

2023

# Softversko rešenje za navodnjavanje različitih kultura bazirano na algoritmima mašinskog učenja primenjenim na meteo, pedološkim podacima i očitavanjima sa senzora

Pavlović Dejan, Pajević Nina, Panić Marko, Brdar Sanja,  
Pandžić Miloš, Crnojević Vladimir, Marko Oskar

---

Pavlović, Dejan, Pajević, Nina, Panić, Marko, Brdar, Sanja, Pandžić, Miloš, et al. 2023.  
Softversko rešenje za navodnjavanje različitih kultura bazirano na algoritmima mašinskog  
učenja primenjenim na meteo, pedološkim podacima i očitavanjima sa senzora.

<https://open.uns.ac.rs/handle/123456789/32703> (accessed 5 May 2024).

<https://open.uns.ac.rs/handle/123456789/32703>

*Downloaded from DSpace-CRIS - University of Novi Sad*



Istraživačko-razvojni institut za informacione tehnologije biosistema  
Dr Zorana Đinđića 1, 21101 Novi Sad, Srbija

**Softversko rešenje za navodnjavanje različitih kultura bazirano na  
algoritmima mašinskog učenja primenjenim na meteo, pedološkim  
podacima i očitavanjima sa senzora**

**Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na nacionalnom nivou - M82**

## **1. Ime i prezime autora**

Dejan Pavlović, Nina Pajević, Marko Panić, Sanja Brdar, Miloš Pandžić, Vladimir Crnojević, Oskar Marko  
*Institut BioSens - Istraživačko-razvojni institut za informacione tehnologije biosistema*

## **2. Naziv tehničkog rešenja**

Softversko rešenje za navodnjavanje različitih kultura bazirano na algoritmima mašinskog učenja primenjenim na meteo, pedološkim podacima i očitavanjima sa senzora

## **3. Ključne reči**

pametno navodnjavanje, softverski alat za navodnjavanje, automatizacija, mašinsko učenje, senzori, vlažnost zemljišta, meteorološki podaci, vremenska prognoza

## **4. Za koga je rešenje rađeno**

Smart Watering Solutions doo, Novi Sad

Kompanija Smart Watering Solutions doo iz Novog Sada osnovana je 2018. godine i bavi se razvojem softvera i kontrolera u oblasti pametnog navodnjavanja. Preko 60 gazdinstava i velikih proizvođača iz Republike Srbije koristi Smart Watering uređaje za potrebe pametnog navodnjavanja i fertigacije poljoprivrednih parcela. Smart Watering rešenje se koristi za zalivanje velikog broja poljoprivrednih kultura sa različitim procesima proizvodnje koje zahtevaju različite obrasce navodnjavanja. Kako bi zadržali vodeće mesto na tržištu, politika kompanije je da prihvati nove trendove i da razvije automatski sistem za navodnjavanje koji se bazira na primeni metoda mašinskog učenja, tako crpeći znanje iz različitih izvora podataka u cilju donošenja odluke zasnovane na objektivnom stanju na terenu.

## **5. Godina kada je rešenje kompletirano**

2022. godine

## **6. Godina kada je počelo da se primenjuje i od koga**

2022. godine

Primena od strane Smart Watering Solutions doo, Novi Sad

## **7. Oblast i naučna disciplina na koju se tehničko rešenje odnosi**

Tehničko-tehnološke nauke, Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo

## **8. Problem koji se rešava tehničkim rešenjem**

Sistem pametnog navodnjavanja predstavljen u okviru ovog tehničkog rešenja čini potpuno integrisan sistem koji pokriva ceo lanac procesa navodnjavanja poljoprivredne parcele, a koji obuhvata korišćenje senzora za praćenje stanja na terenu, sistem za donošenje odluke i sistem za navodnjavanje. Realizovano softversko rešenje bazirano na primeni metoda mašinskog učenja daje doprinos u vidu donošenja objektivne odluke optimalnog vremena uključivanja i trajanja navodnjavanja u realnom vremenu. Za razliku od tradicionalnog načina donošenja odluke o potrebnom vremenu navodnjavanja koje se donosi na osnovu iskustva poljoprivrednih proizvođača, odnosno, ekspertskeg znanja agronoma, koje su u manjoj ili većoj meri podložne greškama usled subjektivnosti, dato rešenje nudi odluku zasnovanu na osnovu objektivnog stanja na terenu. Pored toga što dato rešenje eliminiše mogućnost usporenog rasta useva koji je posledica nedovoljne količine vode, takođe rešava jedan od najčešćih problema navodnjavanja, odnosno, prekomernu potrošnju vode iznad nivoa koji biljka fizički može da primi. Samim tim, smanjuje se i potrošnja dizel goriva i emisije CO<sub>2</sub> korišćena tokom procesa navodnjavanja. Na taj način, sistem za pametno navodnjavanje, predstavljen u ovom tehničkom rešenju, korisniku donosi profit koji se ogleda u većim prinosima, te smanjuje troškove usled smanjene potrošnje resursa za potrebe navodnjavanja (vode i goriva) pritom pozitivno utičući na životnu sredinu. Procena je da ovaj sistem uštedi oko 25% resursa, a po hektaru se troši oko 1000 litara dizela za

pokretanje zalivnog sistema u toku jedne sezone. Prostom računicom zaključuje se da ušteda u navodnjavanju iznosi preko 400 EUR godišnje po hektaru uz drastično uvećanje prinosa i kvaliteta poljoprivrednih proizvoda i smanjenje rizika vezanog za nepredvidive vremenske prilike, poput suše koja je predstavljala gorući problem u prethodnoj godini.

Realizovano je softversko rešenje koje primenom mašinskog učenja na osnovu trenutnih očitavanja senzora za vlažnost zemljišta, vremenske prognoze, informacija o zemljištu, konfiguracije zalivnog sistema, te željene vlažnosti definisane od strane korisnika donosi odluku za optimalno vreme uključivanja i trajanja navodnjavanja, a u cilju optimizacije resursa. Rešenje koristi očitavanja sa senzora koja se u realnom vremenu loguju na server proizvođača i daje mogućnost donošenja odluke u svakom trenutku. Realizovano je u programskom jeziku *Python* i sastoji se od sledećih modula:

- Parsiranje podataka
- Predobrada očitanih vrednosti
- Obuka modela mašinskog učenja
- Donošenje odluke za optimalno vreme navodnjavanja

Rešenje omogućava poljoprivrednim proizvođačima da definišu željenu vlažnost zemljišta za poljoprivrednu kulturu koju uzgajaju na svojoj parceli, te na osnovu zadate vrednosti, kao i trenutnog očitavanja vlažnosti, vremenske prognoze, informacija o zemljištu, tipa proizvodnje i konfiguracije uređaja za navodnjavanje, odrede optimalnu količinu vode koju treba primeniti za zalivanje useva, kao i konkretan trenutak uključivanja i isključivanja zalivnog sistema. Dato tehničko rešenje je testirano na različitim poljoprivrednim kulturama, sa različitim tipom proizvodnje i konfiguracijama samog uređaja za navodnjavanje, što ukazuje na to da je spektar korisnika ovakvog sistema zaista širok, te da osim velikih proizvođača pokriva i male.

## 9. Stanje rešenosti problema u svetu

Prema Izveštaju Ujedinjenih nacija o razvoju vode u svetu (World Water Development (UN) report), usled porasta svetske populacije i sve veće industrijalizacije proizvodnje, do 2050. godine više od 50% svetske populacije biće pogođeno u vidu nedostatka vode ili smanjenog pristupa čistoj vodi [1]. Potrošnja vode u svetu se konstantno povećava, dok su procene da će se dostupnost vode zbog nadolazećih klimatskih promena smanjiti u godinama koje dolaze [2]. U trenutnom scenariju, 786 miliona ljudi nema pristup čistoj vodi za piće [1], dok prema bazi podataka Svetske banke, u čak 44 razvijene zemlje, 35% količine vode koja se koristi predstavlja gubitke bez prihoda [3, 4]. Iz tog razloga, efikasno upravljanje vodom postalo je glavno pitanje za mnoge zemlje i vodne industrije. Po navodima Organizacije za ekonomsku saradnju i razvoj [5], svega 30% vode se koristi za potrebe domaćinstava i u okviru industrije, dok preostalih 70% odlazi u poljoprivrednu proizvodnju. Dodatno, 90% vode iskorišćene u domaćinstvu i industriji se vrati u ekosistem, dok se kod navodnjavanja poljoprivrednih kultura čak 50% vode izgubi kroz proces evapotranspiracije [6]. Stoga je jasno da problem nedostatka vode treba prvenstveno da se reši smanjenjem potrošnje vode u poljoprivredi.

Republiku Srbiju karakterišu promenljivi klimatski uslovi sa različitim rasporedom padavina koji variraju iz godine u godinu. Analize su pokazale da se na datoj teritoriji suše u proseku javljaju svake treće do pete godine. Stoga, navodnjavanje na ovim prostorima čini veoma bitan činilac povećavanja i stabilizacije poljoprivredne proizvodnje. Republika Srbija raspolaže dovoljnim količinama vodnih resursa za potrebe poljoprivredne proizvodnje, pod uslovom da se dati resursi koriste racionalno i štite od kontaminacije [7]. Na lokalnom nivou, u Autonomnoj pokrajini Vojvodini prekomerno navodnjavanje predstavlja veliki problem. Uprkos pozitivnim ekonomskim i socijalnim uticajima, negativni efekti navodnjavanja, naročito prekomerna eksploatacija, se ispoljavaju kroz zagađenje i degradaciju vode i zemljišta [8, 9]. Zbog velike potrošnje podzemnih voda za potrebe navodnjavanja, veoma su česti slučajevi nestanka vode na mestima koja se ne oslanjaju na centralne vodovode, jer dolazi do nestašice pijaće vode, a smanjena količina podzemnih voda dodatno utiče na razvoj bakterija i degradaciju kvaliteta vode. Štaviše, prekomerno navodnjavanje dovodi do ispiranja hranljivih sastojaka iz zemljišta što prouzrokuje degradaciju njegovog kvaliteta. Kako bi se umanjio rizik od negativnih posledica prekomernog navodnjavanja, vodnim resursima je potrebno odgovornije upravljati. Pored toga, sistemi za navodnjavanje najčešće koriste pumpe koje se napajaju na dizel gorivo, gde

u proseku za jedan hektar obradivog zemljišta prosečna potrošnja iznosi od 4-6 litara po času. Samim tim, smanjenjem potrošnje goriva osim finansijskih ušteda doprinosi i očuvanju životne sredine i „zelenoj“ proizvodnji. Svakako, uprkos činjenici da je navodnjavanje često povezano sa štetnim uticajem na životnu sredinu, ono ipak predstavlja presudan proces u poljoprivrednoj proizvodnji [10].

Smart Watering Solutions doo iz Novog Sada predstavlja kompaniju koja se bavi razvojem softvera i kontrolera u oblasti pametnog navodnjavanja. Preko 60 gazdinstava i velikih proizvođača iz Republike Srbije koristi Smart Watering uređaje za potrebe pametnog navodnjavanja i đubrenja poljoprivrednih parcela. Smart Watering rešenje se koristi za zalivanje velikog broja poljoprivrednih kultura sa različitim procesima proizvodnje koje zahtevaju različite obrasce navodnjavanja. Na primer, za potrebe navodnjavanja kukuruza koji se gaji na parceli koja u procesu proizvodnje koristi rešenja Smart Watering kompanije koristi se centarpivotni zalivni sistem. Sa druge strane, borovnice se gaje u supstratnoj smeši u saksijama i koriste „kap po kap“ sistem navodnjavanja, koji omogućava direktno sprovođenje vode do korena biljke, pri čemu lišće ostaje suvo i time se smanjuje mogućnost pojave bolesti.

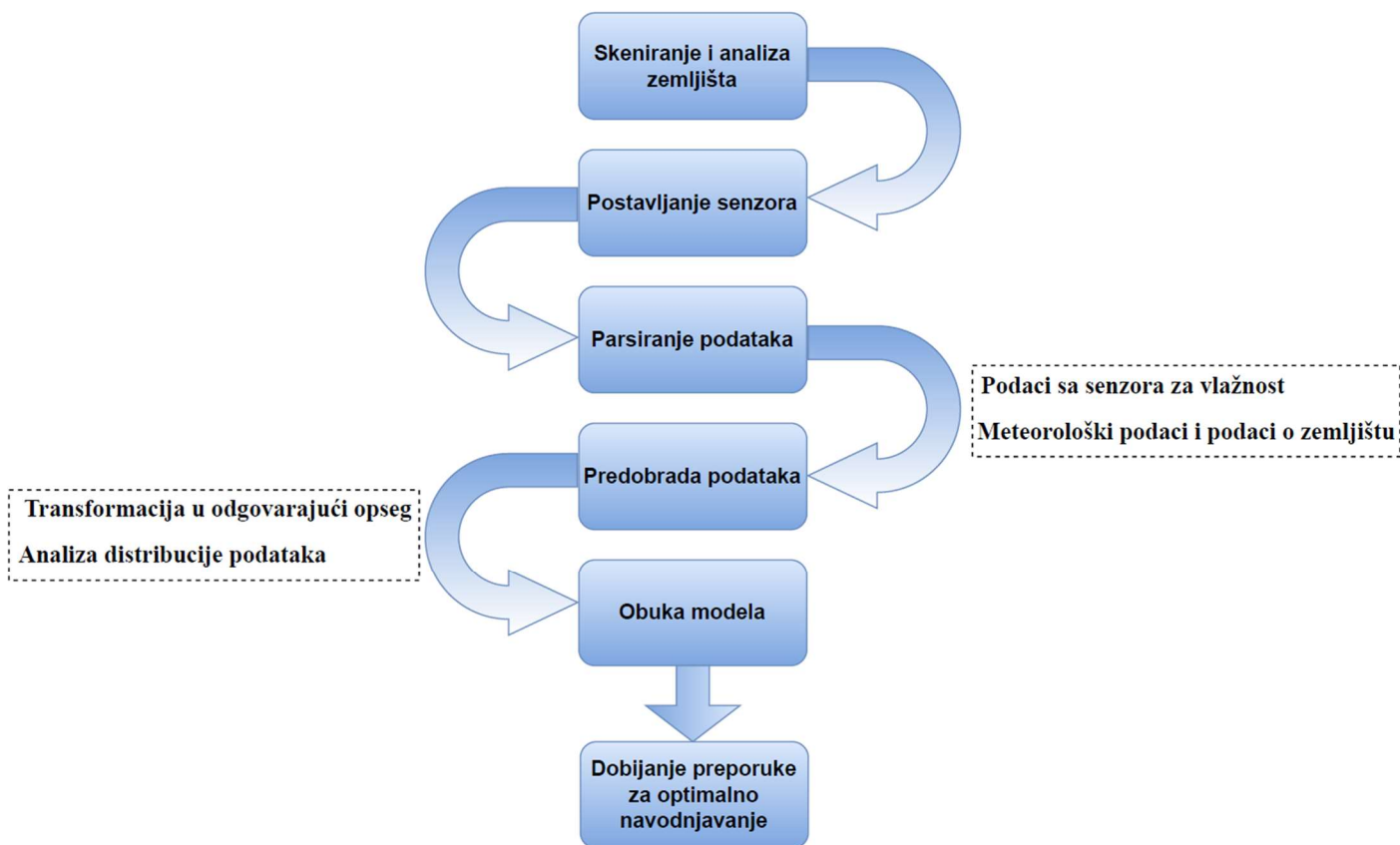
Proces navodnjavanja u poljoprivredi u Srbiji bazira se većinom na iskustvu poljoprivrednika, dok je primena sistema automatskog navodnjavanja veoma malo zastupljena. Koristeći informacione i komunikacione tehnologije, istraživači dolaze do rešenja koje imaju sposobnost efikasnijeg upravljanja vodom [11-20]. Rešenja bazirana na korišćenju LoRa komunikacionog modula predložena od strane [13, 14] koriste se za potrebe daljinske kontrole putem mobilnog uređaja što omogućava olakšano praćenje stanja na poljoprivrednoj parceli i upravljanje procesom navodnjavanja. Ipak, data rešenja ne obrađuju generisane podatke i ne doprinose procesu donošenja odluke, te se proces navodnjavanja isključivo bazira na iskustvu poljoprivrednog proizvođača. Kako bi prikupljeni podaci na jednoj poljoprivrednoj parceli u potpunosti dobili na značaju, razvijena su automatizovana rešenja u vidu takozvanih pametnih sistema za navodnjavanje, koji imaju sposobnost davanja preporuke na osnovu objektivnog stanja na terenu, tako dajući značajan doprinos prilikom donošenja odluke u cilju efikasnijeg upravljanja vodom [15-20]. Tehnologija pametnog navodnjavanja evoluirala je u cilju pravilnog upravljanja i uštede vodnih resursa. Pametni sistemi za navodnjavanje koriste širok spektar senzorskih, informacionih i komunikacionih tehnologija kako bi se obezbedilo praćenje podataka u realnom vremenu, poput informacija o samom procesu navodnjavanja kao što su pritisak ili protok vode, odnosno informacije o vodi i zemljištu poput kvaliteta vode i vlažnosti zemljišta. Date informacije služe u cilju otkrivanja bilo kakvih abnormalnosti kao što su prekomerni gubici ili kontaminacija u sistemu za distribuciju vode. Međutim, većina rešenja radi na dnevnoj, a neki na nedeljnoj ili čak mesečnoj rezoluciji, što je nedovoljno za ozbiljan sistem za podršku pri odlučivanju. Za potrebe predikcije optimalne količine vode potrebne na poljoprivrednoj parceli u literaturi je predloženo rešenje bazirano na XGBoost modelu mašinskog učenja [15]. Prilikom davanja preporuke dato rešenje koristi prognozu temperature, vlažnosti i radijacije na osnovu čega donosi zaključak o ukupnoj količini vode koja je potrebna da se primeni za određenu parcelu. Nedostatak pomenutog rešenja jeste u tome što je rešenje razvijeno samo za poljoprivredne kulture gajene u oblasti voćarstva, kao i taj što je učestalost davanja preporuke na nedeljnom nivou. Osim toga, obučeni model ne poseduje nikakvu informaciju o zemljištu, što je razumljivo ukoliko se on koristi za preporuku navodnjavanja na poljoprivrednim parcelama koje poseduju sličan sastav i kvalitet zemljišta. Međutim, takvo rešenje ima ograničenu mogućnost primene. Slično rešenje bazirano na primeni LoRa komunikacionih sistema i linearne regresije [16], gde su se pored informacije o vlažnosti zemljišta, koristile i informacije o intenzitetu svetlosti, pokazalo je veoma visoke performanse. Ipak, dodatan senzor podrazumeva i dodatne troškove implementacije. Pored toga, dato rešenje je razvijeno korišćenjem podataka generisanih sa jedne poljoprivredne parcele sa identičnom konfiguracijom sistema za navodnjavanje na nivou cele parcele, što ga kao i rešenja predložena u [17, 18] čini usko specifičnim za datu namenu. Pored toga, u literaturi su predložena i dva rešenja [19, 20] bazirana na metodologiji Učenja sa podrškom, odnosno, eng. *Reinforcement learning* metodologiji koje je prema prikazanim rezultatima veoma uspešno korišćeno za planiranje navodnjavanja u cilju smanjenja troškova i povećavanja profita. Međutim, kako i sami autori navode kao nedostatak u [19], kao i u prethodnim slučajevima, algoritmi su razvijeni korišćenjem samo jedne poljoprivredne kulture, odnosno, samo jednog tipa konfiguracije navodnjavanja, te s toga i generisani ulazni podaci korišćeni za testiranje/primenu dolaze iz istog okruženja kao i podaci korišćeni za obuku modela. U drugom slučaju [20], za potrebe obuke modela korišćeno je više poljoprivrednih kultura (3) iz oblasti ratarstva, međutim, kako obuka modela, tako i test analiza nije sprovedena nad stvarnim podacima, već su performanse evaluirane simulacijom različitih scenarija. Pored toga, važno je napomenuti da su sva rešenja pomenuta u okviru ovog odeljka, razvijena korišćenjem podataka generisanih pomoću senzora postavljenih na

poljoprivrednim parcelama u Kolumbiji, Kini, Izraelu, Etiopiji i Australiji, čije se zemljište po strukturi, sastavu i kvalitetu razlikuje od zemljišta u Republici Srbiji. S obzirom na to da postojeći senzori za vlažnost dostupni u komercijalnim sistemima najčešće mere fizičku karakteristiku koja indirektno ukazuje na vlažnost zemljišta, a na koju osim same vlažnosti utiču i drugi parametri, pokazivanje postojećih senzora za vlažnost najčešće varira u zavisnosti od tipa zemljišta. To znači da je u velikom broju slučajeva za ispravan rad senzora neophodna njegova kalibracija prema tipu zemljišta [21, 22], naročito u slučajevima glinovitim zemljišta koja poseduju visoku električnu provodnost i zemljišta bogata organskom materijom kada je prisutan povišen broj atoma vodonika. To znači da bi za primenu u Republici Srbiji predložena rešenja zahtevala dodatnu kalibraciju senzora prema datom tipu zemljišta, te doobučavanje postojećih modela mašinskog učenja na osnovu novih vrednosti. Trenutno na tržištu ne postoji nijedan komercijalni sistem koji nudi generalizovano rešenje za integrisano praćenje senzora i upravljanje navodnjavanjem u realnom vremenu zasnovan na mašinskom učenju, kako za kulture gajene u zemljištu, tako i za kulture gajene u supstratnoj smeši unutar saksija.

Realizovano softversko rešenje bazirano na primeni mašinskog učenja u svakom trenutku omogućava poljoprivrednim proizvođačima da definišu željenu vlažnost zemljišta za poljoprivrednu kulturu koju uzgajaju, te na osnovu trenutnog očitavanja vlažnosti, vremenske prognoze, informacija o zemljištu, tipa proizvodnje i konfiguracije uređaja za navodnjavanje, odrede optimalno vreme uključivanja i trajanja navodnjavanja u cilju optimizacije resursa.

## 10. Opis tehničkog rešenja

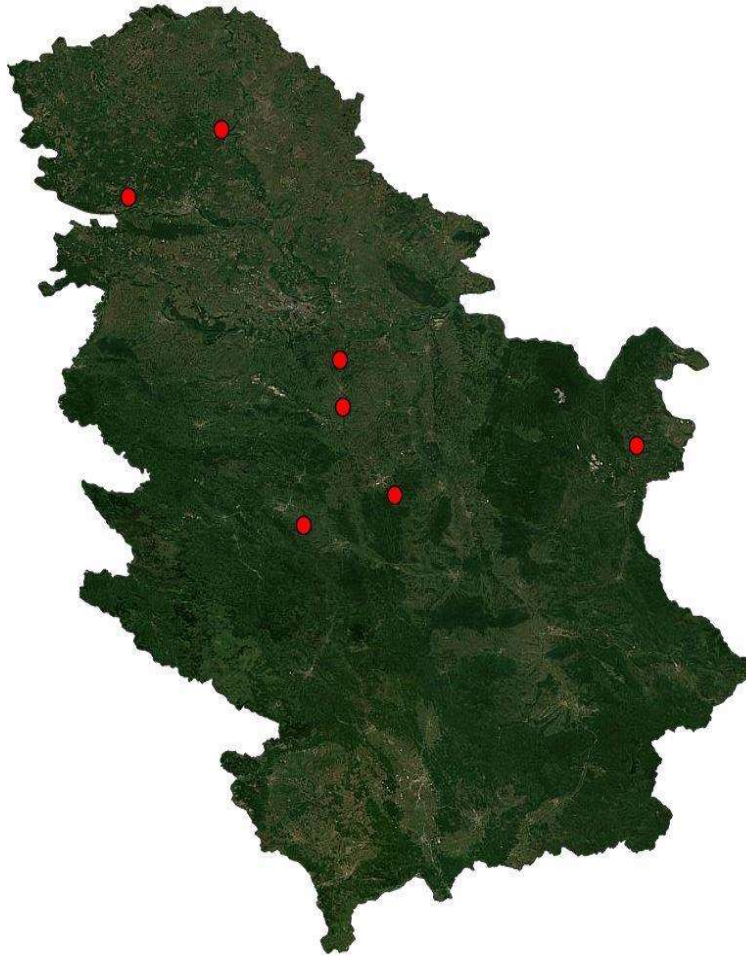
Na Slici 1 je data skica rešenja sistema za pametno navodnjavanje pri čemu su različiti moduli, odnosno operacije, označeni zasebnim pravougaonicima. Moduli su pisani u programskom jeziku *Python*, a u nastavku je detaljniji opis svakog od njih.



Slika 1. Niz modula za obradu podataka.

Sistem za pametno navodnjavanje razvijen na Institutu BioSens sastoji se iz nekoliko modula prikazanih na Slici 1. Istraživanja su urađena na sedam oglednih parcela, površina koje se kreću u rasponu 1-100 ha sa prosečnom površinom parcele od 17 ha. Geografske lokacije datih parcela su vizuelno prikazane na Slici 2 i nalaze se u različitim agroklimatskim uslovima, od ravničarskih predela Vojvodine do planinskih predela Centralne Srbije. Poljoprivredne kulture koje se gaje na datim parcelama su kukurz, borovnica, lešnik, jabuka i kupina. Različiti sistemi navodnjavanja se koriste u okviru ove analize, gde se za potrebe navodnjavanja kukurza koristi centarpivotni zalivni sistem, dok se sve ostale poljoprivredne kulture navodnjavaju putem „kap po kap“ sistema. Pored toga, proces proizvodnje se razlikuje između određenih kultura, gde se borovnice koje se gaje u Kragujevcu i Mladenovcu nalaze u supstratnoj smeši unutar saksija (gde se jedna proizvodnja vrši u plasteniku), dok se sve ostale kulture gaje u zemljištu. Takođe, različiti obrasci navodnjavanja se koriste za različite procese proizvodnje, gde su ciklusi navodnjavanja kod borovnice koja se nalazi u supstratnoj smeši kratki i traju svega 10-15 minuta, dok navodnjavanje kod nekih drugih poljoprivrednih kultura traje znatno duže. Pored toga, sama konfiguracija sistema za navodnjavanje se razlikuje prema postavci kapljača koji se postavljaju između zasada, te po protoku vode koja prolazi kroz same kapljače. Na osnovu heterogenosti samih podataka, evidentno je da je proces istraživanja sproveden u okviru ovog tehničkog rešenja zahtevao veoma kompleksnu analizu, te da rezultujući softverski alat predstavlja generalizovano rešenje.





Slika 2. Prikaz distribucije oglednih poljoprivrednih parcela na teritoriji Republike Srbije.

## 1. Postavljanje senzora

Prvi korak kod postavljanja sistema za navodnjavanje je analiza zemljišta koja se vrši u cilju definisanja menadžmenta zona unutar kojih se može smatrati da se nalazi homogeno zemljište sa istim fizičkim i hemijskim svojstvima, vodopropustljivošću, vododržljivošću, kapilarnošću i sposobnošću isparavanja.

Na osnovu sprovedenih analiza, ogledne parcele su podeljene na veći broj zona na osnovu čega su određena optimalna mesta za postavljanje senzora. U svakoj od zona nalaze se nekoliko senzora, postavljenih na više dubina (najčešće 15 cm i 30 cm) koji daju očitavanja reprezentativna za celu zonu. Primer zoniranja poljoprivredne parcele dat je na Slici 3. Svi senzori su povezani na internet preko LoRa sistema. LoRa je sistem za komunikaciju veoma pogodan za poljoprivredu, gde je za razliku od mobilnih komunikacija imperativ preneti malu količinu podataka (kakvo je očitavanje vlažnosti) preko velikih udaljenosti i sa malom potrošnjom energije.





Slika 3. Primer poljoprivredne parcele podeljene na zone na osnovu fizičkih i hemijskih svojstava zemljišta.

## 2. Parsiranje podataka

### Očitavanje senzora za vlažnost zemljišta

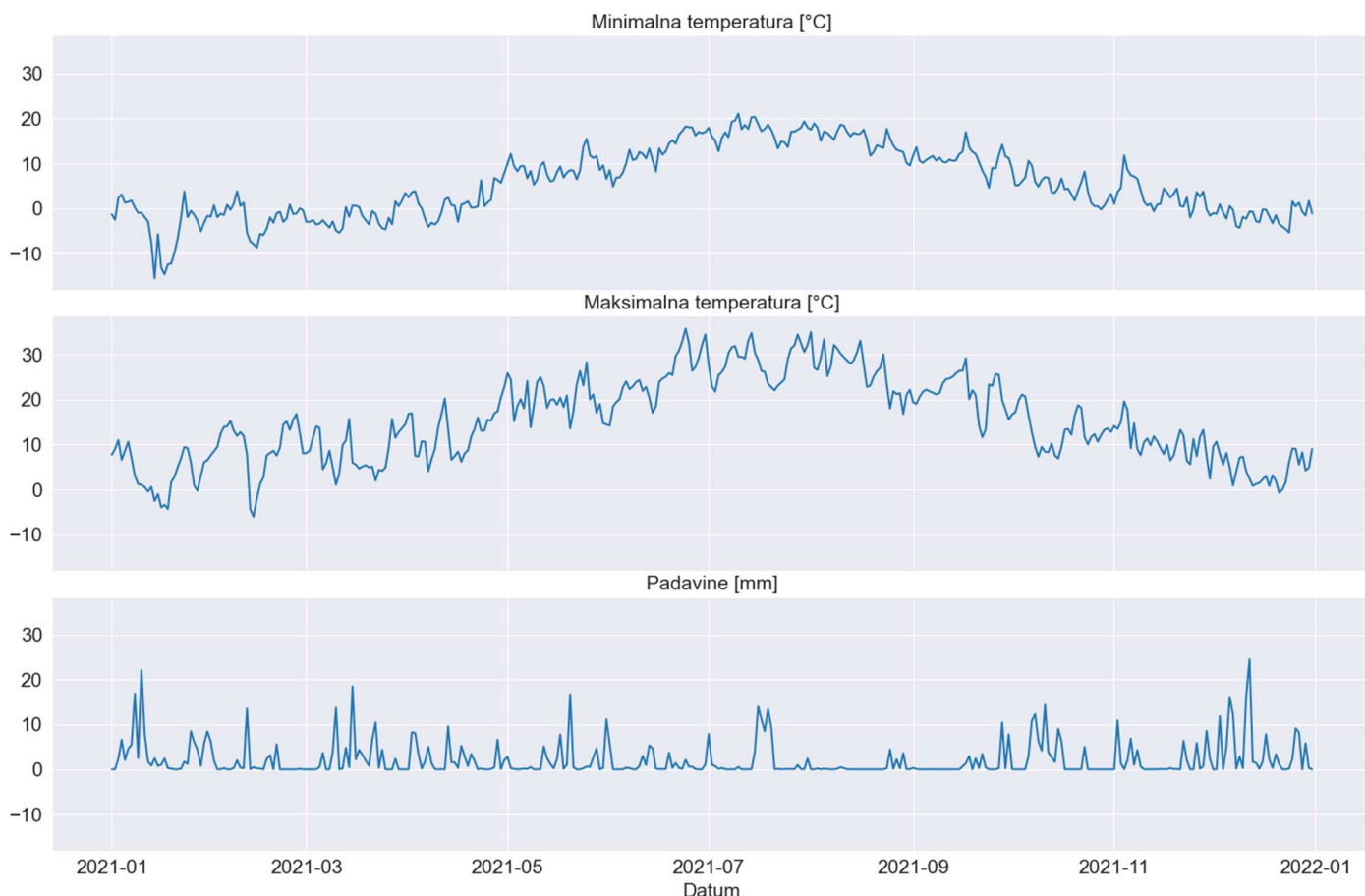
Podaci sa senzora se pohranjuju na cloud-u u .csv formatu i učitavaju u *Python* u *DataFrame* formatu, korišćenjem modula *Pandas* [23]. Ukupan skup podataka za obuku pokriva period od 2018. do 2022. godine sa više od 170000 uzoraka generisanih od strane senzora postavljenih na 7 različitih parcela. Osim informacije o vlažnosti zemljišta, odnosno supstratne smeše, koja je generisana svakih 30 sekundi do 15 minuta u zavisnosti od parcele, inicijalan skup podataka korišćen u okviru ove analize takođe sadrži i informacije o svakom pojedinačnom navodnjavanju poput tačnog datuma, početnog i krajnjeg vremena navodnjavanja, protoka zalivnog sistema, informacija o menadžment zoni u kojoj su postavljeni senzori, te meteo podataka na određenim parcelama. Ukupan broj uzoraka generisanih od strane senzora postavljenih za detekciju vlažnosti zemljišta jeste 125805 (5/7 parcela), odnosno 45411 uzoraka u slučaju supstratne smeše (2/7 parcela). Kako bi se upotpunio skup podataka, osim informacija o vlažnosti, svakom uzorku su dodati i meteorološki podaci, kao i podaci o zemljištu. Na Slici 4 prikazan je deo inicijalnog skupa podataka sačinjen od informacija o vlažnosti zemljišta (gde *value1*, *value2* i *value3* redom predstavljaju očitavanu vlažnost zemljišta na dubinama od 15, 30 i 100 cm), periodu navodnjavanja i metapodataka generisanih za svaku parcelu pojedinačno. Koordinate parcela nisu date zbog poverljivosti podataka.

Parcel	Zone	Date	value1	value2	value3		
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 09:30:00	63				
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 09:45:00	64				
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 10:00:00	66				
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 10:15:00	65				
Parcel	Zone	Irrigation start date	Irrigation end date				
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 19:59:25	2021-07-22 20:07:32				
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 18:32:27	2021-07-22 18:40:34				
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 18:28:51	2021-07-22 18:32:05				
Borovnica Kragujevac	1	2021-07-22 09:56:00	2021-07-22 10:04:11				
Parcel	Coordinates	Parcel ID	Area (ha)	Zone	Zone area (ha)	Flow	Substrate
Borovnica Kragujevac		18	1	1	0.25	4	1
Borovnica Mrsinci		56	3	1,2,3,4	0.5	6	0
Jabuka Celarevo		16	12	1,2,3,4	4	2.5	0
Sikole Lesnik Negotin		60	100	2	4.16	4.2	0
Kupina Jelenac		29	2.5	1	1	4	0
Kukuruz Becej		54	2	1	1	2	0
Borovnica Mladenovac		73	1.2	8	0.15	4	1

Slika 4. Deo skupa podataka o vlažnosti zemljišta, periodu navodnjavanja i informacijama o poljoprivrednoj parceli.

### Meteorološki podaci i podaci o zemljištu

Na osnovu lokacije i perioda postavljenih senzora za vlažnost preuzeti su i meteorološki podaci sa portala *Climate Data Store*, koji uređuje *Copernicus Climate Change Service*, a potiču od *ERA5-Land* reanalize. Reanaliza kombinuje osmatranja iz celog sveta sa podacima iz modela kako bi se dobio potpun i dosledan skup podataka upotrebom fizičkih zakona. Prostorna rezolucija podataka je 9 km, a na osnovu časovnih vrednosti su izračunate dnevne vrednosti maksimalne i minimalne temperature vazduha i količine padavina. Date informacije su prikupljene kao dodatan izvor podataka kako bi se upotpunio inicijalni skup podataka, naročito za parcele gde meteorološki podaci nisu dostupni, poput parcele koja se nalazi u Kragujevcu, gde iz određenog razloga za 2021. godinu ne postoji informacija o temperaturi na datoj parceli. Sa druge strane, količina padavina predstavlja veoma bitan faktor prilikom optimizacije navodnjavanja, a nije dostupna u inicijalnom skupu podataka. Iz toga razloga data informacija je preuzeta za sve parcele u svim relevantnim periodima istraživanja. Primer preuzetih meteoroloških podataka za period 1.1.2021.-1.1.2022. za parcelu kod Kragujevca prikazan je na Slici 5.

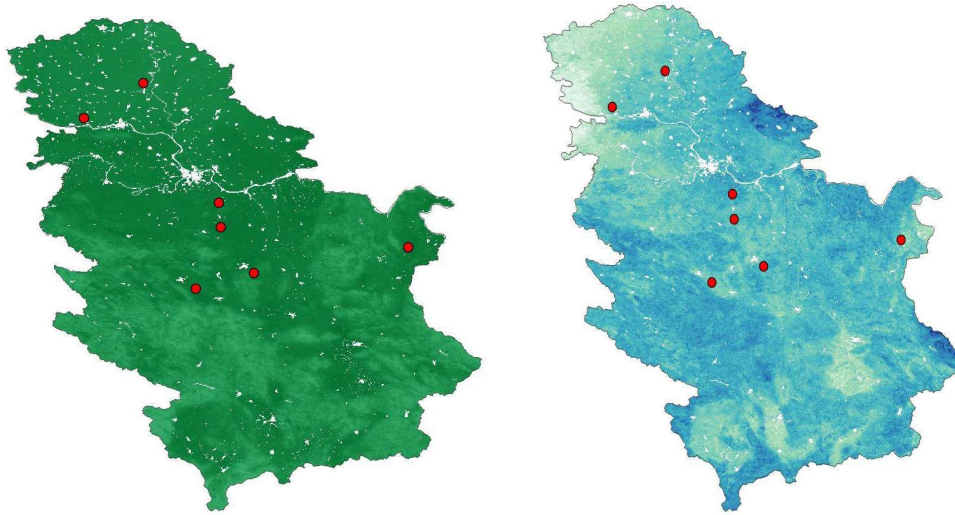


**Slika 5. Distribucija vrednosti minimalne i maksimalne temperature, kao i količine padavina za parcelu u Kragujevcu u toku 2021. godine.**

U cilju dodatnog poboljšanja performansi modela za potrebe donešenja odluke o optimalnom vremenu navodnjavanja poljoprivrednih kultura koje se gaje u zemljištu, uključeni su parametri zemljišta koji definišu njegove fizičke karakteristike kao što su vodopropustljivost, vododrživost, kapilarnost, kao i sposobnost isparavanja. Jedan od parametara koji je uključen u obuku modela mašinskog učenja jeste zapreminska masa, odnosno težina medijuma u neporemećenom stanju po jedinici zapremine koja ukazuje na zbijenost i matematički služi za obračun vodno-fizičkih osobina zemljišta. Pored toga, uključen je još jedan parametar vezan za fizička svojstva zemljišta, a koji ukazuje na relativnu zapreminu grubog dela zemljišta (>2mm). Oba parametra potiču iz *SoilGrids* [24] baze podataka koja daje podatke na prostornoj rezoluciji od 250 metara. S obzirom na činjenicu da vrednosti datih parametara nisu dostupni za supstratne smeše, dati parametri su uključeni samo u okviru obuke modela koji se odnosi na podatke biljaka koje se gaje u zemljištu. Primer baze podataka i raspoloživih fizičkih karakteristika zemljišta prikazan je u Tabeli 1 i na Slici 6.

BulkDensity15-30	ClayContent15-30	CoarseFragments15-30	Sand15-30	Silt15-30
152	351	91	266	383
141	334	125	212	454
147	343	116	299	358
152	372	104	242	386
143	337	145	257	406
145	385	105	243	372
152	338	109	247	414
150	351	146	299	350

**Tabela 1. Prikaz raspoloživih podataka o zemljištu preuzetih sa portala *SoilGrids*.**



Slika 6. Prikaz korišćenih parametara zemljišta: a) zapreminska masa i b) relativna zapremina grubog dela zemljišta.

Korišćenjem meteorološki podataka generisanih sa portala Climate Data Store, kao i parametara koji opisuju fizička svojstva zemljišta koji potiču iz SoilGrids baze podataka, upotpunjen je inicijalni skup podataka korišćen za razvoj ovog tehničkog rešenja. Dakle, ulazne parametre modela mašinskog učenja predstavljaju početna i krajnja vlažnost zemljišta, minimalna i maksimalna temperatura, te ukupna količina padavina tokom jednog dana, kao i zapreminska masa i relativna zapremina grubog dela zemljišta za definisanu lokaciju. Izlaznu promenljivu modela, odnosno vrednost koja se predikuje, predstavlja ukupno vreme zalivanja tokom dana za slučaj kada je biljka gajena u zemljištu, odnosno vreme zalivanja u okviru pojedinačnog ciklusa kada se biljka gaji u supstratnoj smeši. Vrednosti izlazne promenljive korišćene za potrebe obuke modela definisane su intervalom između početnog i krajnjeg vremena navodnjavanja, prikazanih na Slici 4, a koja su prethodno određena od strane domenskih eksperata.

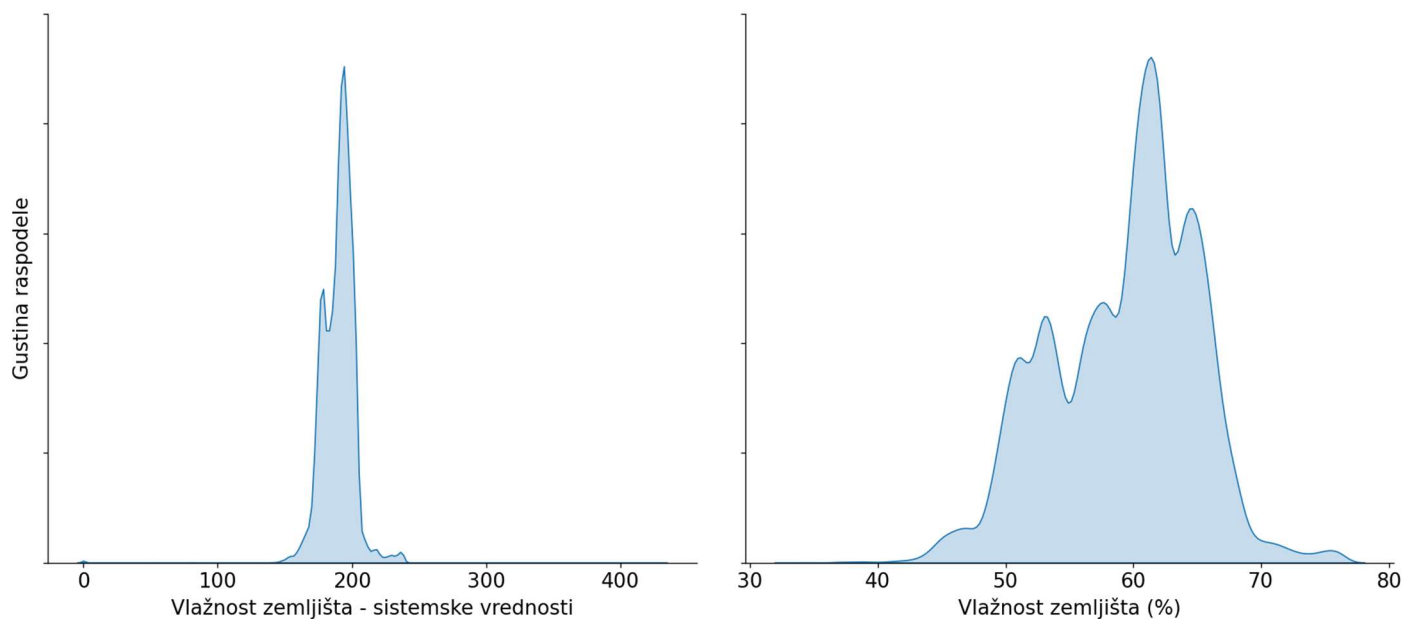
### 3. Predobrada podataka

#### Transformacija u odgovarajući opseg

Vrednosti vlažnosti zemljišta najčešće su grupisani u opsegu od 30 do 50%. Ukoliko to nije slučaj i vrednosti očitavanja senzora prevazilaze opseg od 0 do 100%, potrebno je definisati funkciju za transformaciju inicijalnih sistemskih vrednosti u odgovarajući opseg koji odgovara realnim vrednostima vlažnosti zemljišta. Odziv senzora koji je postavljen na parceli Borovnica Kragujevac poseduje znatno više vrednosti u poređenju sa ostalim parcelama, a razlog tome jeste taj da se vrednosti za vlažnost na datoj parceli unutar dostupne baze podataka nalaze u opsegu i formatu pogodnom za sistem za komunikaciju, te ne odgovaraju fizičkoj prirodi date promenljive. Stoga, prvi korak predstavlja transformaciju svih vrednosti u identičan opseg. Primer transformacije datih vrednosti prikazan je na Slici 7, gde su vrednosti transformisane u opseg od 0 do 100%.



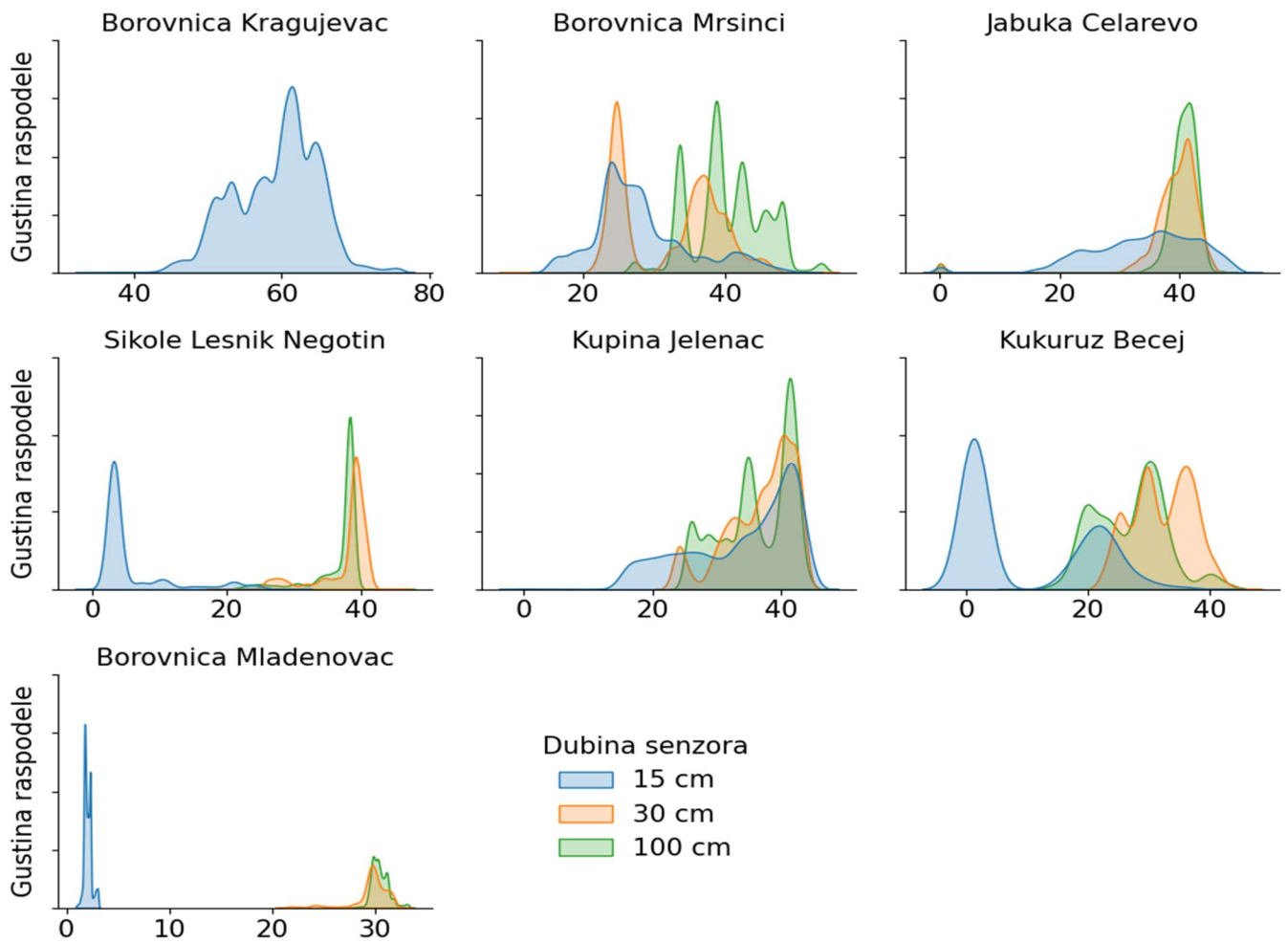
## Transformacija vlažnosti zemljišta u odgovarajući opseg (0-100%)



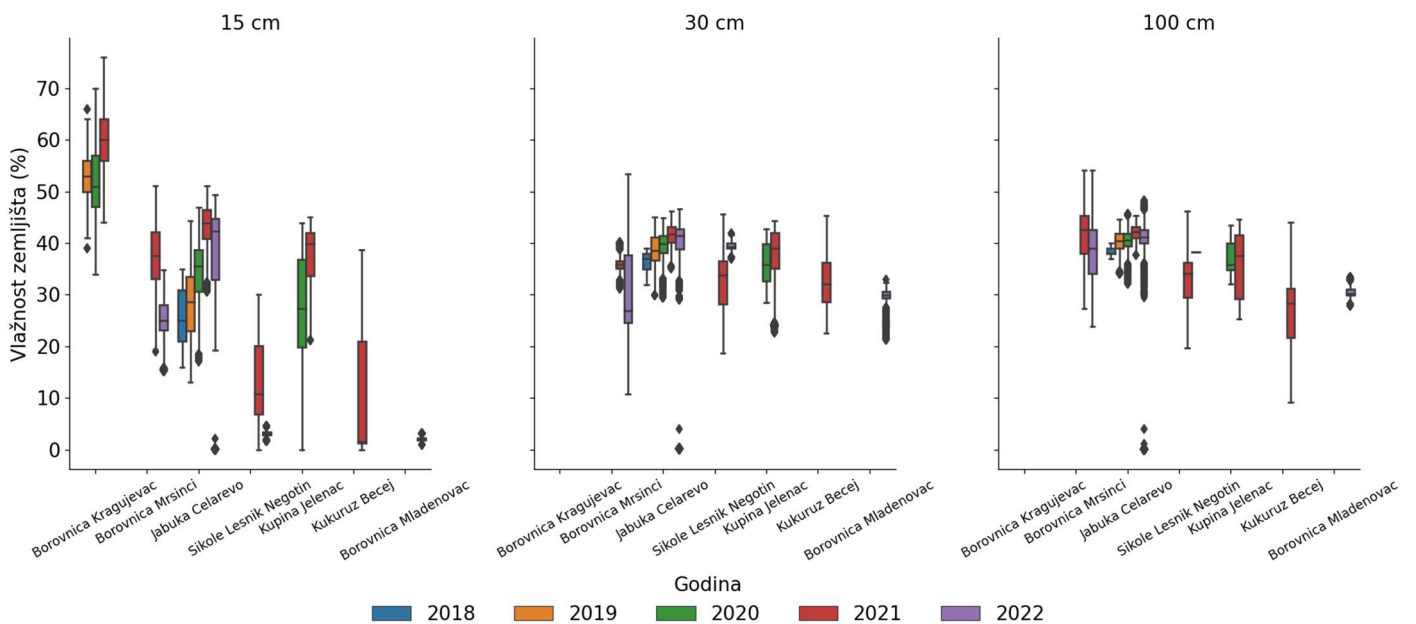
Slika 7. Primer transformacije sistemskih vrednosti očitavanja senzora u opseg koji odgovara fizičkoj prirodi date promenljive.

### Analiza distribucije podataka

Radi boljeg razumevanja i lakše kontrole skupa podataka, analizirana je distribucija vrednosti za sve dostupne parametre, što predstavlja veoma bitan faktor u daljoj analizi razvoja modela mašinskog učenja. Primer distribucije vrednosti vlažnosti zemljišta za sve parcele gde je ta informacija dostupna prikazan je na Slici 8. Vrednosti očitavanja senzora prikazane su na dubinama od 15, 30 i 100 cm, osim za borovnicu koja se gaji u supstratnoj smeši gde je senzor za vlažnost bio dostupan samo na jednoj dubini. Na osnovu Slike 8, moguće je primetiti da se rezultujuće vrednosti na parceli Borovnica Kragujevac nakon transformacije kreću u opsegu od 50 do 70%, te su malo više u poređenju sa ostalim parcelama, što je karakteristično za proces proizvodnje borovnica u saksiji. Pored toga, moguće je primetiti da se vlažnost zemljišta na dubini od 15 cm na parcelama u Negotinu, Bečeju i Mladenovcu kreće oko znatno nižih vrednosti u poređenju sa ostalim parcelama. Razlog tome jeste pogrešna postavka senzora koji se nalazi veoma blizu površine zemljišta, te daje irelevantna očitavanja vlažnosti. Iz tog razloga, očitavanja senzora za vlažnost postavljenog na dubini od 30 cm (tamo gde je ta informacija dostupna) se dalje koriste za obuku modela. Kako bi se lakše identifikovale iregularne vrednosti očitavanja senzora u vidu ekstremno visokih ili ekstremno niskih vrednosti, a koji su rezultat povremenih grešaka u radu senzora ili komunikacije sa baznom stanicom, izvršena je dodatna vizuelizacija distribucije vrednosti parametara i prikazana je na Slici 9.



Slika 8. Prikaz distribucije vrednosti vlažnosti zemljišta individualno za sve parcele.



Slika 9. Dodatna analiza distribucije vrednosti vlažnosti zemljišta u cilju identifikacije potencijalnih grešaka u radu senzora.



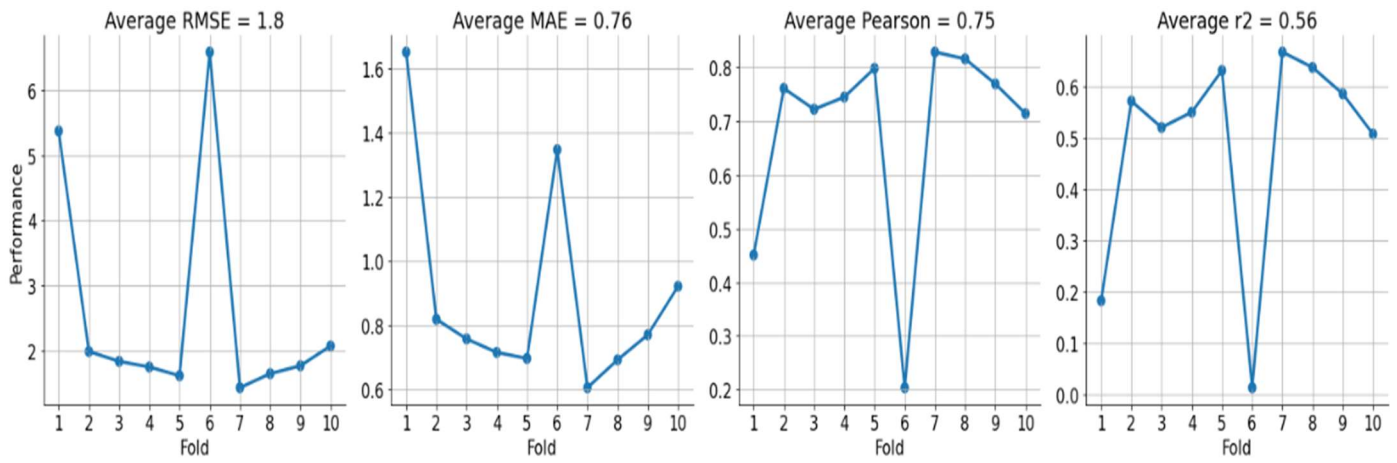
## 4. Obuka modela

Realizovano softversko rešenje ima za cilj da na osnovu postojećih parametara o poljoprivrednim parcelama donese odluku o optimalnom vremenu navodnjavanja kako bi se vlažnost zemljišta podigla sa trenutne do željene vrednosti bez prekomerne potrošnje vode. Nakon predobrade podataka, potrebno je obučiti model mašinskog učenja na relevantnoj bazi podataka, kako bi na osnovu datih informacija model crpio znanje, odnosno pronašao nelinearne relacije između ulaznih podataka i izlazne promenljive, te u budućnosti donosio precizne odluke o optimalnom vremenu navodnjavanja različitih poljoprivrednih kultura.

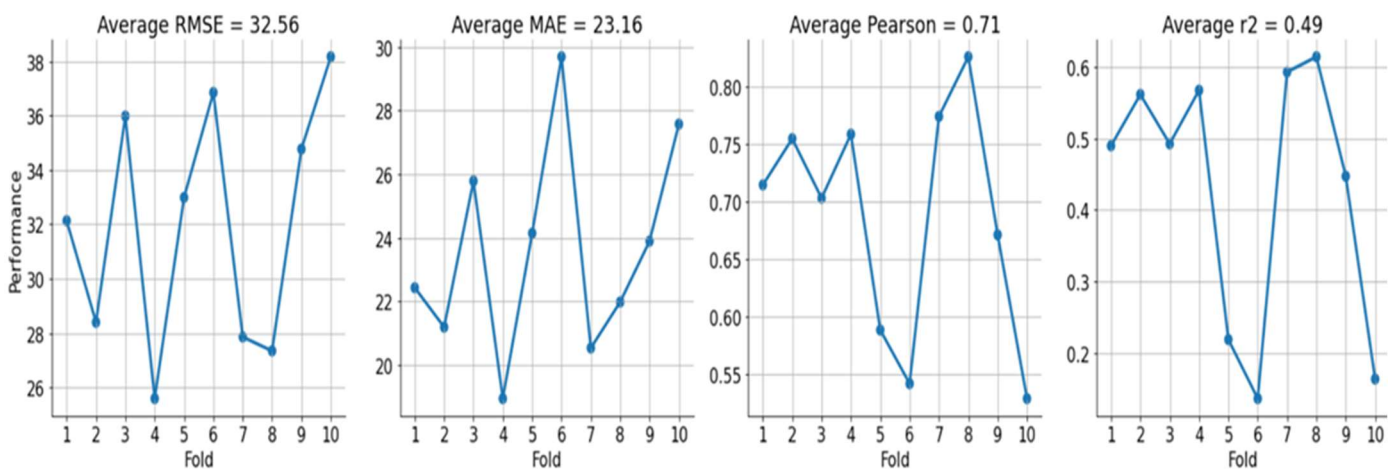
U okviru analize sprovedene za razvoj ovog tehničkog rešenja korišćeno je nadgledano učenje, gde su za ulazne parametre modela korišćeni meteorološki parametri, odnosno, vrednosti minimalne i maksimalne temperature, kao i ukupne količine padavina u toku dana, podaci o zemljištu, te informacije o protoku vode korišćenih sistema za navodnjavanje. Sa druge strane, izlaznu promenljivu modela mašinskog učenja, odnosno vrednost koju model predikuje, predstavlja optimalno vreme navodnjavanja. S obzirom na znatnu razliku u obrascima navodnjavanja poljoprivrednih kultura koje se nalaze u supstrantnoj smeši u saksiji i biljaka koje se gaje u zemljištu, postoji razlika u donošenju odluke o vremenu navodnjavanja između ta dva slučaja. Merena vlažnost se povećava znatno brže ukoliko se kultura nalazi u supstratnoj smeši što je direktan razlog kraćih ciklusa navodnjavanja datih kultura, te je iz tog razloga veoma bitno donositi odluku o trajanju svakog pojedinačnog navodnjavanja. Za razliku od toga, kulture koje se nalaze u zemljištu zahtevaju duži vremenski interval navodnjavanja, što ukazuje na činjenicu da je dovoljno donositi odluku na dnevnom nivou, odnosno, da softversko rešenje daje kumulativnu procenu dužine trajanja navodnjavanja u toku jednog dana.

Za potrebe ovog tehničkog rešenja korišćene su Mašine na bazi vektora nosača, odnosno eng. Support Vector Machine (SVM). Mašine na bazi vektora nosača predstavljaju nadgledanu tehniku neparametarskog statističkog učenja sa dobrom matematičkim podlogom, a koje su veoma često pokazivale veoma visoke performanse prilikom rešavanja klasifikacionih i regresionih problema u oblasti precizne poljoprivrede. Glavni razlog zašto je korišćen baš taj algoritam jeste njihova sposobnost generalizacije [25] čak i sa ograničenim brojem uzoraka za obuku, što je uobičajeno ograničenje za aplikacije u poljoprivredi. Pored toga, korišćenjem sintetički generisanih ulaznih podataka, eksperimentalno je dokazano da dati algoritam generiše smislene rezultate prilikom predikcije na osnovu uzorka čije vrednosti se nalaze izvan opsega vrednosti iz skupa za obuku (što je često slučaj u ekstremno sušnim, odnosno, kišnim sezonama proizvodnje). Pored toga, testirana su još dva algoritma mašinskog učenja bazirana na korišćenju stabala odluke, naime eng. Random Forest i eng. XGBoost algoritmi. Poređenje između predloženog rešenja i datih algoritama dato je u Tabeli 2, te na Slici 12.

Performanse obučenog modela mašinskog učenja za potrebe donošenja odluke o optimalnom vremenu navodnjavanja estimirane su u vidu metrika za ocenu kvaliteta modela mašinskog učenja tokom deset ciklusa treniranja na različitim delovima baze podataka, kako bi se analizirale performanse algoritma usled promene vrednosti ulaznih parametara. Drugim rečima, u fazi validacije predloženi modeli su obučeni na  $\frac{9}{10}$  od ukupnog broja uzoraka, te validirani na  $\frac{1}{10}$  ukupnog broja uzoraka odgovarajućeg medijuma. Korišćene metrike za evaluaciju performansi su kvadratni koren srednje kvadratne greške, srednja apsolutna greška, Pirsonova korelacija stvarnih i predviđenih vrednosti, kao i koeficijent determinacije  $R^2$ . Na Slici 10 prikazane su performanse predikcije modela za pojedinačna zalivanja poljoprivrednih kultura gajenih u supstratnoj smeši, dok Slika 11 predstavlja preporuku za kumulativno zalivanje u toku jednog dana za poljoprivredne kulture gajene u zemljištu.



Slika 10. Metrike za ocenu kvaliteta predikcije modela optimalnog pojedinačnog vremena navodnjavanja za biljke gajene u supstratnoj smeši.



Slika 11. Metrike za ocenu kvaliteta predikcije modela optimalnog kumulativnog vremena navodnjavanja u toku jednog dana za biljke gajene u zemljištu.

Grafički prikaz performansi (Slika 10 i 11) za oba procesa proizvodnje ukazuje na to da je prosečna apsolutna greška za preporuku dužine pojedinačnih zalivanja biljaka gajenih u supstratu svedena na 45 sekundi, dok je prosečna apsolutna greška za preporuku dužine kumulativnog zalivanja biljaka gajenih u zemljištu smanjena na svega 23 minuta u toku jednog dana. Na osnovu prikazanih grafika moguće je doneti zaključak da algoritam daje veoma zadovoljavajuće rezultate, te je pogodan za korišćenje u realnom okruženju.

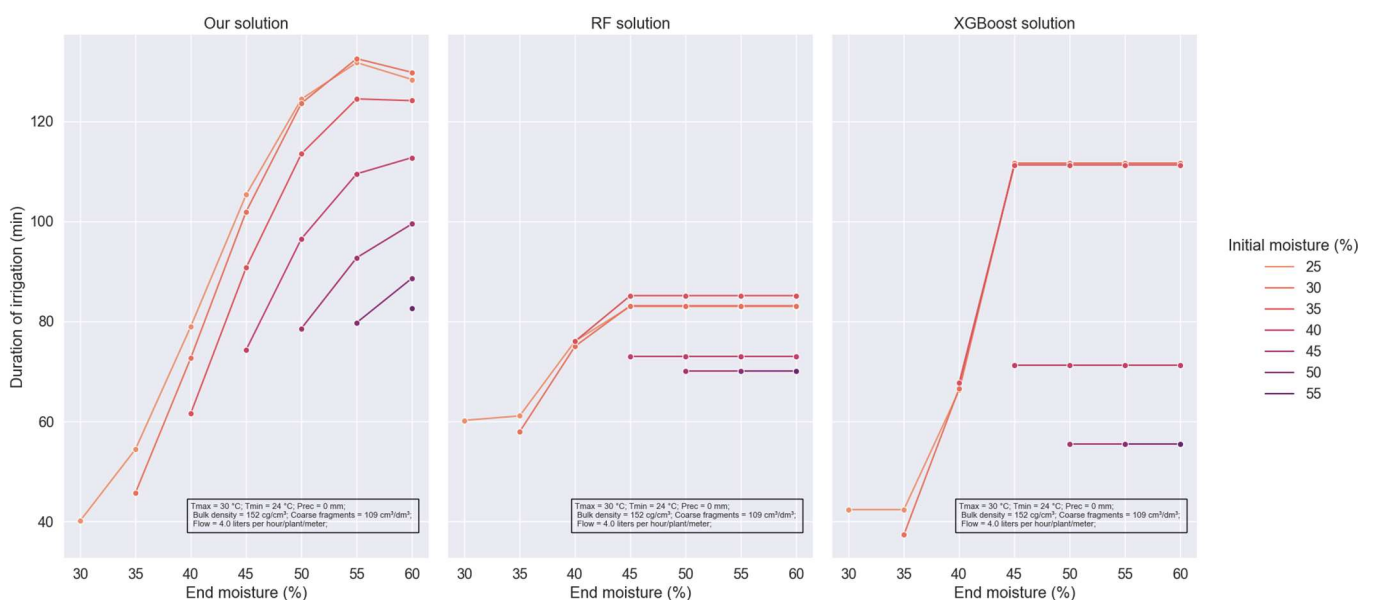
Medijum	Algoritmi	RMSE	MAE	Pearson	R2
Zemljište	Naše rešenje	32.56	23.16	0.71	0.49
	RF	30.93	23.1	0.73	0.52
	XGBoost	31.41	24.49	0.67	0.43

	Naše rešenje	1.8	0.76	0.75	0.56
Supstrat	RF	1.89	0.95	0.73	0.52
	XGBoost	1.88	0.98	0.74	0.54

Tabela 2. Poređenje performansi različitih modela mašinskog učenja za potrebe donošenja odluke o optimalnom vremenu navodnjavanja za biljke gajene u zemljištu i supstratu.

U okviru Tabele 2 prikazane su performanse različitih modela mašinskog učenja za potrebe predikcije optimalnog vremena navodnjavanja biljaka. Za sva tri modela su inicijalno optimizovani hiperparametri, te su estimirane performanse korišćenjem različitih metrika za ocenu kvaliteta predikcije tokom deset ciklusa treniranja (eng. 10-fold cross validation) na različitim delovima baze podataka. U tabeli se može videti da XGBoost algoritam konzistentno daje najslabije rezultate predikcije na uzorcima generisanim od strane senzora u zemljištu (osim u slučaju RMSE metrike), dok je *RF* algoritam pokazao najbolje performanse za dati medijum. Mašine na bazi vektora nosača prikazale su zanemarljivo slabije performanse u poređenju sa *RF* algoritmom. U slučaju uzoraka generisanih od strane senzora postavljenih u supstratu, Mašine na bazi vektora nosača konzistentno su pokazale najbolje performanse predikcije u poređenju sa ostala dva algoritma.

Iako se *RF* i *XGBoost* modeli veoma uspešno koriste u oblasti poljoprivrede i često pokazuju veoma visoke performanse na skupu za obuku, odnosno validacionom skupu (što je takođe bio slučaj i u okviru ove analize), oni nemaju mogućnost da generišu smislene rezultate prilikom predikcija na osnovu uzorka čije se vrednosti nalaze van opsega ulaznih vrednosti skupa za obuku, što je često slučaj u ekstremno sušnim, odnosno, kišnim sezonama proizvodnje. Korišćenjem sintetički generisanih ulaznih podataka, eksperimentalno je prikazana gorenavedena tvrdnja prilikom predikcije optimalnog vremena navodnjavanja za biljke gajene u zemljištu što dokazuju grafici prikazani na Slici 12.



Slika 12. Komparativna analiza različitih modela mašinskog učenja na sintetičkim podacima, gde y-osa predstavlja preporuku modela za potrebno vreme navodnjavanja, x-osa krajnju vlažnost, a različite linije predstavljaju različite početne vlažnosti zemljišta.

Na Slici 12 prikazane su performanse modela korišćenjem sintetički generisanih ulaznih podataka, gde su na x-osi date različite ulazne vrednosti krajnje vlažnosti, dok različite linije predstavljaju različite početne vlažnosti zemljišta. Y-osa predstavlja preporuku modela za potrebno vreme navodnjavanja. Varijacijom ulaznih parametara moguće je videti različite obrasce preporuka od strane predloženog rešenja, RF i XGBoost algoritma. U okviru crnog pravougaonika, prikazani su i ostali ulazni parametri korišćeni za predikciju modela, koji se podudaraju sa podacima na meteogramu prikazanim na Slici 14 (Maksimalna i minimalna temperatura i količina padavina), te odgovaraju vrednostima parametara zemljišta prikazanim u okviru Tabele 1 (zapreminska masa i relativna zapremina grubog dela zemljišta).

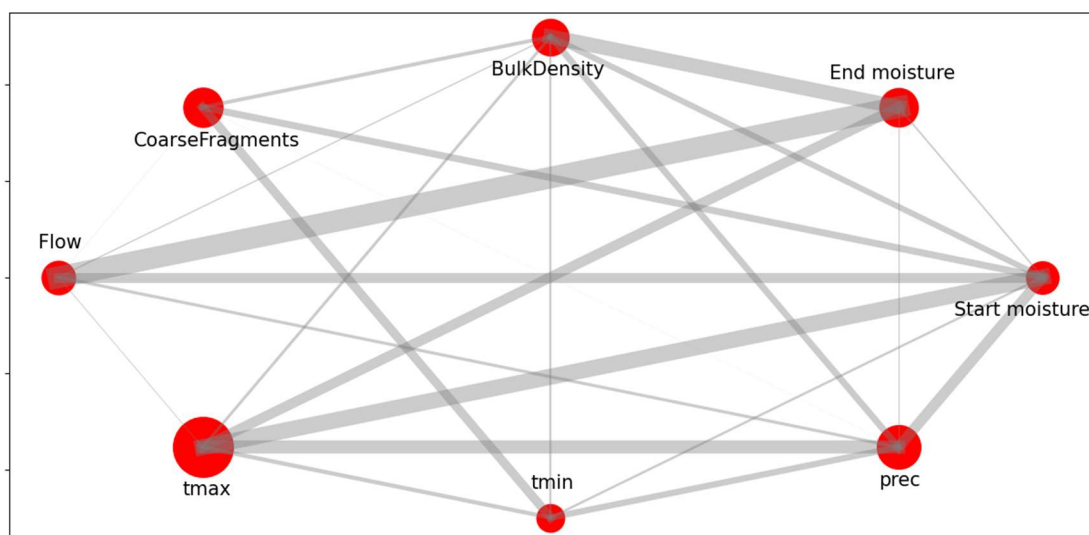
Pomoću date analize eksperimentalno je dokazano da, za razliku od ostalih algoritama, predložene rešenje u okviru ovog tehničkog rešenja generiše smislene rezultate prilikom predikcije na osnovu datih uzorka. Na osnovu prikazanih rezultata, moguće je primetiti da za razliku od Mašine na bazi vektora nosača, druga dva algoritma uvek daju približno istu vrednost predikcije nezavisno od početne vlažnosti zemljišta (osim u slučajevima kada su početne vrednosti veće od 50 %). Pored toga, u slučaju kada je krajnja vlažnost zemljišta veća od 45 %, RF i XGBoost konstantno daju istu vrednost predikcije. Razlog tome jeste što su vrednosti vlažnosti zemljišta uglavnom grupisane u opsegu od 30 do 50 % što je prikazano i na Slici 8 kada je data distribucija vrednosti odziva senzora za vlažnost. Na osnovu toga moguće je doneti zaključak da dati algoritmi imaju tendenciju da daju prosečnu vrednost predikcije (prethodno naučenu na skupu za obuku) u cilju smanjenja greške nezavisno od ulaznih vrednosti podataka iz test skupa, što ne odgovara realnom stanju u oblasti.

Analizom rezultata nešeg rešenja, evidentno je da se povećavanjem vrednosti krajnje vlažnosti, naravno, povećava i vreme potrebno za navodnjavanje zemljišta. Dodatno se sa grafika može videti da što je početna vlažnost zemljišta veća, potrebno je više vremena kako bi se vlažnost povećala za npr. 5 %. Razlog tome leži u činjenici da zemljište koje je bogato vodom, teže usvaja dodatnu količinu vode u poređenju sa suvim zemljištem, te je potreban duži period navodnjavanja u prvom slučaju. Datu karakteristiku je najlaške primetiti kada se posmatraju početne tačke za različite inicijalne vrednosti vlažnosti zemljišta. Takođe, može se videti i da kada se navodnjavanje već vrši određeno vreme, potrebno je manje vremena da se vlažnost zemljišta poveća sa npr. 45 % na 50 %, nego kada se sistem za navodnjavanje tek uključi pri početnoj vlažnosti zemljišta od 45 %. Jedan od razloga može biti i nesavršenost sistema za navodnjavanje, kome je potrebno određeno vreme da postigne definisani radni pritisak u kapljačima.

U cilju interpretabilnosti modela mašinskog učenja, sprovedena je Sobolova analiza osetljivosti kako bi se objasnio pojedinačni i združeni uticaj obeležja korišćenih za obuku datog modela. Data analiza predstavlja tehniku koja razlaže ukupnu varijansu izlazne promenljive na zbir pojedinačnih varijansi ulaznih promenljivih i varijansi njihovih kombinacija [26]. Sobolovi indeksi osetljivosti su predstavljeni pomoću indeksa prvog reda koji se koriste za procenu uticaja pojedinačnih faktora i indeksa drugog reda, koji odgovaraju parnoj interakciji između faktora. Na taj način kvantifikovan je individualni i združeni uticaj svakog od obeležja u procesu predikcije modela. Ukupni uticaj jednog obeležja, odnosno, ukupan indeks osetljivosti  $S_T$  se izračunava kao [27]:

$$S_T = S_i + S_{I_i}$$

Gde  $S_i$  predstavlja indeks osetljivosti prvog reda, odnosno, individualni uticaj obeležja  $i$ , dok  $S_{I_i}$  predstavlja indeks interakcije, odnosno združeni uticaj obeležja  $i$  u kombinaciji sa ostalim obeležjima. Na Slici 13 prikazan je rezultat Sobolove analize osetljivosti gde crveni krugovi, odnosno njihov prečnik predstavlja relativni ukupan uticaj obeležja  $S_T$ , dok širina sive linije koja povezuje dva obeležja predstavlja njihov zajednički uticaj prilikom predikcije modela.



Slika 13. Estimacija uticaja korišćenih obeležja prilikom predikcije modela korišćenjem Sobolove analize osetljivosti.

Na osnovu slike moguće je dati zaključak da na predikciju optimalnog vremena navodnjavanja najveći uticaj ima maksimalna temperatura tokom dana, što svakako ima smisla s obzirom na to da veoma visoke temperature zahtevaju i dovoljnu količinu vode za evapotranspiraciju biljaka, u tom slučaju sprečavajući stres kod biljaka izazvan zbog nedostatka vode. Pored toga, evidentno je da pedološki parametri poseduju značajan uticaj na potrebe navodnjavanja koji definišu vodno-fizičke osobine zemljišta kao što su vodopropustljivost, vododrživost, kapilarnost, te sposobnost isparavanja datog medijuma u kom se gaji biljka. Pored toga, krajnja vlažnosti i količina padavina takođe imaju veliki uticaj na krajnju preporuku modela. Takođe je moguće primetiti da protok vode korišćenog sistema za navodnjavanje zajedno sa definisanom krajnjom vrednošću vlažnosti u paru poseduje značajan uticaj na dužinu navodnjavanja. Razlog tome jeste činjenica da i jedan i drugi parametar direktno utiču na krajnji ishod, iako jedan parametar utiče direktno proporcionalno, dok drugi parametar utiče obrnuto proporcionalno na krajnju preporuku. Takođe, vidljiva je veza između maksimalne temperature i padavina s obzirom na to da kada su ekstremno visoke temperature, u većini slučajeva nema kiše na ovom području, te nastaju sušni periodi. Odnosno, u slučaju padavina, maksimalna temperatura tokom dana je uglavnom malo niža te biljke troše manju količinu vode kroz proces evapotranspiracije, kao što je to slučaj u sušnom periodu. Zapreminska masa predstavlja fizičku osobinu zemljišta koja utiče na to koliko se voda zadržava u datom medijumu, što naravno ima uticaj i na maksimalnu vlažnost koja može da se postigne u zemljištu, što je prikazano na grafiku kroz vezu između zapreminske mase i krajnje vlažnosti. Naravno, vidljiva je i veza između maksimalne temperature i početne vlažnosti, s obzirom na to da visoke temperature direktno utiču na smanjenje vlažnosti u zemljištu.

## 5. Pokretanje Modula za davanje preporuka za optimalno navodnjavanje

Ovaj modul omogućava poljoprivrednim proizvođačima da na osnovu očitavanja senzora, vremenske prognoze, informacija o zemljištu, tipa proizvodnje i konfiguracije uređaja za navodnjavanje, dobiju preporuku za navodnjavanje u svakoj od menadžment zona, odnosno odrede količinu vode optimalnu za rast i razvoj useva.

Koraci 1-2, koji se odnose na analizu zemljišta i postavljanje senzora (Slika 1), sprovode se samo jednom pri postavljanju sistema za navodnjavanje, uz činjenicu da je u zavisnosti od tipa žetve/berbe (ručno/mašinski) u nekim slučajevima senzore potrebno izvaditi iz zemlje, te ponovo instalirati nakon žetve/berbe. Koraci 3-5, koji se odnose na proširenje baze podataka za doobučavanje modela u cilju dodatnog smanjenja greške, kao i njegovoj generalizaciji, ponavljaju se na kraju svake sezone.

Što se tiče Modula za dobijanje preporuke za optimalno navodnjavanje, pre donošenja odluke o optimalnom navodnjavanju, potrebno je sprovesti sledeće:

- Definisati tip proizvodnje (zemljište ili supstratna smeša)
- Definisati konfiguraciju uređaja za navodnjavanje (protok vode u sistemu)
- Parsiranje podataka o zemljištu<sup>1</sup>
- Parsiranje podataka vremenske prognoze
- Definisati željenu vlažnost zemljišta/supstratne smeše

Prve tri stavke potrebno je izvršiti samo jednom, s obzirom na to da dati parametri nisu promenljivi tokom sezone. Treću stavku, odnosno, parsiranje podataka o zemljištu, isključivo zavisi od tipa proizvodnje, te se ne izvršava ukoliko se poljoprivredna kultura gaji u supstratnoj smeši u saksiji. Parsiranje podataka vremenske prognoze se izvršava kako bi model mašinskog učenja imao uvid u to koja će biti maksimalna i minimalna temperatura tokom dana, odnosno, koja količina padavina je očekivana na proizvodnoj parceli. Ukoliko se poljoprivredna kultura gaji unutar plastenika, ukupna količina padavina se zanemaruje. Takođe, ukoliko se temperatura unutar plastenika drži u određenom opsegu, te je nezavisna od spoljašnje temperature, za date parametre koristi se minimalna i maksimalna vrednost iz definisanog opsega. Detaljniji opis parsiranja podataka vremenske prognoze dat je u narednom potpoglavlju.

### **Parsiranje podataka vremenske prognoze**

Podaci vremenske prognoze iskorišćeni su za određivanje meteoroloških parametara, odnosno, predikciju ukupne količine padavina, kao i minimalne i maksimalne temperature u toku dana zalivanja. Dati podaci se mogu preuzeti od strane bilo kog meteorološkog zavoda, ali se u ovom slučaju preuzimaju od Norveškog meteorološkog instituta, odnosno sa [www.yr.no](http://www.yr.no), koji daje lokalizovanu vremensku prognozu za definisanu *GPS* lokaciju sa prostornom rezolucijom od 2 x 2 km. Za slučaj kada se parcela nalazi u plasteniku, količina padavina se zanemaruje, odnosno, vrednost datog parametra se postavlja na nulu. Na Slici 14 dat je jedan primer lokalizovane vremenske prognoze, čiji su podaci korišćeni za potrebe primera preporuke optimalnog perioda navodnjavanja od strane predloženog rešenja (Slika 15), te u okviru implementacije modela.

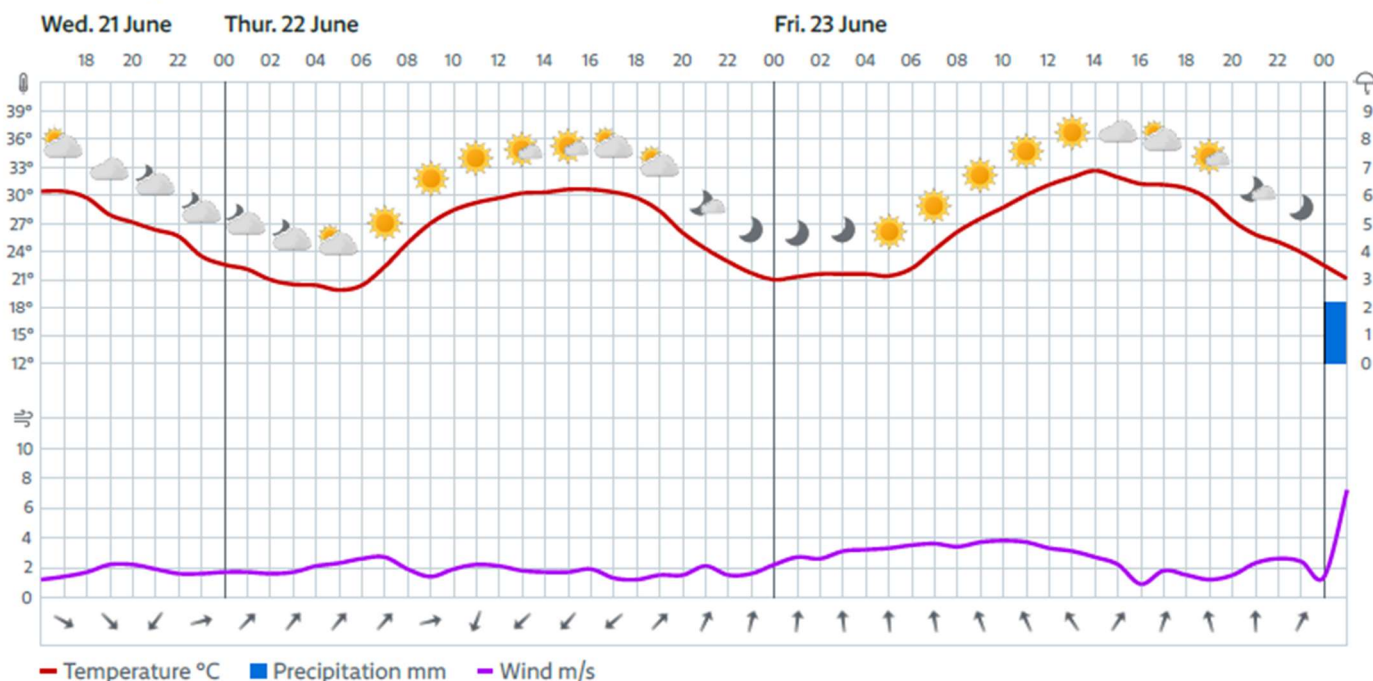
---

<sup>1</sup> Ukoliko se poljoprivredna kultura gaji u zemljištu.



# Weather forecast for Kragujevac

## Meteogram 21 June at 14:00 – 30 June at 00:00



## Long range forecast 21 June – 28 June

	00-12	12-00	Max/min temperature	Precipitation mm	Max/min wind m/s
Wed. 21 June			30° / 24°		2 / 1

Slika 14. Primer lokalizovane vremenske prognoze za jednu od oglednih poljoprivrednih parcela.

Željena vlažnost definiše se od strane korisnika pre svakog procesa navodnjavanja, te na osnovu date informacije i svih relevantnih gorepomenutih parametara, kao i trenutne vlažnosti očitavanja senzora, model daje preporuku o optimalnom vremenu navodnjavanja. Gornju i donju graničnu vrednost promene vlage moguće je podesiti i samo jednom prema poljoprivrednoj kulturi koja se navodnjava, gde se npr. za početnu vrednost može definisati vlažnost na donjoj kritičnoj vrednosti određene poljoprivredne kulture i kada je zalivanje neophodno, dok se za krajnju vrednost definiše optimalna vlažnost na osnovu ekspertskeg znanja agronoma. Korišćenjem ovakve predikcije moguće je precizno kontrolisati vlažnost u zemljištu u toku dužeg vremenskog perioda i odrediti optimalno vreme navodnjavanja kako bi se vlažnost kontrolisala u optimalnim granicama, te tako optimizovali resursi i sprečila pojava preterano vlažnog ili suvog zemljišta za potrebe određene poljoprivredne kulture. Primer predikcije mašinskog modela prikazan je na Slici 15 za biljke gajene u supstratnoj smeši, dok je na Slici 16 dat primer davanja preporuke optimalnog vremena navodnjavanja za biljke gajene u zemljištu. U prvom slučaju (Slika 15), model daje preporuku za pojedinačno vreme navodnjavanja, s obzirom na to da se merena vlažnost menja znatno brže ukoliko se kultura nalazi u supstratnoj smeši što je direktan razlog kraćih ciklusa navodnjavanja datih kultura, te je iz tog razloga veoma bitno donositi odluku o trajanju svakog pojedinačnog navodnjavanja. Sa druge strane, kulture koje se nalaze u zemljištu zahtevaju duži vremenski interval navodnjavanja te iz tog razloga softversko rešenje daje kumulativnu procenu dužine trajanja navodnjavanja u toku jednog dana. U slučaju supstrata vrednosti odziva senzora za vlažnost su više u poređenju sa vrednostima generisanim u zemljištu, što je karakteristično za proces proizvodnje borovnica u saksiji (Slika 8). Minimalna i maksimalna temperatura, te količina padavina

preuzeti su sa [www.yr.no](http://www.yr.no) korišćenjem lokalizovane vremenske prognoze za definisane GPS lokacije, dok su zapreminska masa i relativna zepremina grubog dela zemljišta (Slika 16) preuzete iz SoilGrids baze podataka. Protok vode u sistemu je definisan od strane proizvođača i isti je u oba slučaja.

```
Parcela: Borovnica Kragujevac
Datum: 21.06.2023.
Medijum: Supstrat
Početna vlažnost = 60.23%
Željena vlažnost = 65.57%
Minimalna & Maksimalna temperatura tokom dana 24-30 °C & Ukupna količina padavina = 0 mm
Protok vode u sistemu za navodnjavanje = 4 litre po satu/biljci/metru
-----
8 minuta i 25 sekundi je optimalan period navodnjavanja za datu proizvodnu parcelu!
```

Slika 15. Primer preporuke optimalnog perioda navodnjavanja od strane modela mašinskog učenja za poljoprivrednu kulturu gajenu u saksiji u supstratnoj smeši.

```
Parcela: Kupina Jelenac
Datum: 21.06.2023.
Medijum: Zemljište
Početna vlažnost = 35.31%
Željena vlažnost = 55.56%
Zapreminska masa = 152 cg/cm3 & Relativna zapremina grubog dela zemljišta = 104 cm3/dm3
Minimalna & Maksimalna temperatura tokom dana 18-32 °C & Ukupna količina padavina = 0 mm
Protok vode u sistemu za navodnjavanje = 4 litre po satu/biljci/metru
-----
125 minuta i 29 sekundi je optimalan period navodnjavanja za datu proizvodnu parcelu!
```

Slika 16. Primer preporuke optimalnog perioda navodnjavanja od strane modela mašinskog učenja za poljoprivrednu kulturu gajenu u zemljištu.

## 6. Implementacija

Za potrebe testiranja rada predloženog tehničkog rešenja korišćen je programski alat *Postman* [28]. *Postman* poseduje korisnički prilagođeno grafičko okruženje pomoću kojeg je moguće slanje *HTTP* zahteva i predstavlja zgodan alat za testiranje aplikativnih rešenja, u ovom slučaju, predloženog tehničkog rešenja u produkcionom okruženju. Primer preporuke optimalnog perioda navodnjavanja od strane modela mašinskog učenja u produkcionom okruženju (*Postman*) za poljoprivrednu kulturu gajenu u saksiji u supstratnoj smeši dat je na Slici 17, odnosno Slici 18 za poljoprivrednu kulturu gajenu u zemljištu. Kako bi testiranje bilo moguće, originalni *Python* kod prilagođen je pomoću *Flask* [29] veb aplikativnog paketa za *Python* koji predstavlja kolekciju biblioteka i modula koji omogućavaju kontrolisano okruženje za puštanje *Python* koda, dok je celokupan kod zapakovan u *Docker* kontejner radi neometanog povezivanja sa ostalim delovima sistema na serveru. Zbog obavezujućeg ugovora između Instituta BioSens i Smart Watering kompanije mora se održati poverljivost određenih podataka te je to razlog zašto nije podeljen celokupan skup informacija koji se koristi od strane kompanije. Stoga, u okviru prikaza testa aplikativnog rešenja date su informacije koje ne narušavaju poverljivost kompanije i korisnika date aplikacije.

http://127.0.0.1:5000/v1/substrate

POST http://127.0.0.1:5000/v1/substrate

Params Authorization Headers (8) Body Pre-request Script Tests Settings

none form-data x-www-form-urlencoded raw binary GraphQL JSON

```
1
2     ... "initial_moisture": 60.23,
3     ... "end_moisture": 65.57,
4     ... "flow": 4.0,
5     ... "tmax": 30,
6     ... "tmin": 24,
7     ... "prec": 0
8
```

Body Cookies Headers (4) Test Results

Pretty Raw Preview Visualize JSON

```
1
2     "Date": "21.06.2023.",
3     "Parcel": "Borovnica Kragujevac",
4     "Type": "Substrate",
5     "minutes": 8,
6     "seconds": 25
7
```

Slika 17. Primer testa tehničkog rešenja u produkcionom okruženju za biljke gajene u supstratnoj smeši u plasteniku.

http://127.0.0.1:5000/v1/soil

POST http://127.0.0.1:5000/v1/soil

Params Authorization Headers (8) Body Pre-request Script Tests Settings

none form-data x-www-form-urlencoded raw binary GraphQL JSON

```
1
2     ... "initial_moisture": 35.31,
3     ... "end_moisture": 55.56,
4     ... "flow": 4.0,
5     ... "bulk_density": 152,
6     ... "coarse_fragments": 104,
7     ... "tmax": 32,
8     ... "tmin": 18,
9     ... "prec": 0
10
```

Body Cookies Headers (4) Test Results

Pretty Raw Preview Visualize JSON

```
1
2     "Date": "21.06.2023.",
3     "Parcel": "Kupina Jelenac",
4     "Type": "Soil",
5     "minutes": 125,
6     "seconds": 29
7
```

Slika 18. Primer testa tehničkog rešenja u produkcionom okruženju za biljke gajene u zemljištu.

## **Literatura:**

1. Gupta, A., Mishra, S., Bokde, N. and Kulat, K., 2016. Need of smart water systems in India. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(4), pp.2216-2223.
2. <http://www.unwater.org/water-facts/climate-change/>
3. Liemberger, R. and Wyatt, A., 2019. Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), pp.831-837.
4. Bank, W. The World Bank Annual Report 2020; The World Bank: Washington, DC, USA, 2020
5. <http://www.oecd.org/agriculture/water-use-in-agriculture.htm>
6. <https://water.usgs.gov/edu/wuir.html>
7. Cvijanović, D., Mihailović, B. and Paraušić, V., 2015. Navodnjavanje u funkciji razvoja poljoprivredne proizvodnje u Srbiji. *Zbornik naučnih radova Agroekonomik*, 1(21), pp.193-200.
8. Özerol, G., Bressers, H., Coenen, F. (2012). Irrigated agriculture and environmental sustainability: an alignment perspective. *Environmental Science & Policy*, 23, 57-67.
9. Mačkić, K. (2016): Vodno fizička svojstva karbonatnog černozema u uslovima navodnjavanja povrća. Doktorska disertacija, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad
10. Rosengrant, M. W., Ringler-Claudia, Tingju, Z. (2009). Water for Agriculture: Maintaining Food Security under Growing Scarcity. *Annual Review of Environmental Resources*, 34, 205-222.
11. Paliwal, V., Ghare, A.D., Mirajkar, A.B., Bokde, N.D. and Feijóo Lorenzo, A.E., 2019. Computer modeling for the operation optimization of mula reservoir, upper Godavari Basin, India, using the Jaya algorithm. *Sustainability*, 12(1), p.84.
12. Pandey, P., Bokde, N.D., Dongre, S. and Gupta, R., 2021. Hybrid models for water demand forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(2), p.04020106.
13. Zhao, W., Lin, S., Han, J., Xu, R. and Hou, L., 2017, December. Design and implementation of smart irrigation system based on LoRa. In 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps) (pp. 1-6). IEEE.
14. Kodali, R.K., Kuthada, M.S. and Borra, Y.K.Y., 2018, December. LoRa based smart irrigation system. In 2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA) (pp. 1-5). IEEE.
15. Goldstein, A., Fink, L., Meitin, A. et al. 2018. Applying machine learning on sensor data for irrigation recommendations: revealing the agronomist's tacit knowledge. *Precision Agric* 19, 421–444. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9527-4>
16. Chang, Y.C., Huang, T.W. and Huang, N.F., 2019, September. A machine learning based smart irrigation system with LoRa P2P networks. In 2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS) (pp. 1-4). IEEE.
17. Jimenez, A.F., Cardenas, P.F., Jimenez, F., Ruiz-Canales, A. and López, A., 2020. A cyber-physical intelligent agent for irrigation scheduling in horticultural crops. *Computers and electronics in agriculture*, 178, p.105777.
18. Goap, A., Sharma, D., Shukla, A.K. and Krishna, C.R., 2018. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. *Computers and electronics in agriculture*, 155, pp.41-49.
19. Saikai, Y., Peake, A. and Chenu, K., 2023. Deep reinforcement learning for irrigation scheduling using high-dimensional sensor feedback. arXiv preprint arXiv:2301.00899.
20. Yang, Y., Hu, J., Porter, D., Marek, T., Heflin, K. and Kong, H., 2020. Deep reinforcement learning-based irrigation scheduling. *Transactions of the ASABE*, 63(3), pp.549-556.
21. P.P.L. Regtien, „Humidity sensors,— Meas. Sci. Technol., vol. 23, pp. 1-2, 2012.
22. L. Chow, Z.Xing, H.W. Rees, F. Meng, „Field performance of nine soil water content sensors on a Sandy Loam soil in New Brunswick, Maritime region, Canada,—. *Sensors*, vol. 9, pp. 9398–9413.. 2009.

23. McKinney, Wes. "pandas: a foundational Python library for data analysis and statistics." Python for High Performance and Scientific Computing (2011): 1-9.
24. Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., and Rossiter, D.: SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, SOIL, 7, 217–240, <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>, 2021.
25. Kok, Z.H., Shariff, A.R.M., Alfatni, M.S.M. and Khairunniza-Bejo, S., 2021. Support vector machine in precision agriculture: a review. Computers and Electronics in Agriculture, 191, p.106546.
26. Sobol', I.M., 1993. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. Math. Model. Comput. Exp., 1, p.407.
27. Homma, T. and Saltelli, A., 1996. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. Reliability Engineering & System Safety, 52(1), pp.1-17.
28. Postman: <https://www.getpostman.com/>
29. M Grinberg. 2018. Flask web development: developing web applications with python." O'Reilly Media, Inc."

## 11. Tehnička dokumentacija

U prilogu se nalazi potvrda da se tehničko rešenje koristi od strane Smart Watering Solutions doo, iz Novog Sada, kao i kopija Ugovora o naučno-istraživačkoj i poslovno-tehničkoj saradnji zaključenog između Instituta BioSens i Smart Watering Solutions doo.