkovitost upravljanja resursima (Alvisi i sur., 2020).

U kombinaciji s bežičnim tehnologijama, poput LoRaWAN-a, AMI sustavi omogućuju energetski učinkovitu razmjenu podataka na velikim udaljenostima (Khairullah i sur., 2025). Osim tehničkih prednosti, sustavi doprinose i većoj transparentnosti prema korisnicima, koji dobivaju uvid u vlastitu potrošnju vode. Unatoč prednostima, implementacija AMI i AMR sustava povezana je s tehničkim, organizacijskim i financijskim izazovima. Najvažniji su visoki početni troškovi, potreba za izgradnjom infrastrukture i razvojem informacijskih sustava (Di Nardo i sur., 2021). Također je nužno osposobljavanje stručnog kadra i prilagodba poslovnih procesa. Poseban izazov predstavlja kibernetička sigurnost i zaštita podataka, budući da digitalizacija povećava izloženost sustava potencijalnim napadima (Alexandra i sur., 2023). Upravljanje velikim količinama podataka zahtijeva odgovarajuće analitičke alate i stručna znanja, bez kojih se puni potencijal sustava ne može ostvariti (Gacu i sur., 2025).

2.2 Primjena IoT i LoRaWAN tehnologija u vodoopskrbnim sustavima

Tehnologije Internet stvari (IoT) i LoRaWAN predstavljaju temelj suvremenih sustava za daljinsko očitavanje, nadzor i upravljanje potrošnjom vode. Njihova primjena omogućuje digitalizaciju vodoopskrbne infrastrukture, osobito u prostorno razgranatim sustavima, te povećava učinkovitost i pouzdanost rada (Di

Nardo i sur., 2021; Al-Qaisi i sur., 2025; Ward, 2025). Pregled najvažnijih područja primjene IoT tehnologija u vodoopskrbnim sustavima, pripadajućih koristi te primjera iz prakse prikazan je u Tablici 1.

U okviru IoT sustava senzori ugrađeni u vodomjere omogućuju kontinuirano mjerenje protoka i tlaka, a podaci se putem LoRaWAN mreže prenose do centralnih sustava za obradu i upravljanje (Hemdan i sur., 2023). Ovakav prijenos omogućuje komunikaciju na velikim udaljenostima uz nisku potrošnju energije, što je posebno važno u ruralnim područjima (Khairullah i sur., 2025).

Tablica 1. Primjena IoT-a u vodoopskrbnim sustavima s opisima, koristima i primjerima iz prakse.

IoT primjena	Opis	Dobrobiti	Primjer iz prakse
Pametno mjerenje potrošnje (engl. <i>smart metering</i>)	Vodomjeri šalju podatke o potrošnji u stvarnom vremenu	Precizna naplata, nema ručnih očitavanja, rano otkrivanje neuobičajene potrošnje vode	Rijeka – pilot-projekti pametnih vodomjera
Otkrivanje gubitaka i curenja vode	Senzori tlaka i protoka prepoznaju anomalije u mreži	Smanjenje gubitaka vode, brže lociranje kvarova	Thames Water (UK) – senzori za tlak i protok
Upravljanje crpnim stanicama i rezervoarima	Senzori mjere razinu vode i stanje pumpi	Optimizacija rada, smanjena potrošnja energije	Singapur – automatizirano upravljanje rezervoarima
Praćenje kvalitete vode	Senzori prate pH, klor, zamućenost, vodljivost	Brzo otkrivanje kontaminacije, sigurnija opskrba	EPAL Lisabon – IoT mreža za kvalitetu i tlak
Preventivno održavanje	IoT uređaji prate stanje opreme i predviđaju kvarove	Manje havarija, niži troškovi održavanja	Veolia (Francuska) – prediktivno upravljanje mrežom

LoRaWAN vodomjeri djeluju kao krajnji IoT uređaji koji periodično šalju podatke, najčešće manje od 200 bajtova, prema poslužitelju (Khairullah i sur., 2025). Sustav pouzdano funkcionira i u podzemnim instalacijama do 3 metra dubine (Al-Qaisi i sur., 2025). Sigurnost prijenosa osigurana je AES-128 enkripcijom, dok baterijsko napajanje omogućuje rad do 15 godina, čime se smanjuju troškovi održavanja (Alexandra i sur., 2023). Podaci se često pohranjuju na cloud platformama, poput ThingSpeak, uz mogućnost analize u MATLAB okruženju (Hemdan i sur., 2023). Analiza podataka omogućuje primjenu statističkih, prediktivnih i modela umjetne inteligencije za prognoziranje potrošnje vode i rano otkrivanje anomalija (Ahmed i sur., 2024; Gacu i sur., 2025). Time se smanjuju gubici vode i unapređuje održivo upravljanje resursima.

IoT i LoRaWAN sustavi omogućuju pravodobnu detekciju curenja vode, obrnutog protoka i neuobičajene potrošnje vode te identifikaciju kritičnih dijelova mreže, čime se smanjuje potreba za reaktivnim održavanjem (Ahmed i sur., 2024). Visoka energetska učinkovitost dodatno povećava pouzdanost sustava.

Primjena IoT tehnologija obuhvaća pametno mjerenje, upravljanje crpnim stanicama, praćenje kvalitete vode i preventivno održavanje infrastrukture. Sustavi omogućuju nadzor pH vrijednosti, klora, zamućenosti i vodljivosti te brzo reagiranje u slučaju onečišćenja (Hemdan i sur., 2023). Prediktivna analitika smanjuje rizik od havarija i produljuje vijek trajanja sustava (Machnoor i Malagatti, 2024; Gacu i sur., 2025).

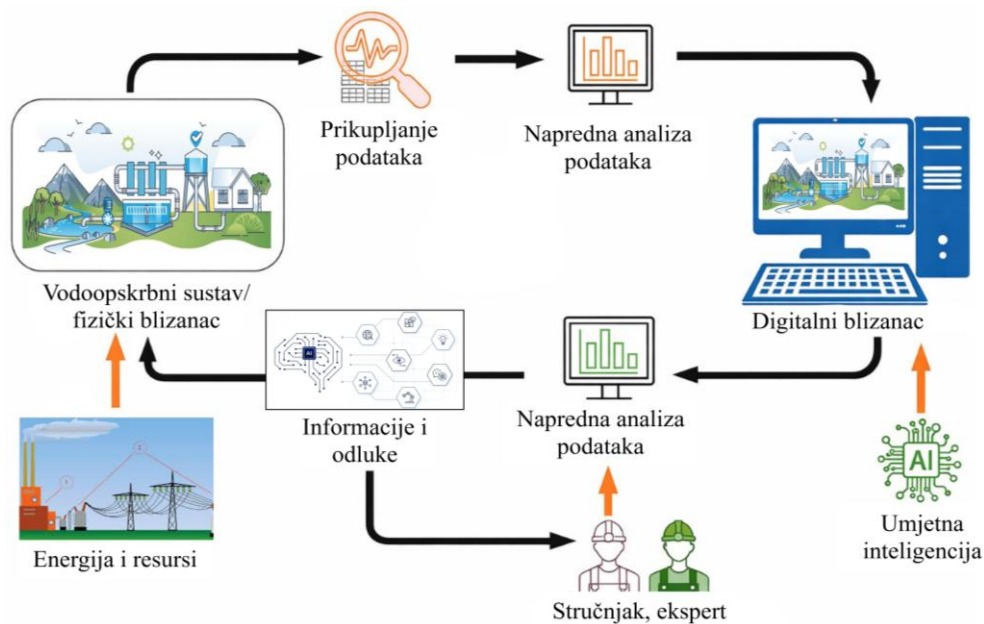
LoRaWAN tehnologija postaje ključni element digitalne transformacije vodoopskrbe u Europi jer omogućuje pouzdanu komunikaciju i kontinuirani nadzor mreže (Khairullah i sur., 2025). Digitalizacija omogućuje prelazak na proaktivni model upravljanja temeljen na stvarnim podacima (Ward, 2025). Značajan primjer primjene provodi se u Zagrebu, gdje je planirana ugradnja oko 240.000 vodomjera povezanih LoRaWAN mrežom, uz ulaganje od približno 40 milijuna eura. Projekt omogućuje automatski obračun, detekciju curenja i analizu potrošnje vode te povećava učinkovitost sustava (Perković i sur., 2023).

Pilot-projekt u Gradišci uključuje ultrazvučne vodomjere QALCOSONIC W1 s očitanjem svakih sat vremena, koji omogućuju pouzdanu identifikaciju gubitaka i nepravilnosti (Hemdan i sur., 2023). Projekti tvrtke Veolia integriraju vodomjere, senzore tlaka i sustave za praćenje kvalitete vode, čime se postiže optimizacija distribucije (Al-Qaisi i sur., 2025; Ahmed i sur., 2024). U Lisabonu je primjenom IoT senzora postignuto smanjenje gubitaka za više od 20 %, dok Thames Water koristi tisuće senzora za nadzor protoka i tlaka. Singapur primjenjuje integrirane sustave za praćenje kvalitete vode i upravljanje rezervoarima (Das, 2024; Di Nardo i sur., 2021).

Iskustva iz navedenih primjera potvrđuju da kontinuirano prikupljanje podataka omogućuje razvoj prediktivnih modela i učinkovitije održavanje mreže. Integracija LoRaWAN infrastrukture s digitalnim platformama omogućuje razvoj kibernetičko-fizičkih sustava i donošenje odluka temeljenih na stvarnim podacima (Alexandra i sur., 2023; Ward, 2025). Uspješna implementacija zahtijeva razvijenu komunikacijsku infrastrukturu, institucionalnu potporu i dugoročnu strategiju digitalizacije. Iako su početna ulaganja značajna, dugoročne koristi u pogledu smanjenja gubitaka, optimizacije troškova i povećanja kvalitete usluge potvrđuju opravdanost primjene LoRaWAN i IoT tehnologija u razvoju pametnih i održivih vodoopskrbnih sustava.

2.3 Digitalni blizanci

Digitalni blizanci (engl. *Digital Twins*) predstavljaju virtualne replike fizičkih sustava koje se kontinuirano ažuriraju podacima prikupljenima putem senzora, IoT uređaja i AMI sustava. U vodovodnim mrežama omogućuju simulaciju, analizu i optimizaciju rada sustava, uključujući predviđanje kvarova, upravljanje potrošnjom vode i planiranje održavanja infrastrukture (Al-Qaisi i sur., 2025), Slika 2. Njihova integracija s naprednim mjernim sustavima omogućuje razvoj kibernetičko-fizičkih sustava koji povezuju fizičku infrastrukturu s digitalnim okruženjem (Alexandra i sur., 2023).



Slika 2. Primjena digitalnih blizanaca u vodoopskrbnim sustavima.

AMI sustavi omogućuju kontinuirano prikupljanje podataka o potrošnji, tlaku i temperaturi, čime se osigurava visoka razina informiranosti o stanju mreže. Podaci se obrađuju algoritmima umjetne inteligencije radi prepoznavanja obrazaca, detekcije anomalija i optimizacije upravljanja. Takav pristup omogućuje pravodobno donošenje odluka i smanjenje gubitaka vode, što je ključno za održivo upravljanje resursima (Ward, 2025). Za predviđanje potrošnje vode primjenjuju se modeli temeljeni na vremenskim nizovima, među kojima se ističu LSTM (engl. *Long Short-Term Memory*) neuronske mreže i Prophet modeli, Tablica 2.

LSTM koristi memorijske ćelije za očuvanje dugoročnih ovisnosti te omogućuje prepoznavanje dnevnih, tjednih i sezonskih obrazaca i nelinearnih odnosa u podacima (Kühnert i sur., 2021; Gil-Gamboa i sur., 2024). Njegova učinkovitost potvrđena je usporedbama s tradicionalnim statističkim modelima. Prophet je statistički model koji razlaže vremenski niz na trend, sezonalnost i posebne događaje, a odlikuje se jednostavnom primjenom i robusnošću na nedostatke u podacima (Zunić i sur., 2020). U analizi potrošnje vode pokazuje visoku pouzdanost, osobito pri izraženim sezonskim obrascima (Das, 2024).

Tablica 2. Pregledna tablica usporedbe LSTM i Prophet modela u kontekstu predviđanja potrošnje vode.

Značajka	LSTM	Prophet
Vrsta modela	Neuronska mreža (rekurentna, dubinsko učenje)	Statistički model vremenskih nizova (dekompozicija na trend + sezonalnost + događaji)
Način rada	Uči obrasce iz sekvenci podataka pomoću “memorijskih ćelija” i mehanizama vrata koji pamte ili zaboravljaju informacije	Dijeli vremenski niz na osnovne komponente i predviđa buduće vrijednosti koristeći sezonske i trendovske obrasce
Jače strane	Modelira složene, nelinearne odnose; sposoban za dugačke sekvence i detaljne obrasce	Jednostavan za korištenje, brzo treniranje, dobro radi s nedostatnim ili neredovitim podacima; interpretabilni rezultati
Slabije strane	Zahtijeva puno podataka i računalnih resursa; rezultati teže interpretabilni	Ne hvata složene nelinearne odnose; slabiji u predviđanju ako obrasci u podacima nisu jasno sezonski ili trendovski
Primjena u predviđanju potrošnje vode	Detaljna predviđanja koja uključuju složene obrasce (npr. utjecaj vremena, industrijskih procesa ili neuobič. događaja)	Brza i pouzdana procjena dnevne/mjesečne potrošnje vode, osobito kada su izraženi sezonski obrasci (npr. ljetna potrošnja vode, praznici i sl.)
Tipični korisnici	Analitički znanstvenici, modelari, istraživači, projekti gdje je preciznost prioritetna	Operativne službe, komunalna poduzeća i analitičari koji trebaju brzo i razumljivo predviđanje

Usporedbe dvaju pristupa pokazuju da LSTM preciznije prati kratkoročne oscilacije i složene promjene, dok Prophet omogućuje stabilnija predviđanja pogodna za strateško planiranje. Stoga se često primjenjuje njihova kombinacija, pri čemu Prophet uklanja sezonalne komponente, a LSTM modelira nelinearne odnose (Ahmed i sur., 2024; Machnoor i Malagatti, 2024). Integracijom digitalnih blizanaca, AMI sustava i metoda umjetne inteligencije omogućuje se razvoj pametnih vodnih mreža temeljenih na kontinuiranom praćenju, prediktivnoj analizi i automatiziranom upravljanju. Takvi sustavi doprinose smanjenju troškova, povećanju pouzdanosti opskrbe i racionalnijem korištenju vodnih resursa (Di Nardo i sur., 2021; Ward, 2025).

2.4 Umjetna inteligencija i prediktivna analitika

Umjetna inteligencija i prediktivna analitika postaju ključni alati u suvremenim vodoopskrbnim sustavima jer omogućuju prijelaz s reaktivnog na proaktivan i podatkovno utemeljen način upravljanja infrastrukturom. Integracijom senzorskih mreža, mjernih sustava i informacijskih platformi prikupljaju se podaci o protoku, tlaku, potrošnji i kvaliteti vode, koji čine osnovu za primjenu algoritama strojnog i dubokog učenja (Di Nardo i sur., 2021). Time se omogućuje kontinuirani nadzor mreže i pravodobno prepoznavanje problema. Jedna od najvažnijih primjena umjetne inteligencije odnosi se na predviđanje kvarova i detekciju curenja vode. Analizom visokofrekventnih podataka identificiraju se odstupanja od uobičajenih obrazaca rada koja upućuju na oštećenja cjevovoda ili neispravnost opreme (Das, 2024; Rousso i sur., 2023). Istraživanja pokazuju da modeli temeljeni na ansambl metodama i gradientnom pojačavanju postižu točnost veću od 90 %, dok optimizacijski algoritmi omogućuju smanjenje gubitaka vode za 18-22 % i potrošnje energije za oko 15 % (Obianuju Ojadi i sur., 2025).

Prediktivna analitika važna je i za optimizaciju rada pumpnih sustava i spremnika. LSTM neuronske mreže omogućuju precizno kratkoročno i srednjoročno predviđanje potrošnje vode te učinkovitije planiranje rada pumpi (Kühnert i sur., 2021). Simulacije na sustavima za oko 100.000 stanovnika pokazale su smanjenje odstupanja razine spremnika i povećanje energetske učinkovitosti.

U predviđanju potrošnje vode koriste se i statistički modeli poput Propheta, koji razlažu vremenske nizove na trend i sezonalnost te omogućuju stabilna srednjoročna predviđanja (Hemdan i sur., 2023). U praksi se često primjenjuju hibridni modeli radi veće točnosti i bolje interpretabilnosti. Algoritmi umjetne inteligencije primjenjuju se i u sustavima ranog upozoravanja te potpore odlučivanju, pri čemu se integriraju podaci o kvaliteti vode, hidrološkim uvjetima i potrošnji vode (Gacu i sur., 2025). Razvoj kibernetičko-fizičkih sustava omogućuje automatizirano upravljanje infrastrukturom kroz zatvorenu petlju nadzora i kontrole (Alexandra i sur., 2023), ali otvara i pitanja kibernetičke sigurnosti i transparentnosti algoritama (Marchese i sur., 2019). Unatoč prednostima, primjena umjetne inteligencije suočava se s izazovima poput nedostatka kvalitetnih podataka, ograničene interpretabilnosti modela i visokih troškova implementacije (Machnoor i Malagatti, 2024). Prijenos rješenja u operativnu praksu zahtijeva institucionalnu prilagodbu i dodatnu edukaciju kadrova.

3 Rezultati i rasprave studija slučaja

Digitalna transformacija vodoopskrbnih sustava temelji se na integraciji automatiziranih mjernih sustava, Interneta stvari (IoT), tehnologije LoRaWAN, digitalnih blizanaca i metoda umjetne inteligencije, čime se omogućuje učinkovitije upravljanje infrastrukturom i vodnim resursima (Di Nardo i sur., 2021; Al-Qaisi i sur., 2025). Time se ostvaruje prijelaz s reaktivnog na podatkovno utemeljeno, proaktivno upravljanje. Automatizirani sustavi mjerenja, uključujući AMI i AMR, omogućuju prikupljanje visokorezolucijskih podataka o potrošnji vode, tlaku i protoku te povećavaju transparentnost i operativnu učinkovitost sustava (Andrić i sur., 2022). U Ivanić-Gradu primjena AMI sustava, regulacijskih ventila i frekventne regulacije crpnih stanica smanjila je gubitke vode s 19 % na 15 %, uz istodobno smanjenje kvarova i potrošnje energije. Primjenom metodologije IWA (engl. *International Water Association*) izračunan je pokazatelj ILI, čime su identificirane kritične točke mreže i potvrđena ekonomska opravdanost ulaganja.

IoT tehnologija i LoRaWAN mreže dodatno unapređuju mjerni sustav omogućujući energetska učinkovitost, skalabilnost i vijek baterije do 15 godina (Khairullah i sur., 2025). U Singapuru su LoRaWAN vodomjeri povezani s cloud platformama omogućili daljinsko očitavanje, automatski obračun i brzu detekciju kvarova, uz niske infrastrukturne troškove (Das, 2024). Slični sustavi primijenjeni su i u Kini i Južnoj Africi (Khairullah i sur., 2025).

Digitalni blizanci predstavljaju višu razinu digitalne integracije jer omogućuju simulaciju rada mreže, analizu scenarija i optimizaciju održavanja. U Melbourneu se koriste za planiranje intervencija i optimizaciju rada pumpnih stanica, čime se ostvaruju energetske uštede i smanjuju gubici vode (Ahmed i sur., 2024; Gacu i sur., 2025). U Španjolskoj je sustav CAUCCES primjenom LSTM i Prophet modela postigao srednju apsolutnu pogrešku MAE = 5,76 i srednju apsolutnu postotnu pogrešku MAPE = 18,61 %, uz smanjenje kašnjenja održavanja za 25 % i emisije CO₂ za 17 % (Ramos i sur., 2022). Pokazatelji MAE i MAPE omogućuju objektivnu procjenu učinkovitosti modela i kvalitetnije planiranje kapaciteta.

Na urbanoj razini, primjena pametnih tehnologija vidljiva je u Barceloni, gdje je SCADA sustav na platformi AVEVA omogućio centralizirano upravljanje i smanjenje potrošnje vode. U Singapuru i Melbourneu integracija IoT tehnologije, digitalnih blizanaca i umjetne inteligencije dodatno je povećala učinkovitost sustava i smanjila operativne troškove.

Umjetna inteligencija i prediktivna analitika čine završni sloj digitalnog ekosustava vodoopskrbe. Analizom podataka iz AMI i IoT sustava primjenjuju se modeli strojnog i dubokog učenja za predviđanje potrošnje vode, optimizaciju rada pumpi i razvoj sustava ranog upozoravanja (Gacu i sur., 2025). Primjena AI tehnologije

omogućuje učinkovitiju detekciju gubitaka, optimizaciju kapaciteta i smanjenje emisija CO₂ kroz racionalnije upravljanje energijom (Ahmed i sur., 2024). Međutim, implementacija pametnih tehnologija suočava se s izazovima poput visokih početnih troškova, nedostatka standardizacije, potrebe za stručnim kadrom i povećanih kibernetičkih rizika. Stoga je nužna primjena sigurnosnih standarda, poput ISO 27001 i enkripcije AES-128, radi osiguranja pouzdanosti sustava.

3.1 Izazovi implementacija pametnih tehnologija

Unatoč dokazanim prednostima pametnih tehnologija u povećanju učinkovitosti, otpornosti i održivosti vodoopskrbnih sustava, njihova implementacija suočava se s financijskim, tehničkim, organizacijskim i sigurnosnim izazovima koji značajno utječu na uspješnost digitalne transformacije (Di Nardo i sur., 2021; Ward, 2025). Financijski izazovi predstavljaju jednu od glavnih prepreka primjeni pametnih sustava. Uvođenje AMI sustava, IoT senzora, digitalnih blizanaca i analitičkih platformi zahtijeva visoka početna ulaganja u opremu, infrastrukturu i edukaciju osoblja. Povrat ulaganja najčešće se ostvaruje srednjoročno ili dugoročno kroz smanjenje gubitaka vode, potrošnje energije i operativnih troškova. U nekim gradovima primjenom umjetne inteligencije i IoT tehnologija ostvareno je smanjenje gubitaka većih od 30 %, no isplativost ovisi o početnom stanju sustava i učinkovitosti upravljanja. Stoga su troškovno-korisničke analize nužan temelj investicijskih odluka (Das, 2024).

Tehnički izazovi ponajprije se odnose na nedostatak standardizacije i interoperabilnosti sustava. Različiti proizvođači, komunikacijski protokoli i podatkovni formati otežavaju integraciju u jedinstvenu upravljačku platformu (Khairullah i sur., 2025). Neujednačeni kriteriji gustoće senzora i metodologije izvještavanja otežavaju usporedbu projekata i prijenos dobrih praksi (Rouso i sur., 2023). Dodatni problem predstavlja nestabilnost i nepotpunost podataka, koja može smanjiti pouzdanost analitičkih modela (Hemdan i sur., 2023). Organizacijski i kadrovski izazovi uključuju nedostatak interdisciplinarnih znanja iz područja hidrotehnike, informatike, analitike podataka i kibernetičke sigurnosti. Mnoga komunalna poduzeća nemaju dovoljno stručnog kadra za upravljanje složenim digitalnim sustavima (Machnoor i Malagatti, 2024). Prijenos inovacija u operativnu praksu često je ograničen institucionalnom nesprijetnošću i nedostatkom kontinuirane edukacije (Ahmed i sur., 2024). Tradicionalni obrasci upravljanja i niska uključenost zaposlenika dodatno usporavaju prihvaćanje inovacija (Ward, 2025). Stoga su programi stručnog usavršavanja i interdisciplinarnе suradnje ključni za dugoročnu održivost. Sigurnosni izazovi postaju sve izraženiji s porastom digitalizacije. Povezivanje IoT uređaja, cloud platformi i automatiziranih sustava povećava izloženost kibernetičkim prijetnjama, uključujući neovlašteni pristup i manipulaciju podacima (Alexandra i sur., 2023). Povijesni primjeri, poput napada na sustav Maroochy u Australiji, potvrđuju ozbiljnost tih rizika (Marchese i sur., 2019). Osim toga, podaci o potrošnji vode mogu ugroziti privatnost korisnika. Stoga je nužna primjena sigurnosnih standarda, enkripcije i višerazinske kontrole pristupa. Navedeni izazovi međusobno su povezani te zahtijevaju integrirani pristup. Financijska ograničenja utječu na izbor tehnologije, tehnička rješenja na složenost upravljanja, dok organizacijska spremnost i sigurnosna kultura određuju dugoročnu održivost sustava. Istraživanja pokazuju da su najuspješniji projekti oni koji povezuju tehnološke inovacije s institucionalnom reformom i dugoročnim planiranjem (Ward, 2025; Di Nardo i sur., 2021). Iako pametne tehnologije imaju velik potencijal za unapređenje vodoopskrbnih sustava, njihova uspješna implementacija zahtijeva sustavno rješavanje financijskih, tehničkih, organizacijskih i sigurnosnih izazova. Digitalna transformacija moguća je samo uz istodobni razvoj tehnologije, jačanje institucionalnih kapaciteta i osiguravanje visokih standarda sigurnosti i transparentnosti.

Veličina vodoopskrbnog sustava značajno utječe na izbor tehnologije zbog razlika u opsegu infrastrukture, financijskim resursima i složenosti upravljanja mrežom. U velikim urbanim sustavima često se primjenjuju integrirani digitalni sustavi koji uključuju IoT senzore, digitalne blizance, analitičke modele i umjetnu inteligenciju, čime se omogućuje centralizirano upravljanje, optimizacija rada pumpnih stanica i prediktivno održavanje infrastrukture. U manjim sustavima implementacija je obično postupna i usmjerena na ključne

funkcije, poput uvođenja AMR ili AMI sustava za daljinsko očitavanje potrošnje, regulacije tlaka i osnovnih sustava nadzora, što omogućuje smanjenje operativnih troškova i gubitaka vode uz niža početna ulaganja.

4 Zaključak

Primjena pametnih tehnologija u vodoopskrbnim sustavima omogućuje prijelaz s tradicionalnog, reaktivnog upravljanja na proaktivni model temeljen na kontinuiranom prikupljanju i analizi podataka. Integracija automatiziranih mjernih sustava, IoT tehnologije, digitalnih blizanaca i umjetne inteligencije omogućuje pravodobno otkrivanje gubitaka vode, optimizaciju rada infrastrukture i poboljšanje energetske učinkovitosti sustava. Analizirani primjeri potvrđuju da takav pristup može rezultirati značajnim smanjenjem operativnih troškova, poboljšanjem pouzdanosti opskrbe i učinkovitijim upravljanjem vodnim resursima. Primjeri iz međunarodne prakse i hrvatskih gradova potvrđuju mjerljive operativne i ekonomske koristi takvog pristupa. Rezultati analize pokazuju da se najveći učinci u upravljanju vodoopskrbnim sustavima postižu integracijom različitih digitalnih tehnologija u jedinstveni sustav upravljanja. Automatizirani mjerni sustavi (AMI/AMR) i IoT senzorske mreže pritom predstavljaju temelj digitalizacije jer omogućuju kontinuirano prikupljanje podataka o potrošnji vode, tlaku i protoku. Na temelju tih podataka primjenjuju se napredni analitički modeli i algoritmi umjetne inteligencije koji omogućuju visoku točnost u predviđanju potrošnje, optimizaciju rada mreže, planiranje kapaciteta te smanjenje energetskih troškova. Posebno se ističu modeli dubokog učenja za prepoznavanje složenih obrazaca potrošnje, dok digitalni blizanci omogućuju simulaciju različitih scenarija rada i povećavaju operativnu sigurnost sustava. Unatoč velikom potencijalu, implementacija pametnih tehnologija suočena je s izazovima poput visokih početnih troškova, problema interoperabilnosti, nedostatka stručnog kadra i kibernetičkih rizika, zbog čega je nužan sustavan pristup koji uključuje strateško planiranje, edukaciju zaposlenika i razvoj sigurnosnih mehanizama.

Analiza pokazuje da tehnološke inovacije nisu dovoljne bez organizacijskih reformi, transparentnog upravljanja i stabilnih financijskih modela. Uspješna primjena zahtijeva faznu implementaciju, javno-privatna partnerstva i razvoj nacionalnih strategija digitalizacije. Pametne tehnologije predstavljaju strateški alat za osiguravanje dugoročne održivosti, sigurnosti i kvalitete vodoopskrbe. Njihova sustavna primjena omogućuje racionalno korištenje vodnih resursa, smanjenje gubitaka i energetske optimizaciju, stvarajući temelj za razvoj otpornih sustava u uvjetima klimatskih promjena i rastuće potražnje za vodom.

Autori su svjesni da izravna usporedba sustava različite veličine može biti ograničena. Stoga cilj analize nije bio uspoređivati apsolutne performanse sustava, već identificirati zajedničke tehnološke pristupe i trendove digitalizacije vodoopskrbnih mreža. Studije slučaja koristile su se prvenstveno kao ilustrativni primjeri implementacije pojedinih tehnologija, a ne kao izravno usporedive metrike učinkovitosti. Analiza je usmjerena na prikaz načina na koji različite tehnologije doprinose smanjenju gubitaka vode, optimizaciji rada infrastrukture i poboljšanju upravljanja sustavom.

Zahvale

Istraživanje je rezultat rada u okviru UNIRI Institucionalnog istraživačkog projekta „Izazovi upravljanja vodnim resursima u vrijeme klimatskih promjena s obzirom na proizvodnju pitke vode“ (uniri-iz-25-18) odobrenog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i mladih (financira Europska unija-NextGenerationEU).

Literatura

Ahmed, A.A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S., Oyedele, L. (2024) Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 441, 140715, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140715>.

- Alexandra, C., Daniell, K.A., Guillaume, J., Saraswat, C., Feldman, H.R. (2023) Cyber-physical systems in water management and governance, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 62, 2023, 101290, ISSN 1877-3435, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101290>.
- Al-Qaisi, A.Z., Ogl, R.A., Ali, Z.H. (2025). Smart Water Systems: The Role of Technology and Engineering in Optimizing Urban Water Resources. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 10. 833-846. 10.52783/jisem.v10i21s.3445.
- Alvisi, S., Franchini, M. and Marinelli, A. (2020) A short-term, pattern-based model for water demand forecasting, *Water Research*, 170, 115288.
- Andrić, I., Vrsalović, A., Perković, T., Aglič Čuvčić, M. and Šolić, P. (2022). IoT approach towards smart water usage. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132792. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132792>.
- Das, R. (2024). Smart urban water management: integrating AI and IoT for optimization and waste reduction. *Optimality*, 1(2), 309-317.
- Di Nardo, A., Boccelli, D.L., Herrera, M., Creaco, E., Cominola, A., Sitzenfrei, R., Taormina, R. (2021) Smart Urban Water Networks: Solutions, Trends and Challenges. *Water*, Vol.13, 501. <https://doi.org/10.3390/w13040501>
- Gacu, J.G., Monjardin, C.E.F., Mangulabnan, R.G.T., Pugat, G.C.E., Solmerin, J.G. (2025) Artificial Intelligence (AI) in Surface Water Management: A Comprehensive Review of Methods, Applications, and Challenges. *Water*, Vol. 17, 1707. <https://doi.org/10.3390/w17111707>
- Gil-Gamboa, A., Paneque, P., Trull, O., Troncoso, A. (2024) Medium-term water consumption forecasting based on deep neural networks, *Expert Systems With Applications*, 247, 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123234>
- Hemdan, E.ED., Essa, Y.M., Shouman, M. et al. (2023) An efficient IoT based smart water quality monitoring system. *Multimed Tools Appl* 82, 28827-851. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14504-z>
- Khairullah, E.F., Alghamdi, A.M., Al Mojamed, M.M., Zeadally, S. (2025) LoRaWAN-based smart water management IoT applications: a review, *Journal of Information and Telecommunication*, 9:3, 420-446, DOI: 10.1080/24751839.2025.2458889
- Kühnert, C., Gonuguntla, N.M., Krieg, H., Nowak, D., Thomas, J.A. (2021) Application of LSTM Networks for Water Demand Prediction in Optimal Pump Control. *Water*, 13, 644, 1-19. <https://doi.org/10.3390/w13050644>
- Machnoor, A.V.A. and Malagatti, M. (2024). Machine Learning in Water Management. Science and Technology - Recent Updates and Future Prospects, Vol. 1, BP International, 59-75. <https://doi.org/10.9734/bpi/strufp/v1/97>
- Marchese, D.P.E., Jin, A., Fox-Lent, C., Linkov, I. (2020) Resilience for Smart Water Systems. *J. Water Resour. Plann. Manage*, 146(1), 1-7, 02519002
- Obianuju O.J., Owulade, O.A., Somtochukwu O.C., Onukwulu, E.C. (2025) AI-Driven Optimization of Water Usage and Waste Management in Smart Cities for Environmental Sustainability. *Engineering and Technology Journal*, Vol 10(3), 4284-4306, e-ISSN: 2456-3358, doi:10.47191/etj/v10i03.36
- Perković, T., Dujčić Rodić, L., Šabić, J. and Šolić, P. (2023). Machine Learning Approach towards LoRaWAN Indoor Localization. *Electronics*, 12(2), 457. <https://doi.org/10.3390/electronics12020457>.
- Ramos, H.M., Morani, M.C., Carravetta, A., Fecarrotta, O., Adeyeye, K., López-Jiménez, P.A. and Pérez-Sánchez, M. (2022). New challenges towards smart systems' efficiency by digital twin in water distribution networks. *Water*, 14(1304), 1304-1321. <https://doi.org/10.3390/w14201304>.
- Rouso, B.Z., Lambert, M., Gong, J. (2023). Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic sensors in real water distribution systems, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 410, 29 pages, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137193>.
- Ward, F.A. (2025) Addressing Global Water Challenges in 2025: an Integrated Framework for Research, Policy, and Resource Management. *Water Resour Manage*. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04341-0>