



Veleučilište u Virovitici

EKONOMIJA, TURIZAM, TELEKOMUNIKACIJE I RAČUNARSTVO



ET²eR

Vol. VIII, br. 1,
2026.



Virovitica University of Applied Sciences

ECONOMICS, TOURISM, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTER SCIENCE



ET²eR

Vol. VIII, No. 1,
2026.

Impressum

Nakladnik/Publisher:

Veleučilište u Virovitici - Virovitica University of Applied Sciences

Glavni urednik/Editor in chief:

nas.izv.prof.dr.sc. Dejan Tubić, prof.struč.stud,
glavni urednik

Izvršni urednik/Executive Editor:

dr.sc. Željka Kadlec, prof.struč.stud.

Lektura/Linguistic Adviser:

Ivana Vidak Teskera, dipl.bibl. i prof.

Tehnički urednik/Technical Editor:

Siniša Kovačević, mag.ing.tech.inf., pred.

Adresa uredništva/Address of the Editorial Board:

Veleučilište u Virovitici
Matije Gupca 78, 33000 Virovitica
Tel: +385 33 721 099
Fax: +385 33 721 037
E-mail: urednik@vuv.hr

Naslovnica/Front Page:

Veleučilište u Virovitici/Virovitica University of Applied Science

Grafičko oblikovanje/Graphic Design:

Veleučilište u Virovitici/Virovitica University of Applied Science

Izlazi od/Since:

2019. godina/Year 2019.

Učestalost izlaženja časopisa/Publishing frequency:

Dva puta godišnje/Biannually

ISSN 2670-8930

DOI: <https://doi.org/10.70077/et2er>

Prava korištenja: časopis „ET²eR – ekonomija, turizam, telekomunikacije i računarstvo” je časopis u otvorenom pristupu. Sadržaj časopisa u cijelosti je besplatno dostupan. Korisnici smiju kopirati i distribuirati materijal te mijenjati, preoblikovati ili prerađivati materijal sve dok citiraju izvornik na odgovarajući način.



Ovaj časopis je licenciran pod [Creative Commons Imenovanje 4.0 međunarodna licencom](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Otvoreni pristup: Časopis ET²eR je časopis sa otvorenim pristupom, što znači da je sav sadržaj besplatno dostupan bez naknade i nema naknada za obradu članka (APC). Pojedinačnim korisnicima je dopušteno čitati, preuzimati, kopirati, distribuirati, ispisivati, pretraživati ili povezivati pune tekstove članka ili ih koristiti u bilo koju drugu zakonitu svrhu, bez prethodnog traženja dopuštenja od izdavača ili autora. To je u skladu s BOAI definicijom otvorenog pristupa.



Dijamantni časopis / Diamond Journal - Časopis je usklađen s kriterijima baze [Diamond Discovery Hub](https://www.diamondhub.org/)



Časopis je uvršten u **ERIH PLUS** (European reference index for the humanities and social sciences) bazu, čime je postao časopis koji se kategorizira u znanstvene radove druge skupine (a2).

Uredništvo/Editorial Board:

nas.izv.prof.dr.sc. Dejan Tubić, prof.struč.stud., glavni urednik, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

dr.sc. Željka Kadlec, prof.struč.stud., izvršna urednica, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

Siniša Kovačević, mag.ing.tech.inf., pred., tehnički urednik, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

dr.sc. Irena Bosnić, prof.struč.stud., članica, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

dr.sc. Anita Prelas Kovačević, prof.struč.stud., članica, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

dr.sc. Zrinka Blažević Bognar, prof.struč.stud., članica, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

dr.sc. Mladena Bedeković, prof.struč.stud., članica, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

dr.sc. Damir Ribić, prof.struč.stud., član, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

Ivan Heđi, dipl.ing., v.pred., član, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

Ivana Vidak Teskera, dipl.bibl. i prof., v.pred., članica, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

dr.sc. Rikard Bakan, v.pred., član, *Veleučilište u Virovitici, Virovitica, Hrvatska*

prof.dr.sc. Mato Bartoluci, član, *Ekonomski fakultet Zagreb, Zagreb, Hrvatska*

prof.dr.sc. Oliver Kesar, član, *Ekonomski fakultet Zagreb, Zagreb, Hrvatska*

prof.dr.sc. Željko Požega, član, *Ekonomski Fakultet u Osijeku, Osijek, Hrvatska*

doc.dr.sc. Saša Petar, prof.struč.stud., član, *Sveučilište Sjever, Koprivnica, Hrvatska*

dr.sc. Vlado Halusek, prof.struč.stud., član, *Osnovna škola Kloštar Podravski, Kloštar Podravski, Hrvatska*

dr.sc. Igor Petrović, prof.struč.stud., član, *Parpar d.o.o., Bjelovar, Hrvatska*

dr.sc. Sanela Vrkljan, v. pred., član, *Visoka škola Aspira, Zagreb, Hrvatska*

izv.prof.dr.sc. Đorđije Vasiljević, član, *Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Department of Geography, Tourism and Hotel Management*

prof.dr.sc. Viktória Szente, član, *Hungarian University of Agriculture and Life Sciences (MATE) Kaposvár Campus, Institute of Agriculture and Food Economics, Kaposvár, Mađarska*

dr.sc. Joanna Pioch, član, *Faculty of Economics and Finance, Sopot University of Applied Sciences, Sopot, Poljska*

prof.dr.sc. Slagjana Stojanovska, član, *Skopje, Makedonija*

izv.prof.dr.sc. Ante Rončević, član, *Sveučilište Sjever, Hrvatska*

izv.prof.dr.sc. Petar Mišević, član, *Sveučilište Sjever, Hrvatska*

ET²eR

Predgovor

//

Časopis „ET²eR – ekonomija, turizam, telekomunikacije i računarstvo“ obuhvaća teme iz područja ekonomije, s posebnim naglaskom na poduzetništvo i menadžment, turizma, kao i teme iz domene informacijskih i komunikacijskih tehnologija te računalnog programiranja. Časopis se bavi i onim temama koje su povezane s problematikom interdisciplinarnog pristupa gore navedenih područja.

Časopis „ET²eR“ namijenjen je svima koji žele dati doprinos poticanju i razvijanju primijenjene stručne djelatnosti. Svrha časopisa je upoznavanje šire javnosti s novostima iz navedenih područja i popularizacija struke. Stoga ohrabrujem sve potencijalne autore da prijave svoje radove za objavljivanje.

Zahvaljujem se svim autorima, recenzentima, uredništvu časopisa na znanju i trudu uloženom na kreiranje ovog broja časopisa „ET²eR – ekonomija, turizam, telekomunikacije i računarstvo“.

//

Glavni urednik

nas.izv.prof.dr.sc. Dejan Tubić, prof. struč. stud.

ET²eR

Recenzenti - *Reviewers*

Marta Alić

Tehničko veleučilište u Zagrebu - *Zagreb University of Applied Sciences*

Božidar Jaković

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Marijana Špoljarić

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Vlado Halusek

Sveučilište Sjever – *University North*

Mladena Bedeković

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Dubravka Maras

Sveučilište Vrn - *Vrn University*

Siniša Kovačević

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Damir Vuk

Veleučilište u Virovitici (umirovljeni profesor) - *Virovitica University of Applied Sciences*

Ivana Vidak Teskera

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Rikard Bakan

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Dejan Tubić

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Nikolina Pleša Puljić

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Zrinka Blažević Bognar

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Damir Ribić

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Irena Bosnić

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Marko Hajba

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Kristijan Čović

Veleučilište Baltazar Zaprešić - *Baltazar Zaprešić Polytechnic*

Anita Prelas Kovačević

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Danijela Vakanjac

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Ivan Heđi

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Matko Zrnić

Veleučilište u Virovitici - *Virovitica University of Applied Sciences*

Sendi Deželić

Veleučilište Baltazar Zaprešić- *Baltazar Zaprešić Polytechnic*

Sadržaj

1. Točka promjene kao alternativa točki maksimalnog odstupanja umjerenju kognitivnog konflikta
A Change Point as an Alternative to the Maximum Deviation in Measuring Cognitive Conflict
Marko Maliković 1
2. Uloga kružne ekonomije u oblikovanju krizne otpornosti poduzeća u Hrvatskoj
The Role of the Circular Economy in Shaping Corporate Crisis Resilience in Croatia
Kadlec Željka 9
3. Upravljanje emocijama u visokoškolskom obrazovanju iz perspektive nastavnika i studenata
Emotion management in higher education from the perspective of teachers and students
Ivana Lacković, Katarina Dadić 20
4. Digitalna transformacija i diversifikacija usluga računovodstvenih servisa u Republici Hrvatskoj
Digital transformation and diversification of accounting services in the Republic of Croatia
Antal Balog, Ivana Dasović 27
5. Fiskalni izazovi digitalnih nomada u kontekstu međunarodne mobilnosti rada i turizma
Fiscal challenges of digital nomads in the context of international labor mobility and tourism
Bedeković Mladena 39
6. Implementacija regenerativnih praksi i transformacije destinacija u međunarodnom turizmu
Implementacija regenerativnih praksi i transformacije destinacija u međunarodnom turizmu
Jasmina Gržinić, Gaia Bogolin, Alessandro Manzin 47
7. Stres, izgaranje, stresori i samoprocjena kompetencija samopomoći učitelja osnovnih škola u gradu Virovitica
"Stress, burnout, stressors, and self-assessment of self-help competencies among primary school teachers in the Town of Virovitica"
Martina Blažević, Marijana Špoljarić, Jasenka Kolarić Barač 57

8. Utjecaj digitalne transformacije na poslovanje hotelskih opskrbnih lanaca: iskustvo jadranske regije 63
The impact of digital transformation on hotel supply chain operations: the experience of the Adriatic region
Luka Samaržija
9. Utjecaj digitalizacije poslovnih procesa na kontrolu troškova i učinkovitost građevinskih projekata – studija slučajeve 73
The Impact of Business Process Digitalization on Cost Control and the Efficiency of Construction Projects – A Multiple Case Study
Petra Musić
10. Tehnostres i zadovoljstvo poslom u bankarskom sektoru Technostress and job satisfaction in the banking sector 82
Amina Osmanhodžić, Amela Bešlagić
11. Sustav automatskog navodnjavanja temeljen na prediktivnom upravljanju modelom s IoT arhitekturom 88
Automatic Irrigation System Based on Model Predictive Control and IoT Architecture
Luka Kićinbaći
12. Automatizirano izvještavanje o aktualnim kibernetičkim prijetnjama Latest cyber threats events automated reporting workflow 96
Enes Ciriković, Ivan Benke, Danijel Koprivanac, Matko Zrnić
13. Programska implementacija 2AFC eksperimenta u PsychoPy okruženju uz praćenje pokreta miša 104
Programmatic Implementation of a 2AFC Experiment in PsychoPy with Mouse Tracking
Marko Maliković



Sustav automatskog navodnjavanja temeljen na prediktivnom upravljanju modelom s IoT arhitekturom

Automatic Irrigation System Based on Model Predictive Control and IoT Architecture

Luka Kićinbaći¹

¹FUA Robotics, luka.fua2@gmail.com

Sažetak

Ovaj rad prikazuje preliminarnu implementaciju sustava automatskog navodnjavanja koji kombinira prediktivno upravljanje modelom (engl. Model Predictive Control -- MPC) s IoT arhitekturom temeljenom na protokolima ROS 2, micro-ROS i ESP-NOW. Centralna upravljačka jedinica je Raspberry Pi na kojemu se izvršava MPC algoritam koji minimizira deficit vlage u korijenovoj zoni tla uz istovremenu optimizaciju potrošnje vode. Sustav integrira stvarnu vremensku prognozu putem yr.no API-ja kao ulaznu veličinu poremećaja u MPC formulaciji, čime se proaktivno izbjegava nepotrebno zalijevanje pred nadolazećim kišnim razdobljima. Distribucija upravljanja na terenu ostvarena je trima ESP32-S3 mikrokontrolerima: prvi premošćuje micro-ROS i ESP-NOW domenu, drugi upravlja raspodjelom vode i navodnjavanjem, a treći čini lokalnu meteorološku stanicu koja mjeri temperaturu, vlažnost, tlak, brzinu vjetra i stvarne oborine za korekciju prognoznih ulaza MPC-a. Fizička infrastruktura obuhvaća dva spremnika za vodu, jedan za prikupljanje oborinskih voda uz kuću i drugi radni spremnik u vrtu, te pumpu i ventilski razvod. Rad opisuje arhitekturu sustava, MPC formulaciju prilagođenu raspoloživim sensorima, komunikacijski model te plan validacije koji je u tijeku. Predložena arhitektura temelji se na relevantnoj literaturi iz područja MPC navodnjavanja. Na temelju usporedivih studija iz literature s petodnevnom prognoznom horizontom očekuje se potencijalna ušteda vode od 15–25 % u usporedbi s reaktivnim algoritmima temeljenim na pragovima vlage; kvantitativni rezultati iz ovog sustava još nisu dostupni jer je sustav u fazi hardverske integracije, a terenski eksperiment planira se u vegetacijskom periodu 2026.

Ključne riječi

MPC, navodnjavanje, IoT, ROS 2, micro-ROS, ESP-NOW, yr.no, mjerna stanica

Abstract

This paper presents a preliminary implementation of an automatic irrigation system that combines Model Predictive Control (MPC) with a distributed IoT architecture. The architecture is based on the ROS 2 and micro-ROS frameworks, with ESP-NOW for short-range wireless communication. The central control unit is a Raspberry Pi executing an MPC algorithm that minimises root-zone soil moisture deficit (RZSMD) while optimising water consumption. Real-time weather forecasts from the yr.no API serve as disturbance inputs, enabling the system to proactively avoid unnecessary irrigation before incoming rainfall. Field-level control is distributed across three ESP32-S3 microcontrollers: a bridge node connecting micro-ROS and ESP-NOW domains, an irrigation controller, and a local weather station measuring temperature, humidity, pressure, wind speed, and actual precipitation to correct forecast-based MPC disturbance

inputs. The physical setup comprises two water tanks, a rainwater harvesting tank at the house and a working tank in the field, with a pump and valve network. The paper describes the system architecture, MPC formulation, communication model, and the ongoing validation plan. The system is currently in the hardware integration phase; quantitative field results are not yet available. Based on comparable studies from the literature, a potential water saving of 15–25 % compared to threshold-based reactive algorithms is expected for a five-day forecast horizon.

Keywords

MPC, irrigation, IoT, ROS 2, micro-ROS, ESP-NOW, yr.no, weather station

Uvod

Navodnjavanje čini gotovo 70 % ukupne svjetske potrošnje slatke vode [1]. Procjenjuje se da će do 2050. potražnja za vodom u poljoprivredi rasti za dodatnih 50 % zbog klimatskih promjena i rasta populacije, dok će istovremeno raspoloživi vodni resursi biti sve više pod pritiskom [1]. Precizno upravljanje rasporedom i količinom navodnjavanja stoga je kritično i s agronomskog i s ekološkog stajališta: prekomjerno zalijevanje izaziva gravitacijske tokove, ispiranje hranjivih tvari te ekonomske gubitke [2], dok nedovoljno zalijevanje smanjuje prinos i kvalitetu usjeva [2,3].

Tradicionalni sustavi navodnjavanja temelje se na fiksnim vremenskim rasporedima, a noviji reaktivni IoT sustavi --- poput Kuhara [4] s Arduino mikrokontrolerima ili Gavrana i sur. [5] s ESP32-S3 platformom i mobilnom aplikacijom --- aktiviraju zalijevanje isključivo prema pragovima vlage tla [6]. Zajednički nedostatak je izostanak vremenske prognoze: bez predviđanja nadolazećih oborina, takvi sustavi mogu aktivirati navodnjavanje neposredno prije kišnog razdoblja, uzrokujući gravitacijske tokove i ispiranje hraniva.

Delgoda i sur. [6] formuliraju MPC okvir koji eksplicitno minimizira deficit vlage u korijenovoj zoni (engl. Root Zone Soil Moisture Deficit -- RZSMD) uz ograničenja raspoloživosti vode i nesigurnosti vremenskih prognoza. Predlažu dvije varijante: metodu ekvivalencije sigurnosti (CE) koja koristi determinističku prognozu i metodu poremećajne afinitetne povratne sprege (DA) koja uzima u obzir raspon nesigurnosti prognoze. Jamal i sur. [1] nadograđuju taj pristup integracijom asimilacije terenskih podataka (Particle Filter) i interakcijom operatera s modelom u okviru nazvanom RTIST (engl. Real-Time Irrigation Scheduling Tool), validiranom na kukuruznim poljima u Nebraski. Bwambale i sur. [7] u terenskom eksperimentu pokazuju da MPC ostvaruje 29 % uštedu vode i prinos 20 t/ha; Bwambale i sur. [8] nadograđuju taj okvir lokalnim meteorološkim mjerenjima kao ulazom u MPC, a Shang i sur. [9] predlažu robusni MPC koji Gaussovima procesima uči nesigurnost parametara tla iz mjerenja.

U ovom radu opisujemo preliminarnu implementaciju sustava koji implementira MPC na rubu mreže (engl. edge computing) koristeći Raspberry Pi kao centralnu mikroprocesorsku jedinicu unutar ROS 2 ekosustava. Koordinacija ponašanja implementirana je uz pomoć stabla ponašanja (engl. Behaviour Tree -- BT) koje reaktivno koordinira MPC odluke putem ROS 2 akcija i servisa. Upravljanje na terenu distribuirano je na tri ESP32-S3 mikrokontrolera --- Protočnu, Radnu i Mjernu jedinicu --- koji međusobno komuniciraju putem micro-ROS i ESP-NOW protokola. Mjerna jedinica ujedno čini lokalnu meteorološku stanicu za korekciju prognoznih ulaza MPC-a. Sustav također integrira prikupljanje

oborinskih voda i troslojno upravljanje: punjenjem, pohranom i pražnjenjem vode.

2. TEORIJSKI OKVIR

2.1. Model balansa vode u korijenovoj zoni

Temeljni model balansa vode u korijenovoj zoni opisan je linearnom jednadžbom u diskretnom vremenu s vremenskim korakom od jednog dana [6]:

$$D^* = D + E^* - P^* - I^* \quad (1)$$

gdje je D^* RZSMD (mm) u sljedećem vremenskom koraku, D trenutni RZSMD (mm), E^* efektivna evapotranspiracija (mm/dan), P^* efektivne oborine (mm/dan), a I^* efektivna količina navodnjavanja (mm/dan). RZSMD (hrv. deficit vlage u korijenovoj zoni) mjeri koliko mm vode nedostaje da bi tlo dostiglo kapacitet polja (FC) – stanje pri kojemu su pore tla optimalno napunjene i biljci je voda dostupna bez stresa. Pri $D = 0$ tlo je na FC; pri $D > 0$ postoji deficit koji uzrokuje sušni stres; pri $D < 0$ tlo je prezasićeno i pojavljuju se gravitacijski tokovi koji ispiraju hranjiva.

U obliku modela prostora stanja:

$$x^* = Ax + Bu + \omega, \quad A = 1, B = -1, \omega = E^* - P^* \quad (2)$$

Linearnost modela omogućuje primjenu standardnih QP (engl. Quadratic Programming) solvera u MPC optimizaciji.

2.2. MPC formulacija i ograničenja

Ciljna funkcija minimizira zbroj kvadratnih odstupanja RZSMD od nule i kvadratnog iznosa navodnjavanja kroz upravljački horizont od N dana [6]:

$$J = \min \sum (1/2 \cdot Q \cdot x^2_k + 1/2 \cdot R \cdot u^2_k), \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

gdje Q i R označavaju težine za RZSMD i potrošnju vode. Omjer Q/R regulira kompromis: visok omjer znači agresivno minimiziranje deficita, nizak omjer daje prednost uštedi vode.

Ograničenja sustava uključuju ograničenja stanja i ulaza: stanje x ograničeno je na raspon $[x_{\min}, x_{\max}]$, ulaz $u \in [0, u_{\max}]$, gdje x_{\max} odgovara točki venuća (WP, najveći dopustivi deficit vlage), x_{\min} kapacitetu polja (FC = 0), a u_{\max} maksimalnoj dnevnoj količini navodnjavanja koja je dinamički ograničena raspoloživošću vode u spremniku.

2.3. Uloga vremenske prognoze

Prognoza oborina i evapotranspiracije kao vektor poremećaja ω ključna je za proaktivno upravljanje. Delgoda i sur. [6] razlikuju CE pristup koji koristi determinističku prognozu i DA pristup koji uzima u obzir raspon nesigurnosti prognoze. Jamal i sur. [1] pokazuju da integracija probabilističkih NWP (engl. Numerical Weather Prediction) prognoza s

petodnevnim do sedmodnevnim horizontom daje veće prednosti nego jednodnevne prognoze.

Yr.no API pruža satne prognoze za zadanu geografsku lokaciju na temelju nordijskog NWP modela s horizontom do 9 dana [10]. Podaci uključuju oborine (mm/h), temperaturu (°C), vlažnost zraka i brzinu vjetera te druge faktore. Referentna evapotranspiracija ET_0 procjenjuje se metodom Hargreaves-Samani [6] iz prognoziranih T_{min} i T_{max} bez potrebe za mjerenjem sunčevog zračenja.

Jedino MPC pristupi integriraju vremensku prognozu, dok reaktivni sustavi nemaju prediktivnu sposobnost (Tablica 1).

TABLICA 1: JEDINO MPC PRISTUPI UKLJUČUJU VREMENSKU PROGNOZU; REAKTIVNI SUSTAVI TEMELJENI NA PRAGOVIMA VLAGE NEMAJU PREDIKTIVNU SPOSOBNOST

Sustav	Algoritam	Prognoza	Platforma
Kuhar (2021)	Prag + RTC	Ne	Arduino
Gavran i sur. (2023)	Prag	Ne	ESP32
Delgoda i sur. (2016)	MPC (CE/DA)	Da	MATLAB
Jamal i sur. (2023)	MPC + DA	Da	PC
Ovaj rad	MPC (CE)	Da	RPi+ROS 2

Izvor: autor

2.4. Stabla ponašanja kao upravljačka struktura

Stabla ponašanja (engl. Behaviour Trees -- BT) hijerarhijska su formalna metoda za reaktivno i modularno opisivanje ponašanja automata stanja [11]. Stablo se izvršava periodičkim pomacima iz roditeljskih čvorova prema potomcima; svaki čvor vraća jedan od tri statusa: Success, Failure ili Running. Upravljački čvorovi Sekvencija (→) i Alternativa (?) uvjetuju napredak pomicanja po stablu logičkim AND, odnosno OR kombinacijom rezultata potomaka. Roditeljski Akcijski čvorovi izvršavaju operacije, a Uvjetni čvorovi provjeravaju uvjete bez bočnih efekata.

Za razliku od konačnih automata, BT-ovi su reaktivni (svaki pomak po stablu iznova evaluira cijelo stablo bez eksplicitnih prijelaza) te modularni jer dodavanje novih ponašanja ne mijenja postojeće čvorove. U ROS 2 ekosustavu BT-ovi su standardna koordinacijska paradigma (Nav2, MoveIt 2); biblioteka BehaviorTree.CPP [12] pruža XML definiciju stabla i izvođenje s izvornom podrškom za asinkrone ROS 2 akcije.

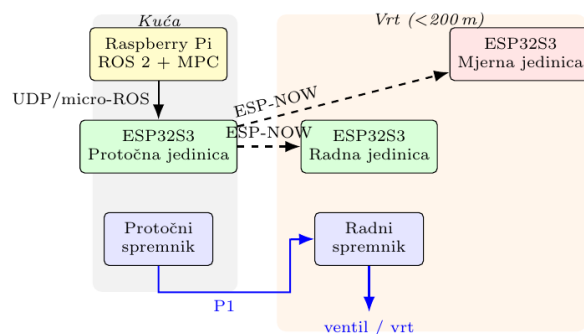
3. ARHITEKTURA SUSTAVA

3.1. Fizička infrastruktura upravljanja vodom

Sustav obuhvaća dva vodena spremnika i odgovarajuću infrastrukturu (Sl. 1). Protočni spremnik (IBC 1000 L) smješten je uz kuću i opremljen olukom za prikupljanje oborinskih voda te senzorom razine koji prati stanje punjenja, elektro ventilom i pumpom P1. Radni spremnik (IBC 1000 L) u vrtu (~50 m od kuće) primarni je izvor za navodnjavanje te je opremljen senzorom razine i elektro ventilom.

Pri padalinama pumpa P1, kojom upravlja Protočna mikrokontrolerska jedinica, tlači oborinsku vodu iz Protočnog u Radni spremnik. Kada je Radni spremnik pun, Protočna jedinica zatvara ventil na pumpi P1 i Protočni spremnik se puni kišnicom. Ako su potrebe veće, fizička veličina spremnika prilagođava se zahtjevima, jednostavnom promjenom logike upravljanja te dodavanjem spremnika, senzora i aktuatora.

SLIKA 1. FIZIČKA INFRASTRUKTURA I KOMUNIKACIJSKI MODEL SUSTAVA



Izvor: autor

3.2. Hardverske komponente

Sustav se temelji na dostupnom ugradbenom hardveru standardnih komponenti (Tablica 2).

TABLICA 2: HARDVERSKE KOMPONENTE SUSTAVA

Komponenta	Uloga	Kol.
<i>Upravljačke jedinice</i>		
Raspberry Pi 5	Centralna MPC jedinica; ROS 2 Jazzy, yr.no klijent, BT orkestracija	1
ESP32-S3 DevKit	Terenska mikrokontrolerska čvorišta; micro-ROS, ESP-NOW	3
<i>Senzori – mjerna jedinica</i>		
BME280	T, RH, tlak (I ² C); ulaz za ET_0	1

	korekciju	
BME680	T, RH, tlak, VOC; fuzija s BME280	1
SHT40	T, RH visoke točnosti ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ / $\pm 1,5\%$); fuzija s BME	1
SparkFun SEN-15901	Anemometar, vjetrulja, kišomjer (0,2794 mm/puls)	1
VEML6075	UV-A/B indeks, solarno zračenje (l^2C)	1
<i>Senzori – radna jedinica</i>		
MaxBotix MB7389	Razina vode u spremniku; IP67, UART, 30–500 cm	2
Meter TEROS 10	Volumetrijska vlažnost tla; SDI-12, IP68	2
<i>Aktuatori – protočna jedinica</i>		
ECO-WORTHY 12V 96W	Potopna pumpa P1; max 30 m, IP68, 8 A	1
U.S. Solid 3/4" NC	Elektromagnetski ventil 12V DC, normalno zatvoren	3
<i>Napajanje – radna jedinica</i>		
Solarni panel 100W	Monokristalni 12V; ~450 Wh/dan (HR)	1
LiFePO4 12V 30Ah	Baterija; 2000+ ciklusa, ugrađeni BMS	1
Victron MPPT 75/15	Solarni regulator punjenja; LiFePO4 profil, Bluetooth	1
Pololu D24V50F5	DC-DC pretvarač 12V→5V, 5A, $\eta \approx 95\%$	1

Izvor: autor

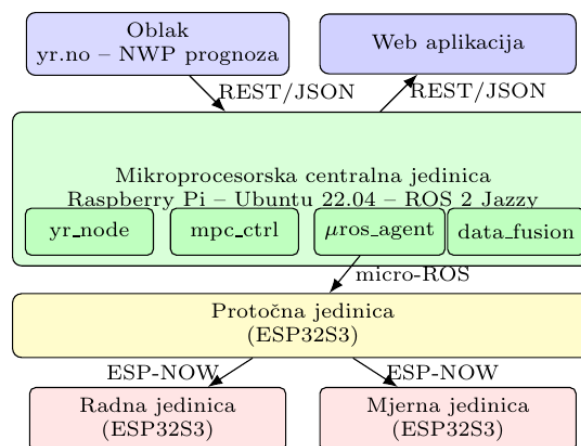
3.3. Softverska arhitektura

Softverski stog organiziran je u četiri ROS 2 čvora na Raspberry Pi koji komuniciraju s terenskim ESP32-S3 mikrokontrolerima (Sl. 2). Raspberry Pi izvršava ROS 2 Jazzy distribuciju [13] s četiri ROS 2 čvora: (1) *yr_node* koji periodički preuzima prognoze s *yr.no* API-ja i objavljuje ih na topiku */weather_forecast*, (2) *mpc_controller* koji rješava optimizacijski problem i objavljuje komandu navodnjavanja na topiku */irrigation_command*, (3) *micro_ros_agent* koji pruža most između ROS 2 DDS sloja i micro-ROS klijenata [14], te (4) *data_fusion_node* koji fuzira podatke lokalne meteorološke stanice s topika */local_weather* s *yr.no* prognozom radi korekcije vektora poremećaja ω u MPC-u.

Komunikacija koristi tri ROS 2 mehanizma. Topici prenose kontinuirane tokove senzorskih i prognoznih podataka (*/soil_moisture*, */tank_levels*, */local_weather*,

/weather_forecast). Akcije (*goal/feedback/result*) pokrivaju dugotrajne operacije čiji se napredak prati u stvarnom vremenu: */fill_tank2* (punjenje Radnog spremnika pumpom P1) i */irrigate* (isporuka u_0^* mm vode) --- svaka vraća povratnu informaciju o razini punjenja ili isporučenoj količini vode. Servisi pokrivaju atomarne upite: */get_status*, */set_mpc_params*, */compute_mpc* i */emergency_stop*.

SLIKA 2. SOFTVERSKA ARHITEKTURA: ROS 2 ČVORovi I KOMUNIKACIJSKI SLOJEVI



Izvor: autor

Protočna jedinica je WiFi-povezana s kućnom mrežom i komunicira s Raspberry Pi putem micro-ROS-over-UDP. Ujedno je komunikacijski most s dva ESP-NOW para: Radna jedinica (upravljanje vodom) i Mjerna jedinica (meteorološka stanica), oba smještena u vrtu na ~50 m udaljenosti [15]. ESP-NOW je Espressifov protokol za direktnu peer-to-peer komunikaciju na 2,4 GHz bez WiFi infrastrukture, s latencijom ispod 2 ms, dometom do 200 m na otvorenom prostoru te podrškom za višestruke parove i potvrdu primitka.

4. IMPLEMENTACIJA

4.1. MPC čvor na Raspberry Pi

MPC čvor implementiran je kao ROS 2 rclpy čvor koji se pokreće svakodnevno u 7:00h lokalnog vremena u sljedećim koracima:

1. Pretplata na topik */weather_forecast* i primanje petodnevnih prognoza (oborine i temperatura) s *yr.no*.
2. Primanje podataka s topika */local_weather* (Mjerna jedinica): stvarne oborine, temperatura, relativna vlažnost, tlak, vjetar i osvjetljenost za korekciju *yr.no* prognoze.

3. Primanje mjerenja vlage tla s topika /soil_moisture na dvije dubine (2 × Meter TEROS 10), VWC (engl. Volumetric Water Content).
4. Procjena tekućeg RZSMD D iz volumetrijske vlage tla i parametara tla (FC, WP (engl. Wilting Point), dubina korijenja).
5. Procjena referentne evapotranspiracije (ET_0) po Penman-Monteith uz lokalne podatke ili Hargreaves-Samani kada lokalna mjerenja nisu dostupna.
6. Rješavanje QP problema (3) s ograničenjima (4) koristeći `scipy.optimize.minimize`.
7. Objavljivanje optimalne komande u_0^* na topiku /irrigation_command; akcijski čvor stabla ponašanja Irrigate čita tu vrijednost i pokreće akciju /irrigate s ciljem isporuke u_0^* mm vode.

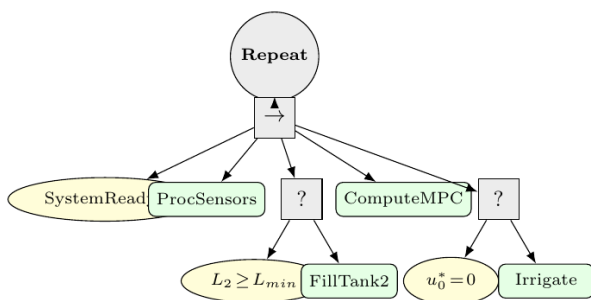
Ograničenje u_{max} dinamički se skalira s izmjerenom razinom vode u Radnom spremniku kako bi se spriječilo njegovo pražnjenje: $u_{max} = k \cdot L_2$, gdje je L_2 izmjereni postotak punjenja i k konstantan koeficijent.

4.2. Koordinacijski sloj stabla ponašanja

Koordinacija dnevnog ciklusa navodnjavanja implementirana je kao BT koji se pokreće u 7:00h (Sl. 3). Upravljački čvorovi Sekvencija (\rightarrow) grupira podređene čvorove po AND logici – cijela grana mora uspjeti; Alternativa (?) djeluje po OR logici – uspijeva prvim uspješnim djetetom. Akcijski čvorovi mapiraju se na ROS 2 akcije i servise te vraćaju Running dok operacija traje; Uvjetni čvorovi provjeravaju uvjete bez bočnih efekata --- čitanjem topika ili pozivom servisa samo za čitanje (Tablica 3).

Provjera i punjenje Radnog spremnika (FillTank2) izvodi se unutar BT-a prije pokretanja MPC optimizacije kako bi se izbjegao rubni slučaj u kojemu je $L_2 \approx 0$, što bi uzrokovalo $u_{max} \approx 0$, a time i $u_0^* = 0$ neovisno o deficitu vlage tla.

SLIKA 3. KOORDINACIJSKI SLOJ STABLA PONAŠANJA



Izvor: autor

TABLICA 3: MAPIRANJE ČVOROVA STABLA PONAŠANJA NA ROS 2 SUČELJA

BT čvor	Tip	ROS 2 sučelje
SystemReady?	Uvjet	Servis /get_status (samo za čitanje)
ProcSenzore	Akcija	Topici /soil_moisture, /local_weather
$L_2 \geq L_{min}$	Uvjet	Topik /tank_levels
FillTank2	Akcija	Akcija /fill_tank2
ComputeMPC	Akcija	Servis /compute_mpc
$u_0^* = 0$	Uvjet	Topik /irrigation_command
Irrigate	Akcija	Akcija /irrigate

Izvor: autor

Čvor Alternativa NavodnjavajAkoTrebapreskače navodnjavanje ako je $u_0^* = 0$ --- što nastupa pri prognoziranom oborinama ili nultom deficitu vlage. U suprotnom, čvor Alternativa OsigurajVodu puni Radni spremnik akcijom /fill_tank2 dok razina ne dosegne L_{min} , a potom se isporučuje u_0^* mm akcijom /irrigate. Radna jedinica implementira upravljačku logiku ventila i pumpe kao micro-ROS čvor koji izvršava komande primljene putem tih akcija; Protočna jedinica transparentno prosljeđuje ROS 2 akcije putem ESP-NOW mosta.

4.3. Komunikacijski protokol ESP-NOW

Svaka ESP-NOW poruka između Protočne i Mjerne jedinice sadrži serijaliziranu C strukturu od 28 bajta: identifikator poruke (1 bajt), vrstu (1 bajt), polje od šest float vrijednosti za podatke senzora (24 bajta) i statusnu zastavicu (2 bajta). Potvrda primitka čeka se 20 ms; pri neuspjehu ponavlja se do tri puta. Frekvencija slanja podataka senzora je 60 s, a komande navodnjavanja šalju se na zahtjev.

Protočna jedinica djeluje kao transparentni most: primljene micro-ROS poruke s Raspberry Pi prevodi u ESP-NOW format i prosljeđuje Radnoj i Mjernoj jedinici, te od njih prikuplja poruke. Na razini ROS 2 sustava vidljiva je jedino Protočna jedinica (ESP32-S3) dok ostale dvije nisu.

4.4. Integracija s yr.no API-jem

Yr.no API pruža besplatne meteorološke prognoze kao JSON odgovor na HTTP GET zahtjev na temelju geografskih koordinata (lat, lon) i nadmorske visine [10]. Za svaki sat prognoznog horizonta dostupni su: temperatura zraka (°C), relativna vlažnost (%), brzina i smjer vjetra, oblačnost i prognozirana količina oborina (mm). ROS 2 čvor yr_node preuzima prognozu svaka 3 sata (API ograničenje iznosi minimalni

interval od 30 min između zahtjeva prema istoj lokaciji). Satni podaci agregiraju se u dnevne ukupne oborine i srednje temperature za preuzimanje u MPC algoritam.

Referentna evapotranspiracija ET_0 (mm/dan) procjenjuje se modificiranom Hargreaves-Samani jednadžbom:

$$ET_0 = 0,0023 \cdot (T_{mean} + 17,8) \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \cdot Ra \quad (4)$$

gdje je T_{mean} srednja dnevna temperatura (°C), T_{max} i T_{min} maksimalna i minimalna temperatura, a Ra ekstraterestrijalno sunčevo zračenje (MJ/m²/dan) koje se računa analitički iz datuma i geografske širine bez potrebe za mjerenjem. Kada su dostupna lokalna mjerenja s meteorološke stanice (BME280 + SHT40), ET_0 se izračunava točnijim Penman-Monteith postupkom.

4.5. Web sučelje

Web sučelje centralizira nadzor sustava i upravljanje operatera u stvarnom vremenu. Prikazuje aktivnu petodnevnu MPC prognozu (oborine, temperatura, ET_0), mjerenja meteorološke stanice (temperatura, relativna vlaga, tlak, vjetar, oborine, vlaga tla) te razine vode u oba spremnika i stanje automata. Podaci su izloženi REST API-jem s Raspberry Pi. Operater može aktivirati sigurnosni prekid, pratiti stanje baterije koja napaja mikrokontrolere u vrtu te primati upozorenja pri kvaru bilo kojeg podsustava.

5. PLAN VALIDACIJE I OČEKIVANI DOPRINOSI

5.1. Očekivani doprinosi prema literaturi

Budući da je sustav u fazi hardverske integracije, kvantitativni rezultati još nisu dostupni. Na temelju usporedivih terenskih studija mogu se formulirati utemeljena očekivanja. Bwambale i sur. [7] terenski su izmjerili 29 % uštedu vode i prinos 20 t/ha primjenom MPC okvira strukturno sličnog predloženom. Delgoda i sur. [6] analitički pokazuju da CE metoda s determinističkom prognozom eliminira gravitacijske tokove koji nastaju pri reaktivnim algoritmima, a Jamal i sur. [1] potvrđuju da petodnevni do sedmodnevni NWP prognozni horizont daje značajnija poboljšanja od jednodnevnih prognoza.

Integracija lokalne meteorološke stanice za korekciju prognoznih ulaza, sukladno pristupu Bwambalea i sur. [8], treba dodatno smanjiti pogrešku procjene evapotranspiracije. Kvantifikacija u uvjetima kontinentalne klime Milanovca i specifičnih kultura s privatne parcele predmet je planiranog terenskog eksperimenta; rezultati će biti objavljeni u zasebnom radu.

5.2. Plan terenske validacije

Terenski eksperiment planira se u vegetacijskom periodu 2026. na privatnoj parceli s tri kulture različitih vodnih potreba. Plan validacije obuhvaća:

8. Usporedbu izmjerenog i prognoziranog RZSMD uz kvantifikaciju pogreške prognoziranja.
9. Mjerenje ukupne potrošnje vode uz usporedbu s konvencionalnim fiksnim rasporedom i reaktivnim sustavom temeljenim na pragovima vlage.
10. Analizu pouzdanosti komunikacijskog sloja: stopa gubitka paketa ESP-NOW, latencija micro-ROS poruka.
11. Testiranje vremenskog perioda potrebnog za rješavanje QP problema s ograničenjima koristeći `scipy.optimize.minimize`.

Potpuni eksperimentalni rezultati planiraju se objaviti kao izvorni znanstveni rad.

6. ZAKLJUČAK

Rad prikazuje arhitekturu i preliminarnu implementaciju sustava automatskog navodnjavanja koji integrira MPC algoritam s distribuiranom IoT infrastrukturom na ROS 2 i micro-ROS platformi. Ključni doprinos je kombinacija prediktivnog upravljanja temeljenog na vremenskim prognozama yr.no servisa, koordinacijskog sloja stabla ponašanja koji reaktivno koordinira ROS 2 akcije i servise, distribuiranih mikrokontrolerskih jedinica (ESP32-S3) koje komuniciraju putem ESP-NOW protokola, lokalne meteorološke stanice za korekciju prognoznih ulaza te autonomnog upravljanja dvama spremnicima, sve integrirano u ROS 2 ekosustav s web sučeljem za nadzor.

Za razliku od postojećih reaktivnih rješenja [4,5], predloženi sustav proaktivno planira navodnjavanje uzimajući u obzir nadolazeće oborine i evapotranspiraciju. Na temelju usporedivih terenskih studija [7,6] očekuje se značajna ušteda vode i eliminacija gravitacijskih tokova. Hardverska integracija je u tijeku, a terenska validacija sa kvantitativnim rezultatima planira se u vegetacijskom periodu 2026. i bit će predmet zasebnog rada.

LITERATURA

- [1] S. Jamal, G. Slater, R. Stricevic, et al. RTIST: Real-Time Irrigation Scheduling Tool with data assimilation using model predictive control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023.
- [2] S. Mushtaq, T. Maraseni, K. Maroulis. Water, energy and food security nexus: Challenges and opportunities for irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 2024.

- [3] R. Vories, P. Sudduth, S. Drummond, et al. Estimating the irrigation scheduling impacts on crop production. *Agricultural Water Management*, 2021.
- [4] D. Kuhar. Sustav za navodnjavanje s Arduino mikrokontrolerom. Završni rad, Veleučilište u Virovitici, 2021.
- [5] A. Gavran, M. Tomić, K. Vukelić. IoT sustav za pametno navodnjavanje s ESP32-S3 platformom. Diplomski rad, Sveučilište u Osijeku, 2023.
- [6] H. Delgoda, S. Saleem, M. Halgamuge, H. Malano. Irrigation control with Model Predictive Control (MPC) in a soil moisture deficit framework. *Agricultural Water Management*, 2016.
- [7] E. Bwambale, F. Abagale, G. Anornu. Smart irrigation monitoring and control strategy for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Smart Agricultural Technology*, 2022.
- [8] E. Bwambale, F. Abagale, G. Anornu. MPC with local weather measurements for improved ET_0 estimation. *Agricultural Water Management*, 2024.
- [9] Z. Shang, D. Zhang, X. Xu, et al. Robust MPC for irrigation scheduling using Gaussian process models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020.
- [10] Yr.no. Yr.no Location Forecast API. Norwegian Meteorological Institute, 2024. <https://api.met.no/weatherapi/locationforecast/>
- [11] M. Colledanchise, P. Ogren. *Behavior Trees in Robotics and AI*. CRC Press, 2018.
- [12] D. Faconti. BehaviorTree.CPP v4. GitHub repository, 2023. <https://github.com/BehaviorTree/BehaviorTree.CPP>
- [13] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, W. Woodall. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*, 7(66), 2022.
- [14] micro-ROS. micro-ROS middleware for resource-constrained devices. <https://micro.ros.org/>, 2021.
- [15] Espressif Systems. ESP-NOW Protocol Reference. Espressif Systems, 2023.