

# Praćenje dinamike vlažnosti tla različitim senzorima u navodnjavanom voćnjaku

---

**Stanušić, Ana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /  
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:882530>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-09**



Sveučilište Josipa Jurja  
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet  
agrobiotehničkih  
znanosti Osijek**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical  
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of  
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK**

Ana Stanušić

Diplomski studij Povrćarstvo i cvjećarstvo

**PRAĆENJE DINAMIKE VLAŽNOSTI TLA RAZLIČITIM SENZORIMA U  
NAVODNJAVANOM VOĆNJAKU**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2022.**

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK**

Ana Stanušić

Diplomski studij Povrćarstvo i cvjećarstvo

**PRAĆENJE DINAMIKE VLAŽNOSTI TLA RAZLIČITIM SENZORIMA U  
NAVODNJAVANOM VOĆNJAKU**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2022.**

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK**

Ana Stanušić

Diplomski studij Povrćarstvo i cvjećarstvo

**PRAĆENJE DINAMIKE VLAŽNOSTI TLA RAZLIČITIM SENZORIMA U  
NAVODNJAVANOM VOĆNJAKU**

**Diplomski rad**

Povjerenstvo za ocjenu diplomskog rada:

1. prof. dr. sc. Aleksandar Stanisavljević, član
2. izv. prof. dr. sc. Monika Marković, mentor
3. Dejan Bošnjak, dipl. ing. agr., član

**Osijek, 2022.**

## SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	PREGLED LITERATURE	2
2.1.	Općenito o vodi	2
2.2.	Tlo	3
2.3.	Voda u tlu	4
2.3.1.	Oblici vode u tlu	4
2.3.2.	Kretanje vode u tlu	5
2.4.	Vodne konstante	5
2.5.	Određivanje trenutka početka navodnjavanja	10
2.5.1	Mjerenje sadržaja vode u tlu	12
2.5.2	Direktne metode mjerenja sadržaja vode u tlu	13
2.5.3	Indirektne metode mjerenja sadržaja vode u tlu	14
3.	MATERIJALI I METODE RADA	22
4.	REZULTATI	27
4.1	Vremenske prilike	27
4.2.	Vodna bilanca	29
4.3.	Rezultati usmjeravanja senzora	30
4.4.	Dinamika vlažnosti tla	31
5.	RASPRAVA	38
6.	ZAKLJUČAK	41
7.	LITERATURA	42
8.	POPIS SLIKA	46
9.	POPIS TABLICA I GRAFIKONA	47
10.	SAŽETAK	49
11.	SUMMARY	50
	TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA	
	BASIC DOCUMENTATION CARD	

## 1. UVOD

Planiranjem navodnjavanja se omogućuje najučinkovitije korištenje vodnih resursa jer se navodnjavanja onda kada i koliko je potrebno. Analiziraju se osnovni elementi navodnjavanja, obrok i norma navodnjavanja, turnus i hidromodul navodnjavanja, vodna bilanca kojom se utvrđuje nedostatak vode tijekom razdoblja vegetacije te se u konačnici odabire metoda kojom se određuje trenutak početka navodnjavanja.

Postoje različite metode kojima se planira navodnjavanje, a u ovom diplomskom radu je prikazana metoda određivanja trenutka početka navodnjavanja mjerenjem vlažnosti tla koja je ujedno smatrana najtočnija i najpouzdanija metoda. Uređaji za mjerenje vlažnosti tla rade na različitim principima (elektroetrija, tenziometrija, Time Domain Reflectometry). Uređaji mjere neke od varijabli koje se mogu dovesti u vezu sa sadržajem vode u tlu, kao što je tlak (cbar), električna vodljivost ili mjere volumni sadržaj vode u tlu (vol.%). Kako bi se pravilno interpretirali dobiveni podaci, uređaje za mjerenje vlažnosti tla je poželjno umjeriti za svaki tip tla na kojem će biti korišteni. U tu svrhu se izrađuju krivulje umjeravanja za što je potrebno poznavati vrijednosti retencijske vlage u tlu kod poljskog vodnog kapaciteta (pvk) i lentokapilarne vlažnosti (lkv). Kao rezultat, krajnji korisnik dobiva podatke o trenutku početka navodnjavanja. Poznavanje vrijednosti retencijske vlage u tlu omogućuje izračun obroka navodnjavanja, odnosno količine vode koja se dodaje jednim navodnjavanjem, a koja čini razliku od pvk i trenutne vlažnosti.

Cilj diplomskog rada je testirati pouzdanost i učinkovitost različitih tipova senzora za mjerenje vlažnosti tla, pratiti brzinu reakcije senzora na izmjenu vlažnosti na različitim dubinama tla.

## **2. PREGLED LITERATURE**

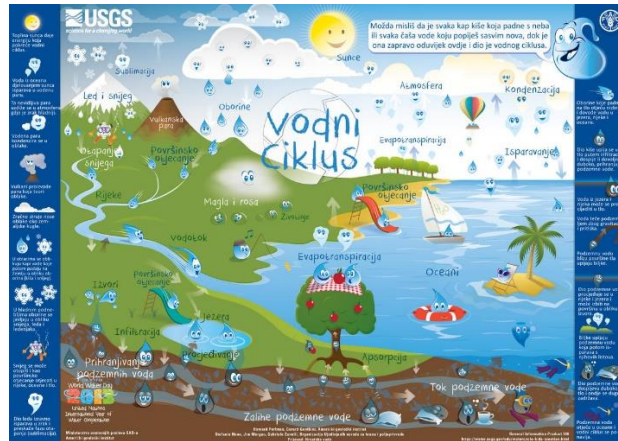
### **2.1. Općenito o vodi**

Voda predstavlja jedan od najbitnijih čimbenika u ekosustavu. Nalazi se u građi svih živih organizama te je osnova ljudskog društva i njegove aktivnosti jer se koristi za lov, proizvodnju hrane i njezinu obradu. Također, od velikog je značaja zbog svoje uloge u stvaranju energije, prijevozu robe i tereta, u poljoprivredi i šumarstvu te u ljudskom organizmu, gdje omogućuje nesmetano obavljanje životnih funkcija.

Izvori svježe vode u svijetu su ograničeni, a vrlo mali dio je dostupan i iskoristiv za ljudsku upotrebu. U posljednjih sto godina, količina je obnovljivih izvora vode konstantna, ali je iskorištavanje vode za ljudsku upotrebu poraslo sedam puta. Uzrok je tomu porast broja stanovnika koji zahtijeva veću proizvodnju hrane i učinkovitiju industrijsku proizvodnju (Geraš, 2004.).

Voda je anorganska tekućina čije je podrijetlo na Zemlji prirodno i jedini je prirodno nastali kemijski element koji se može pronaći u sve tri agregatne faze: kao tekućina, kao plin, odnosno plinovita faza i kruta faza. Na sobnoj je temperaturi voda prozirna bezbojna tekućina. Zovemo ju dobrim otapalom zato što se u njoj otapaju mnoge hidrofilne tvari.

Zahvaljujući konstantnom kruženju vode između atmosfere, hidrosfere i litosfere, omogućeno je održavanje života na Zemlji. Raspoloživost vode na Zemlji ne mijenja se značajno zbog njezinog kontinuiranog kretanja; konzumiraju ju biljke, ljudi i životinje. Voda prolazi hidrološkim procesom u pet koraka, a to su: kondenzacija, oborine, infiltracija, otjecanje i evaporacija (slika 1.).

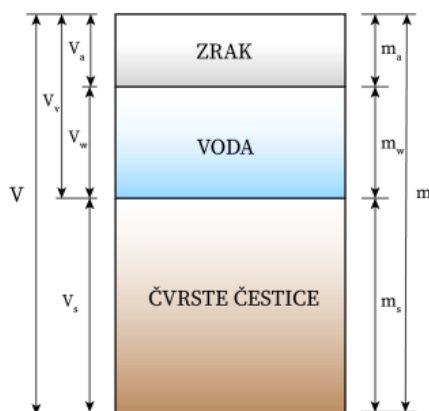


Slika 1. Hidrološki procesi

(izvor: <https://www.usgs.gov/>)

## 2.2. Tlo

Tlo je prirodna povijesna tvorevina nastala pod utjecajem pedogenetskih čimbenika i procesa koji se u tlu nesmetano odvijaju milijunima godina bez ljudskog utjecaja. Glavni su pedogenetski čimbenici koji utječu na nastanak tla: matični supstrat, klima, starost tla, reljef, organizmi i čovjek. Prema osnovnoj podjeli tla, ono se sastoji od čvrstih čestica tla, vodene faze tla i zraka, odnosno plinovite faze tla (slika 2.). U tlu žive različiti mikroorganizmi, biljke i životinje. U ovisnosti o tipu i fizikalnim značajkama tla, javljaju se pore koje su različitih oblika i dimenzija te se u njima nalazi voda, zrak ili plin (Vukadinović i Vukadinović, 2018.). Za biljnu proizvodnju neophodan je čimbenik voda koja omogućuje nesmetan rast i razvoj biljke. Uz vodu, vrlo bitno je znati osnovna svojstva tla.



Slika 2. Prikaz građe tla

(izvor: Purgar, 2019.)



## 2.3. Voda u tlu

Voda se nalazi na površini tla ili je smještena u porama koje čine šupljine. U tlu se nalaze dvije vrste pora; kapilarne, u kojima se voda zadržava i nekapilarne, u kojima se nalazi zrak, dok se voda u njima može zadržati samo kraće vrijeme. Za poljoprivrednu proizvodnju bitan je ukupan broj pora, ali i odnos među njima te se smatra da je najpovoljniji odnos kapilarnih i nekapilarnih pora od 3:2 do 1:1. Ukupna poroznost u obradivim tlima kreće se od 50 % do 65 % (Madjar i Šoštarić, 2009.). Sadržaj vode izražava se u postotcima, bilo masenim (% mas.), bilo volumnim (% vol.) ili količinski u mm ( $1 \text{ m}^{-2}$  ili  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ). To znači da ne treba govoriti o vlazi tla, nego o vodi koja se u njemu nalazi, ali se stanje i dinamika sadržaja određuje i prati pomoću vlažnosti tla (Vucić, 1987.).

Isto tako, sadržaj vode uvelike ovisi o vremenskim uvjetima i o potrebama biljaka za usvajanjem vode. U sastavu tla često je u suvišku, što dovodi do nepovoljnih utjecaja na tlo i biljku. Postoji i druga krajnost, manjak vode koji će se manifestirati u smanjenju uroda, plodovima slabije kvalitete i samim time niskoj tržišnoj vrijednosti.

### 2.3.1 Oblici vode u tlu

Voda kao „medij života“ izuzetno je važna svim živim bićima, kao i njena količina raspoloživa u tlu. Voda nastala kao rezultat prekomjernih poplava i oborina naziva se površinska voda. Samim dolaskom vode na tlo, po načelima zakonitosti, ona se zadržava na tlu ili kreće (Madjar i Šoštarić, 2009.).

Prema pokretljivosti, voda se dijeli na:

- Vezanu ili nepokretnu
- Slobodnu ili pokretnu.

Vezana voda velikim se silama drži za čestice tla ili unutar pora te je nepokretna i obično nepristupačna biljkama. Vezana voda dijeli se na:

- Kemijski vezanu vodu – predstavlja dio čvrste faze tla, kemijskim je vezama povezana za čestice tla i nepristupačna je biljkama
- Higroskopnu vodu – absorbira se na česticama tla znatnim fizičkim silama, nepokretna je i nepristupačna biljkama

- Opnenu ili filmsku vodu – voda obavija čestice tla u obliku tanje ili deblje opne, čvrsto je povezana površinskim silama, ali ponekad ima slabo gibanje među česticama tla te je djelomično korisna za biljke.

Slobodna se voda manjim silama drži za čestice tla, lako je pokretna te se u poroznom tlu može kretati u svim smjerovima. Vrlo je dobro pristupačna korijenu biljke i može se podijeliti u dvije kategorije:

- Kapilarna voda – nalazi se u mikroporama i drži se silama površinske napetosti čestica tla, kreće se u svim smjerovima od vlažnijeg dijela prema manje vlažnom dijelu, od posebnog je značaja za poljoprivrednu praksu jer čini najveću i najznačajniju zalihu vode u tlu za biljke.
- Gravitacijska voda – najpokretljivija voda u tlu, nastaje u trenutku kada su sve pore ispunjene vodom, u tlo ulazi putem prirodnih oborina, navodnjavanjem ili plavljenjem, ali se ne zadržava trajnije, nego protječe i cijedi se u podzemnu vodu. Vrlo je kratko korisna za biljke - samo u trenutnu prolaska kroz zonu korijenova sustava (Madjar i Šoštarić, 2009.).

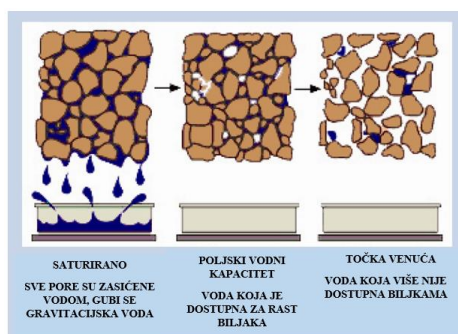
### **2.3.2 Kretanje vode u tlu**

Ulazak vode u suho tlo se naziva infiltracija i važna je za mjeru navodnjavanja jer daje uvid u količinu vode koju se može dodati obrokom navodnjavanja kako ne bi došlo do zabarivanja (teška tla) ili velikih gubitaka (pjeskovito tlo). Taj proces se naziva infiltracija ili upijanje vode u suho tlo, pri čemu je najveći intenzitet zamijećen u početku kada je tlo suho. Voda u tlu se kreće u svim smjerovima. Descendentno kretanje vode (prema dolje) je uvjetovano djelovanjem sile gravitacije, a najizraženije je kada je u tlu prisutna velika količina slobodne vode koja dolazi kao posljedica velike količine oborine koja padne u kratkom vremenu ili nakon većih obroka navodnjavanja. Kapilarna voda koja je najpokretljivija, odnosno najdostupnija voda u tlu se kreće sitnim porama tla, odnosno kapilarnim putem u svim smjerovima.

### **2.4. Vodne konstante**

Svako tlo posjeduje sposobnost upijanja vode. Nadalje, zemljišta imaju sposobnost propuštanja dijela slobodne vode u dublje profile tla i sposobnost zadržavanja vode, a

kvantitativnu karakteristiku pojedinih vodnih svojstava daju vodne konstante (Vucić, 1987.). Vodne konstante (slika 3.) karakteriziraju sposobnost tla da pokreće, premješta i zadržava određenu količinu vode.



Slika 3. Prikaz sposobnosti držanja vode za čestice tla kod različitih prikaza vodnih konstanti

(izvor: <http://www.h2grow.nz/2016/12/soil-moisture-101.html>)

Prema definiciji, vodne konstante predstavljaju pojam o sadržaju, obliku i obliku vode u tlu. Njihova vrijednost ovisi o mehaničkom sastavu tla, strukturi tla, sadržaju organske tvari tla i od primijenjenih agrotehničkih mjera (Madjar i Šoštarić, 2009.). Vodne konstante za reguliranje vodnog režima dijele se na: poljski vodni kapacitet (Pvk), lentokapilarnu vlažnost (Lkv), točku venuća (Tv) i maksimalni kapacitet tla za vodu (Mkv) (Madjar i Šoštarić, 2009.).

Pvk je sadržaj vode koji se u tlu zadrži između 24 i 48 sati nakon obilnih kiša, navodnjavanja ili plavljenja, u kojem su mikropore ispunjene vodom, a makropore ispunjene zrakom. Predstavlja stanje vlažnosti tla koje je pogodno za većinu poljoprivrednih kultura, počevši od ratarskih, voćarskih i povrćarskih sve do cvjećarskih. Na otvorenom se polju povoljno stanje vlažnosti zadržava u vrlo kratkom vremenskom intervalu jer se tlo prirodno suši. Ukoliko se želi zadržati stanje vlažnosti tla oko Pvk, to je moguće pomoću sustava za navodnjavanje, koji se najčešće koristi u stakleničkoj i plasteničkoj proizvodnji (Madjar i Šoštarić, 2009.). U melioracijskoj je praksi Pvk gornja granica optimalne vlažnosti tla, te njegova vrijednost ovisi o svojstvima i mehaničkom sastavu strukture tla. Za lakša tla iznosi 10 % do 20 %, za srednje teška 20 % do 30 % i za teška tla od 30 % do 40 % i više volumnog udjela (Vucić, 1987.).

Lkv je sadržaj vode u tlu kod kojeg dolazi do usporavanja gibanja vode u kapilarama i kao rezultat toga otežana je opskrba biljke vodom, odnosno korijen biljke teže usvaja vodu jer ima nedovoljno jaku usisnu moć. Prema Madjar i Šoštarić (2009.), Lkv čini granicu između slobodne i vezane vode i približno iznosi oko 60 % do 70 % Pvk-a. Vrlo je važna u provođenju mjera navodnjavanja zato što se uzima da je donja granica optimalne vlažnosti pokazatelj za određivanje početka navodnjavanja. Kod Lkv-i sadržaj vode u tlu je oskudan, a sile kojima se voda drži za čestice tla su velike. Time je voda teže pristupačna korijenju biljaka koje počinju trpjeti vodni stres koji se kasnije negativno manifestira na visinu i kakvoću prinosa.

Tv-a je sadržaj vode u tlu pri kojem biljke nepovratno venu i ugibaju. To se najčešće događa kada korijenje u tlu nema na raspolaganju dovoljnu količinu vode za održavanje fizioloških procesa. Na sadržaj vode u tlu uvelike utječe o kakvoj se vrsti tla radi i o njegovoj strukturi, tako da u pjeskovitim tlima sadržaj vode iznosi 3 % do 4 %, srednje teškima 7 % do 8 % i teškim tlima 13 % do 17 % volumnog udjela (Madjar i Šoštarić, 2009.).

Mkv je maksimalna količina vode koju tlo može primiti, ali ne i zadržati. Kod ove hidropedološke konstante su sve pore tla ispunjene vodom i izjednačuju se s ukupnom poroznošću tla. Do takvog stanja dolazi nakon dugotrajnih kiša ili plavljenja iz okolnih vodotoka. Uslijed djelovanja sile gravitacije, suvišna voda se procjeđuje u dublje slojeve tla te ispire hraniva što može dovesti do onečišćenja podzemnih voda i narušavanja ekosustava. Ovaj problem je posebice izražen kod nitrita i nitrita, odnosno kod dušične gnojidbe.

Hidropedološke konstante mogu biti izražene u masenim (%mas.) ili volumnim postocima (%vol.), odnosno sadržaj vode u tlu kod određene hidropedološke konstante može biti izražen količinski (mm, l m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup> ha). Konstante se određuju na tlačnom ekstraktoru i tlačnoj membrani, a rezultat mjerenja su vrijednosti sadržaja vode u tlu kod određene vodne konstante: Pvk (0 do 0,33 bar), Lkv (6,25 bar) i Tv (15 bar). Vodni potencijal tla prema Voroney (2019.) je prikazan tablicom 1.

Tablica 1. Sile držanja čestice tla kod različitih stanja vlažnosti tla

	<i>bar</i>	<i>kPa</i>
<i>Mkv</i>	0	0
<i>Pvk</i>	1/3	33
<i>Tv</i>	15	1 500
<i>Zrakosuho tlo</i>	31	3 100

*Mkv = maksimalan kapacitet za vodu; Pvk = poljski vodni kapacitet; Tv = točka venuća*

Kod 0 bara ili 0 kPa, makro i mikropore tla su popunjene vodom. Nakon otjecanja gravitacijske vode, sile držanja vode za čestice tla rastu; 0 – 0,33 bara, što čini područje vlažnosti Pvk-a. Ovaj proces obično traje nekoliko sati kod pjeskoviti tala te do 72 sata kod glinastih tala (Weil i Brady, 2017.). U slučaju izostanka oborina u uvjetima bez navodnjavanja, sadržaj vode u tlu se smanjuje, odnosno rastu sile do 6,25 bara što čini područje Lkv. U konačnici se sadržaj vode u tlu smanjuje do vrijednosti Tv, pri čemu su sile držanja vode za čestice tla 15 bara. Poznavanje hidropedoloških konstanti omogućuje uvid u količinu vode u tlu koja je biljkama lako dostupna, odnosno koju biljke mogu lako usvojiti. Upravo radi toga se navodi razlika između ukupne pristupačne vode u tlu i one koja je biljkama lako dostupna. Ukupna pristupačna voda u tlu je u intervalu između Pvk i Tv, te se izjednačava sa sposobnošću tla da zadrži vodu. Naravno, ovo stanje u tlu nastaje kada se procijedi suvišna gravitacijska voda. Količina vode koja se nalazi u intervalu vlažnosti između vrijednosti Pvk i Lkv predstavlja lako pristupačnu vodu. Kod takvog stanja vlažnosti tla biljke mogu lako nadomjestiti vodu koju su utrošile procesom ETo (Allen i sur., 1998.). Ovdje je važno istaknuti sadržaj vode u tlu kod Lkv. Naime, ova hidropedološka konstanta u praksi navodnjavanja predstavlja sadržaj vode u tlu kod kojeg se započinje s navodnjavanjem. Prema tome, prema Lkv se određuje trenutak početka navodnjavanja pa je za pretpostaviti kako će ta vrijednost varirati prvenstveno u odnosu na kulturu koja je uzgajana te fazi razvoja. To znači da će odluka o navodnjavanju ovisiti o tehnologu, odnosno o metodi koju će koristiti kako bi odredio trenutak početka navodnjavanja. Pojedini literaturni navodi izjednačavaju vrijednost Lkv s tehničkim minimum koji je u većini 60 do 70 % Pvk, pa čak i 50 % Pvk (USDA, 1990.). Bez obzira na metodu određivanja trenutka početka navodnjavanja i tehnički minimum, cilj je postići optimalan prinos (Haryati i sur., 2010.). U tablici 2. su prikazane okvirne vrijednosti pristupačne vode, Pvk i Lkv (m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>) za osnovne tipove tala (IAEA, 2008.).

Tablica 2. Pvk, Lkv i pristupačna voda ( $m^3 m^{-3}$ ) ovisno o tipu tla

<i>Tekstura</i>	<i>Pvk</i>	<i>Tv</i>	<i>Pristupačna voda</i>
<i>Krupni pijesak</i>	0,06	0,02	0,04
<i>Sitni pijesak</i>	0,10	0,04	0,06
<i>Ilovasti pijesak</i>	0,14	0,06	0,08
<i>Pjeskovita ilovača</i>	0,20	0,08	0,12
<i>Ilovača</i>	0,27	0,12	0,15
<i>Pjeskovito glinasta ilovača</i>	0,28	0,13	0,15
<i>Glinasta ilovača</i>	0,32	0,14	0,18
<i>Glina</i>	0,40	0,25	0,15

## 2.5. Određivanje trenutka početka navodnjavanja

Jedan od najvažnijih elemenata navodnjavanja je pravilno odrediti trenutak u kojemu treba započeti s navodnjavanjem. Naime, ako se s navodnjavanjem počne prije nego što je potrebno ili prečesto, dolazi do gubitka velike količine vode i energije, što će dodatno financijski opteretiti poljoprivrednu proizvodnju. Također, narušavaju se fizikalna svojstva tla te vodozračni odnosi, pojave i širenja štetnika, pojave redukcijskih uvjeta i u konačnici dolazi do ispiranja hraniva u dublje slojeve tla gdje su biljci nepristupačna. Nadalje, uslijed ispiranja dolazi do onečišćenja podzemnih i površinskih voda. Nasuprot tome, ako se s navodnjavanjem krene prekasno, biljke doživljavaju vodni stres izazvan nedostatkom vode (suša) uslijed čega dolazi do sniženja prinosa i narušavanja kakvoće. U slučaju da stres traje dulje vrijeme tada dolazi do potpunog ugibanja biljaka.

Trenutak početka navodnjavanja u praksi se može odrediti prema:

1. izgledu biljke
2. unutarnjim fiziološkim promjenama biljke
3. turnusima navodnjavanja
4. kritičnom razdoblju vode za biljku
5. vlažnosti tla
6. stanju vlažnosti tla.

Određivanje početka navodnjavanja prema izgledu biljke temelji se na procjeni vanjskih promjena biljke, odnosno gleda se promjena boje biljke, izgled lišća, turgor i sl. Taj je način određivanja trenutka navodnjavanja nesiguran i treba ga izbjegavati jer postoji mogućnost pogrešne procjene. Do toga dolazi zato što biljke različito reagiraju na nedostatak vode u tlu, a navodnjavanje je samo po sebi skupa investicija koja ne dozvoljava česte pogreške. Kod ove metode se često kasni s navodnjavanjem jer kada su vidljive vanjske promjene na biljkama, tada je biljka već doživjela stres.

Određivanje trenutka početka navodnjavanja prema unutarnjim fiziološkim promjenama biljke vrlo je složen postupak jer zahtijeva korištenje refraktometra pomoću kojega se mjeri koncentracija staničnog soka. Promjena sadržaja vode u tlu ima za posljedicu promjenu u koncentraciji staničnog soka. Metoda je teško primjenjiva za proizvodne uvjete pa često nalazi primjenu u istraživačkim radovima.

Kako bi se odredio trenutak navodnjavanja prema turnusima navodnjavanja, potrebno je prvenstveno znati da je turnus navodnjavanja vremensko razdoblje između dva navodnjavanja koje se izražava u danima. Računa se prema sljedećoj formuli (Madjar i Šoštarić, 2009.):

$$T = O : Du$$

gdje je

T – turnus navodnjavanja (dan)

O – obrok navodnjavanja (mm)

Du – dnevni utrošak vode (mm/dan).

Pri određivanju dnevnog utroška vode, potrebno je poznavati mjesečnu vrijednost evapotranspiracije (ET<sub>o</sub>) koja se dijeli s brojem dana mjeseca za koji se određuje. Turnusi navodnja kombiniraju se s padalinama. Primjerice, ukoliko padne više od 25 mm oborina, turnus se produžava za jedan cijeli turnus, ako između dva turnusa navodnjavanja padne 10 do 25 mm, navodnjavanje se odgađa za pola turnusa, a ako padne manje od 10 mm, zanemaruje se tolika količina oborina i turnus navodnjavanja se ne odgađa (Madjar i Šoštarić, 2009.). Turnus navodnjavanja najprikladnije je koristiti u aridnim područjima gdje izostaju padaline i pri uzgoju u staklenicima i plastenicima gdje nema priliva prirodnih oborina.

Kako bi se odredio trenutak početka navodnjavanja prema kritičnom razdoblju biljke za vodu, potrebno je dobro poznavati faze razvoja biljke i njezine potrebe za vodom. Ovakav način navodnjavanja nije pouzdan jer se navodnjava u onoj fazi razvoja biljke koja je najkritičnija, a navedena faza je naravno drugačija za svaku uzgajanu kulturu i mijenja se ovisno o agroekološkim uvjetima.

Metoda određivanja početka navodnjavanja prema procjeni vlažnosti tla temelji se na proizvoljnoj procjeni te samim time nije prihvatljiva metoda. Iskusni agronomi ovu metodu koriste pri određivanju pravog trenutka za početak obrade tla ili za neke druge agrotehničke radnje.

Najtočnija metoda određivanja trenutka početka navodnjavanja je prema stanju vlažnosti tla. Navodnjavanje treba početi kada je sadržaj vode u tlu na dubini koju želimo navodnjavati

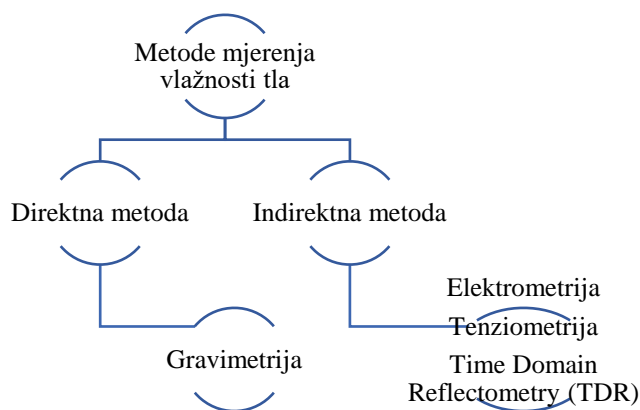


jednak vrijednosti Lkv-i. Postoji više načina mjerenja vlažnosti tla; može se obaviti izravno na terenu te je moguće vrlo brzo intervenirati s navodnjavanjem i laboratorijsko mjerenje, koje je znatno preciznije, ali je sporo i stoga nepraktično (Madjar i Šoštarčić, 2009.).

### 2.5.1. Mjerenje sadržaja vode u tlu

Mjerenje sadržaja vode u tlu dinamičan je proces, vremenski i prostorno, s obzirom na to da je potrebno kontinuirano nadziranje. Svaka od sljedeće navedenih metoda mjerenja sadržaja vode u tlu ima svoje prednosti i nedostatke. Pogodnost korištenja pojedine metode procjenjuje se po troškovima, točnosti metode, prilagođenosti tlu, vremenskim uvjetima, mogućnostima postavljanja pojedinih tipova senzora, metodama upravljanja i trajnosti senzora. Prilikom odabira metode kojom će se mjeriti voda u tlu najvažniji su kriteriji tip tla, raspodjela biljaka i metoda navodnjavanja.

Razlikuju se direktne i indirektno metode mjerenja sadržaja vode u tlu (slika 4.). Direktna metoda podrazumijeva mjerenje sadržaja vode u tlu metodom gravimetrije (termogravimetrije), a indirektnim metodama se mjeri neka od varijabli koja se može dovesti u vezu sa sadržajem vode u tlu (tlak, električna vodljivost).



Slika 4 . Metode mjerenja vlažnosti tla

Cilj mjerenja sadržaja vode u tlu je postići ujednačeno i kontrolirano dodavanje vode. Tijekom povijesti su razvijene i primjenjivane različite metode indirektnog mjerenja vlažnosti tla. Prva zabilježena metoda je *Fast Neutron Thermalization (FNT)* koja je primjenjivana u razdoblju prije 1950. godine, a potom na tržištu dominira *Neutron Moisture*

*Meter* (NMM) u razdoblju od 1970. do 1980. godine. Primjena radioaktivnih metoda je izbjegavana u svim krajevima svijeta bez obzira na njenu učinkovitost i ekonomsku isplativost. Nakon 1970. godine, razvojem tehnologije dolazi do naglog širenja tržišta te pojave različitih izvedbi senzora za mjerenje vlažnosti tla.

### 2.5.2 Direktne metode mjerenja sadržaja vode u tlu

Direktna metoda mjerenja vlažnosti tla podrazumijeva metodu termogravimetrije kod koje se sadržaj vode u tlu određuje na osnovu mase uzorka tla prije i poslije sušenja. Tlo se uzorkuje (u narušenom ili nenarušenom stanju) te odmah važe na preciznoj digitalnoj vagi prije nego što se smanji sadržaj vode u uzorku. Potom se uzorak tla suši u sušioniku na 105 °C dok se ne postigne konstantna masa te se bilježi masa suhog uzroka tla. Sadržaj vode u tlu se određuje prema slijedećem izrazu (Black, 1965.):

$$\%mas. = \frac{mv - ms}{ms} * 100$$

Gdje je:

mv – masa vlažnog tla (g)

ms – masa suhog tla (g).

Direktna metoda se koristi za umjeravanje uređaja za mjerenje vlažnosti tla kao što je prikazano slikom 5. i 6.



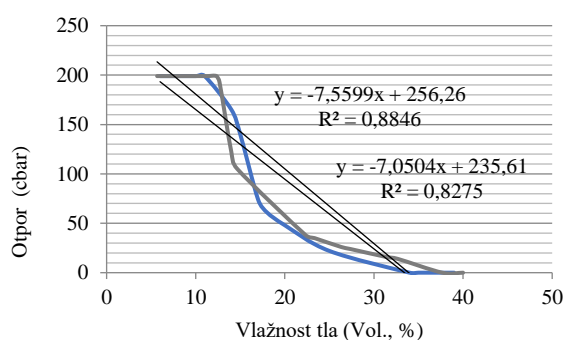
Slika 5. Cilindri po Kopeckom  
Fotografija: Marković, M. (2022.)



Slika 6. Umjeravanje senzora za mjerenje  
vlažnosti tla  
Fotografija: Marković, M. (2022.)

Metoda gravimetrije je smatrana najtočnijom metodom, premda pojedini autori navode i poneke nedostatke. Primjerice, Reynolds (1970.) navodi kako je kod ove metode izraženo narušavanje površine tla prilikom uzorkovanja te česta izmjena vlažnost tla u prostoru i vremenu. Brevik (2012.) tvrdi kako je nedostatak metode gravimetrije taj što nije moguće ponoviti mjerenja na istom uzorku tla, a pored toga sam proces je dugotrajan. Unatoč navedenim nedostacima, važno je za naglasiti kako se ova metoda koristi za umjeravanje senzora, odnosno uređaja za indirektno mjerenje vlažnosti tla (slika 6.).

Umjeravanje senzora podrazumijeva interpretaciju podataka koji su dobiveni mjerenjem sadržaja vode u tlu s nekim od senzora i povezivanje izmjerenih vrijednosti s količinom vode u tlu koja može biti izražena u mas.%, vol%. ili mm. Krivulja umjeravanja je krajnji rezultat procesa, a služi kao vodilja za interpretaciju mjerenja za svaki tip za kojeg je senzor umjeren. Primjer krivulje umjeravanja je prikazan grafikonom 1. (Marković, 2013.). Krivulja umjeravanja, odnosno odnos između sadržaja vode u tlu i izmjerenih vrijednosti će ovisiti o kemijskim i fizikalnim svojstvima tla (Kirkham, 2004.).



Grafikon 1. Krivulja umjeravanja

### 2.5.3 Indirektne metode mjerenja sadržaja vode u tlu

Kako je ranije navedeno, indirektno mjerenje sadržaja vode u tlu podrazumijeva upotrebu različitih senzora. Korištenje senzora u planiranju i provođenju navodnjavanja podrazumijeva određen stupanj znanja iz područja melioracija i hidropedologije što je uz visoku cijenu koštanja najčešći razlog zašto se poljoprivrednici rjeđe odlučuju na njihovu nabavku i korištenje.

## Metoda tenziometrije

Metoda tenziometrije je često korištena metoda radi jednostavnog korištenja senzora te interpretacije izmjerenih vrijednosti. Kirkham (2005.) navodi Tenziometar (slika 7.) se sastoji od manometra, plastične cijevi i porozne keramičke kapice.



Slika 7. Tenziometar

Fotografija: Stanušić, A. (2022.)

Cijev se puni ili destiliranom vodom ili otopinom u kojoj se nalazi sredstvo protiv stvaranja algi. Na vrhu cijevi se nalazi otvor u kojeg se sipa voda te manometar (slika 8.). U cijevi je potrebno napraviti vakuum kako bi se uspostavio kontakt s tlom.

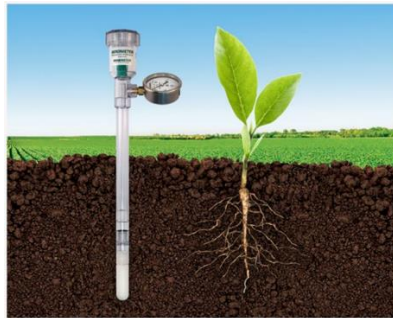


Tenziometar za mjerenje vlage tla. 1 - kućište, 2 - pojačalo signala, 3 - pretvarač pritiska, 4 - brtveni prsten, 5 - okomita cijev, 6 - ćelija tenziometra, 7 – zaštitni pokrov, 8 - ulaz, 9 - transportna brtva, 10 - indikator mjehurića

Slika 8. Dijelovi tenziometra

(izvor: Čačić, 2019.)

Na manometru je kazaljka koja pokazuje vrijednosti od 0 do 100 cbara. Kod većine tipova tala 0 cbar predstavlja vlažno tlo, a vrijednosti >50 cbar suho tlo (MOA, 2015.). U slučaju da je u tlu dovoljno vode, vrijednosti na manometru su oko 0 cbara što predstavlja vrijednost 100 % Pvk. Uslijed sušenja tla, voda iz tenziometra izlazi iz cijevi što povećava tlak te vrijednosti na uređaju rastu. Za pravilno postavljanje tenziometra preporuka je da se prije postavljanja u tlo keramički vrh uređaja natopi u posudi s čistom vodom (destiliranom) kako bi zrak koji se nalazi u keramici potpuno izašao. Neposredno prije vađenja uređaja iz posude s vodom, potrebno je odvrnuti poklopac i cijev napuniti vodom skroz do vrha te zatim zavrnuti zatvoriti tako da se uklone mjehurići zraka. Potrebno je izbjegavati dodirivanje keramičkog vrha prstima jer može doći do začepljena finih pora keramike. Kada je određeno mjesto gdje će tenziometar biti postavljen, buši se otvor približno jednakog promjera kao što je i tenziometar, kako bi se ostvario što bolji kontakt senzora s tlom (slika 9.).



Slika 9. Tenziometar u dubini korijenovog sustava

(izvor: <https://esi.com.my/inst-home/irrometer-tensiometer/>)

Dubina na koju će tenziometar biti postavljen ovisi o uzgajanoj kulturi, odnosno dubini korijena navodnjavane kulture. Jednako kao i kod drugih senzora za mjerenja vlažnosti tla, presudno je ostvariti što bolji kontakt senzora s tlom. Osim dubine, važno je pravilno postaviti senzor ovisno o metodi navodnjavanja. Primjerice, kod navodnjavanja rasprskivačima, tenziometar se postavlja kod prve lateralne cijevi. Kod mikrorasprskivača se ovaj tip senzora postavlja u redu (prati položaj sjetvenog reda), između dva rasprskivača te u dijelu navodnjavane površine s dominantnim obilježjima tla ili reljefa.

Tenziometri su najučinkovitiji u tlima povoljne strukture, ilovači i glinastim tlima s visokim sadržajem vode u tlu. Ovdje je važno naglasiti kako se kod teških tala s povećanim sadržajem gline u sušnim uvjetima često dogodi da sva voda iz tenziometra isteče u tlo uslijed čega senzor gubi kontakt s tlom i potrebno ga je servisirati. Servis senzora podrazumijeva

ponovno punjenje senzora vodom, te se ujedno smatra i najvećim nedostatkom ovog senzora. Raviv i Lieth (2008.) navode da je velika prednost ta što tenziometar nije osjetljiv na sadržaj soli u tlu.

Brojna objavljena istraživanja ukazuju na učinkovitu primjenu tenziometra u planiranju navodnjavanja jagoda (Krüger i sur., 1999., Hoppula i Salo, 2007., Cormier i sur., 2020.), kajsije (Li i sur., 1989.), riže (Kukal i sur., 2005.).

### *Metoda reflektometrije*

*Time Domain Reflectometry* (TDR, slika 10.) je uređaj koji radi na principu reflektometrije te je u novije vrijeme sve zastupljeniji kod krajnjih korisnika radi jednostavnosti korištenja, odnosno jednostavne interpretacije mjernih podataka (Yu i sur., 2010.).

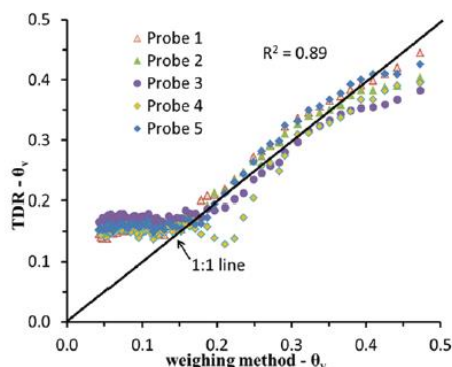


Slika 10. TDR uređaj

(izvor: <https://edaphic.com.au/soil-water-compendium/time-domain-reflectometry-tdr/>)

Uređaj mjeri volumni sadržaj vode u tlu (vol.%) s rezolucijom od 0,1 vol.% i točnosti od  $\pm 3,0$  % u rasponu od 0 do saturiranosti pri čemu je EC vodene faze tla  $< 2 \text{ dS m}^{-1}$  (Spectrum technologies, 2009.). Premda proizvođač naglašava kako TDR nije potrebno umjeriti, važno je poznavati osnovne hidropedološke značajke tla na kojem se koristi pa u svrhu toga, proizvođač nudi okvirne vrijednosti sadržaja vode u tlu za svaki tip tla kako bi mogli što točnije interpretirati dobivene podatke (Haman i Yeager, 2003.). Chung i Lin (2009.) navode kako je metoda reflektometrije često točnija u odnosu na druge metode radi toga što radi na većim frekvencijama i radi toga što ne zahtijeva umjeravanje. Ipak, Western i Seyfried (2005.) navode kako je TDR uređaj potrebno umjeriti kod tala s povećanim sadržajem gline i organske tvari. Grafikonom 2. je prikazana korelacijska povezanost između TDR mjerenja

i sadržaja vode u tlu mjereno metodom gravimetrije (Adelakun i Ranjan, 2013.). Vidljiva je vrlo jaka korelacijska povezanost pozitivnog smjera što ukazuje na preciznost TDR uređaja.



Grafikon 2. Odnos TDR mjerenja i sadržaja vode u tlu mjereno metodom gravimetrije

TDR uređaj se sastoji od dva paralelno postavljena senzora koji su spojeni na uređaj koji šalje elektromagnetski puls ili signal, a brzina kretanja ovisi o sadržaju vode u tlu. Predložene su različite metode kojima se analizira brzina kretanja signala uzduž senzora, dok je prvu metodu predložio Top i sur. (1980.). Česta primjena TDR senzora je za planiranje navodnjavanja parkova, golf igrališta, travnjaka (Stonewell i Gelernter, 2008.), testiranja ujednačenosti navodnjavanja kod metode kišenja (Serena i sur., 2011.).

Kao i svaki uređaj, ima svoje prednosti i nedostatke. Od prednosti važno je izdvojiti pouzdanost, preciznost, minimalno uništavanje strukture tla i to da uređaj nije potrebno umjeravati (Mortl i sur., 2011.). Nadalje, uređaj nije osjetljiv na nagle promjene pH reakcije tla, a pojedince izvedbe uređaja nude mogućnost mjerenje EC-a.

Neki nedostaci su visoka cijena koštanja, činjenica da je uređaj nakon određenog vremena korištenja potrebno umjeriti da bi se zadržala točnost interpretiranih podataka, te to da na glinovitim tlima ili tlima s visokim sadržajem soli, TDR uređaj ne daje točne rezultate (Haman i sur., 2003.). U rezultatima istraživanja Benor i sur. (2012.) je naveden značajan učinak sadržaja soli na TDR mjerenja, odnosno volumni sadržaj vode u pjeskovitom i ilovastom tlu.

#### *Metoda elektrometrije*

Watermark senzor (slika 11.) je uređaj koji radi na principu elektrometrije, a izmjerene vrijednosti prikazuje u kilopaskalima (kPa) ili centibarima (cbar). Watermark uređaj je

ručni, lako prenosiv uređaj kojim je moguće očitavati vlažnost i temperaturu tla s neograničenog broja senzora, ali nema mogućnost pohrane podataka.



Slika 11. Watermark uređaj za mjerenje vlage tla

Fotografija: Stanušić, A. (2022.)

Watermark senzor je u upotrebi od 1978. godine s tim da je u novije vrijeme poprimio drugačiji izgled odnosno poboljšane su mu performanse. Naime, prethodnik Watermark senzora je gipsani blok koji je prikazan slikom 11. Za razliku od Watermark senzora, gipsani bok je bio kraći te nije bio obavijen perforiranom cijevi što je uzrokovalo ubrzano trošenje gipsa.



Slika 12. Gipsani blok

(izvor: [www.imbotec.com](http://www.imbotec.com))

Watermark senzor (slika 12.i 13.) radi na principu električnog otpora koji se mijenja promjenom vlažnosti tla, pri čemu gips služi kao pufer kod naglih promjena pH reakcije. Neke odlike Watermark senzora su:

- mjerenje unutar raspona od 0 do 199 cbar (kPa)



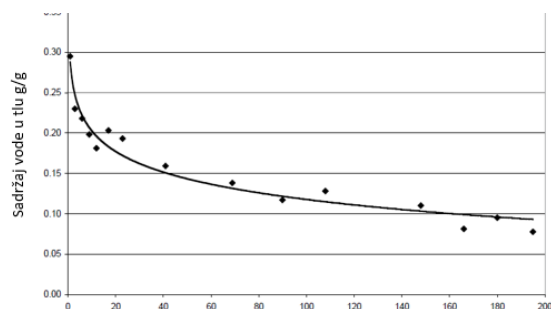
- postojan
- netopiv
- neosjetljiv na smrzavanje
- neosjetljiv na povećan sadržaj soli u tlu
- cijenovno povoljan
- lako se postavlja u tlo
- nema potrebe za održavanjem.



Slika 13. Watermark

Fotografija: Stanušić, A. (2022.)

Jednom postavljen u tlo, Watermark senzor reagira na promjene vlažnosti tla i daje relativne vrijednosti sadržaja vode u tlu. Kako se smanjuje sadržaj vode u tlu, tako vrijednosti na uređaju rastu i suprotno. Watermark senzor je potrebno umjeriti za svaki tip tla na kojem se koristi što se ujedno smatra njegovim najvećim nedostatkom. Umjeravanje senzora podrazumijeva izradu krivulje umjeravanja (grafikon 3.).



Grafikon 3. Krivulja umjeravanja

(izvor: [www.globe.gov](http://www.globe.gov))

Kao i kod drugih senzora, veliku pozornost je potrebno obratiti na lokaciju na kojoj će senzor biti postavljen u odnosu na uzgajanu kulturu te sustav za navodnjavanje. Jednako tako, senzor je potrebno postaviti na dubinu u kojoj se nalazi glavnina mase korijenovog sustava uzgajane kulture. Preporuka je postaviti veći broj senzora na navodnjavanu površinu, odnosno na različite dubine. Kod navodnjavanja brazdama ili plavljenjem, preporuka je senzore postaviti na 2/3 duljine brazde jer je u većini slučajeva na tom mjestu najslabija infiltracija. Kod sustava za navodnjavanje kišenjem, unatoč činjenici kako je ujednačenost kišenja visoka, senzore je poželjno postaviti prema svojstvima tla, odnosno prema mikrolokacijama s povećanim ili smanjenim sadržajem gline, pijeska ili organske tvari. Kod širokorednih kultura, senzore se postavlja u sam red. Kod pivot sustava, senzore se postavlja uzduž sustava na nekoliko lokacija te ovisno o mikrolokacijama. Kod lokaliziranog navodnjavanja bi Watermark senzori trebali biti postavljeni u zoni vlaženja, odnosno 35 do 40 cm od kapaljke. Primjer postavljanja senzora je prikazan slikom 14.



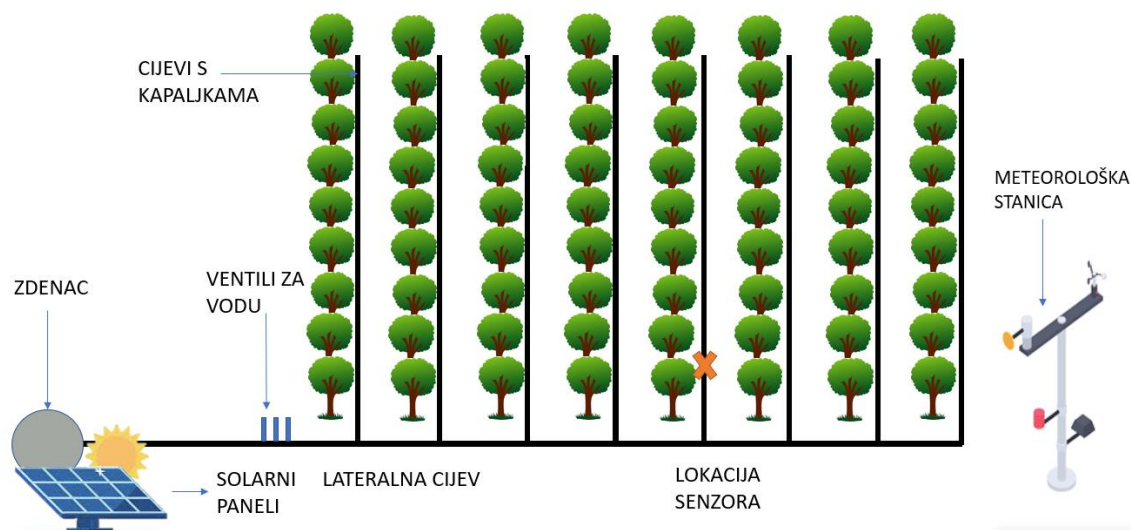
Slika 14. Prikaz prikladnog mjesta za postavljanje senzora

(Izvor: [www.irrometer.com](http://www.irrometer.com))

### 3. MATERIJALI I METODE RADA

Istraživanje je postavljeno na pokušalištu Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek (Tenja, 45°51'N 18°78'E). Područje karakterizira umjereno kontinentalna klima (Cfwbx) s prosječnom godišnjom temperaturom zraka od 12 °C te godišnjom količinom oborine od 650 mm (Zaninović i sur., 2008.). Senzori za mjerenje vlažnosti tla su postavljeni u nasadu jabuke star tri godine (Lijepocvjetka, *Malus domestica* Borkh.). Voćnjak je navodnjavan lokaliziranom metodom, odnosno sustavom „kap po kap“. Cijevi za navodnjavanje su postavljene na visini od 60 cm, a razmak između kapaljki je 90 cm. Mjeren je protok (Q) na 5., 20., 35., 50. i 65. kapaljki kako bi se testirala ujednačenost kapanja uzduž cijevi. Izvor vode za navodnjavanje je dubinski zdenac udaljen 20 m od nasada voćnjaka, dubine 39 m. Prije početka navodnjavanja je uzorkovana voda iz zdenca te analizirana u Zavodu za javno zdravstvo Osijek. Kvaliteta je analizirana prema parametrima kvalitete vode za ljudsku potrošnju te interpretirana prema preporukama za interpretaciju kvalitete vode za navodnjavanje (FAO, 1985.).

Shematski prikaz (slika 15.) prikazuje lokaciju senzora u odnosu na voćnjak.



Slika 15. Shematski prikaz voćnjaka i položaja senzora za mjerenje vlažnosti tla

U istraživanju su korišteni senzori za mjerenje vlažnosti tla koji rade na principu elektrometrije i tenziometrije. Prije postavljanja u tlo senzori su pripremljeni prema uputama proizvođača. Watermark senzori su stavljeni u posudu s vodom, odnosno potpuno navlaženi

(slika 16. i 17.). Zatim su sušeni i ponovno vlaženi u nekoliko ciklusa kako bi se aktivirali. Potom je provjerena ispravnost senzora. Jednak postupak je proveden i za tenziometre.



Slika 16. Watermark senzori u posudi s vodom

Fotografija: Marković, M. (2022.)



Slika 17. Tenziometri u posudi s vodom

Fotografija: Marković, M. (2022.)

Oba senzora su vlažni postavljeni u tlo na prethodno određene dubine. Watermark senzori i tenziometri su postavljeni u tlo na dubinu od 20 cm, 30 cm, 40 cm i 45 cm. Za postavljanje senzora u tlo je korišteno svrdlo približno jednakog promjera kao i senzori (slika 18.). Tenziometri su prije postavljanja u tlo napunjeni destiliranom vodom te je napravljen vakuum u senzoru kako bi se postigao kontakt s tlom (slika 19.).



Slika 18. Svrđlo za postavljanje senzora u tlo

Fotografija: Stanušić, A. (2022.)



Slika 19. Punjenje senzora destiliranom vodom

Fotografija: Stanušić, A. (2022.)

Uzeti su uzorci tla s dvije dubine (0 cm do 30 cm i 30 cm do 60 cm) kako bi se odredila retencija vlage u tlu kod određene hidropedološke konstante pomoću tlačne membrane i tlačnog ekstraktora (pF, bar). Tlo je analizirano u laboratoriju Zavoda za pedologiju Agronomskog fakulteta u Zagrebu. Vrijednosti retencije vlage su korišteni za izradu krivulje umjeravanja. Prije postavljanja u tlo, Watermark senzori su umjereni za tlo na pokušalištu. Uzeti su uzorci tla u cilindre po Kopeckom (300 cm<sup>3</sup>) s dvije dubine (0 - 30 cm i 30 - 60 cm). U cilindre s tlom su postavljeni Watermark senzori te je s donje strane cilindra postavljena mrežica koja sprječava rasipanje tla, a omogućuje nesmetano kretanje vode. Uzorci tla su navlaženi destiliranom vodom (kapilarnih usponom) dok se na površini uzorka nisu pojavile kapljice vode. Uzorci su vagani na preciznoj digitalnoj vagi te je usporedno mjeren sadržaj vode Watermark uređajem. Kada su postignute ujednačene vrijednosti, uzorci tla su sušeni u sušioniku na 105 °C oko 36 h, te ponovno vagani kako bi se dobila vrijednost apsolutno suhog tla. Trenutačni sadržaj vode u tlu je određen pomoću slijedećeg izraza (Voroney, 2019.):

$$Trv = \frac{mv - ms}{ms} \times 100$$

Gdje je:

Trv – trenutačni sadržaj vode u tlu (%)

mv – masa vlažnog tla (g)

ms – masa suhog tla (g).

TDR300 uređaj nije bilo potrebno pripremati prije korištenja, osim podešavanja na samom uređaju. Obzirom na to da uređaj nudi mogućnost korištenja na tipovima tala s različitim sadržajem gline, i na različitim dubina, na sučelju uređaja se podešavaju navedene vrijednosti.

Podaci o vremenskim uvjetima su prikupljeni s meteorološke stanice koja je postavljena u samom nasadu jabuke, odnosno 10 m udaljena od lokacije senzora. Prikupljeni su slijedeći podaci: oborine (mm), temperatura zraka (°C), brzina vjetra ( $m s^{-1}$ ), vlaga zraka (%). Vrijednosti sati sijanja sunca (h) su preuzete od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Podaci o vremenskim uvjetima su korišteni za izračun učinkovitih oborina, potencijalne evapotranspiracije (ET<sub>o</sub>) te vodne bilance.

Učinkovite oborine se u praksi navodnjavanja određuju kako bi se uzeli u obzir gubici oborine koji su nastali uslijed površinskog otjecanja, zadržavanja na biljnim organima (uglavnom na lišću), isparavanju u atmosferi te ispiranju vode u dublje slojeve tla. Postoje različite metode kojima se određuju učinkovite oborine, a za potrebe diplomskog rada, korištena je United States Department for Agriculture (USDA) metoda (Smith, 1992.). ET<sub>o</sub> je određena prema FAO Penman-Montheith metodi (Allen i sur., 1998.) koja je priznata kao univerzalna metoda za određivanje ET<sub>o</sub> te je integrirana u CROPWAT računalni program.

Vodna bilanca je određena prema metodi Thornthwaitea za višegodišnji prosjek (1961. - 1990.), a predstavlja razliku između prihoda i rashoda vode, odnosno količine vode koja na neko područje dospije u odnosu na količinu vode koja se gubi ili utroši. Prihodi vode se odnose u prvom redu na oborine koje padnu na nekom području, zatim na kapilarno uzdizanje te zalihu vode u tlu. Rashodi ili gubici nastaju utroškom vode od strane biljaka, odnosno procesom evapotranspiracije (ET<sub>o</sub>) te otjecanjem vode u dublje slojeve tla ili površinskim otjecanjem. Vodna bilanca je određena za ukupne i učinkovite oborine.

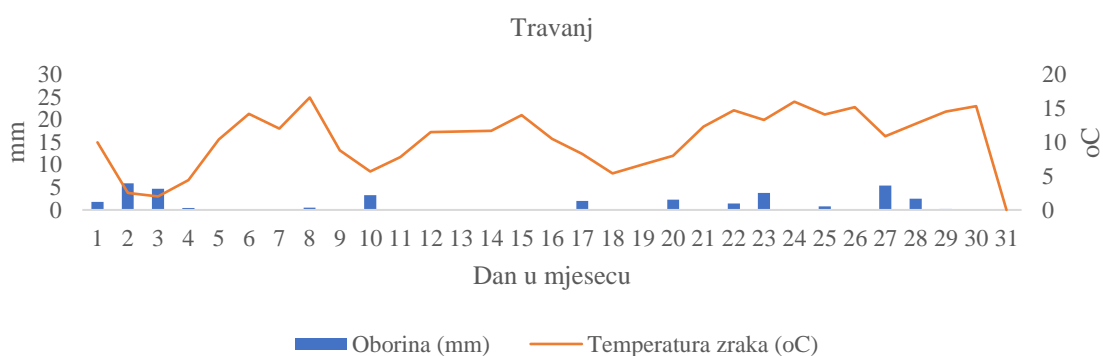
Korelacijska veza između mjerenja s Watermarkom i tenziometrom je analizirana računalnim programom STATISTICA 13 (StatSoft, Inc., Tulsa). Jačina povezanosti je

iskazana prema Roemer Orphalovoj skali (Vasilj, 2000.). Za spomenutu analizu uzeti su prosjeci svih dubina za oba uređaja za mjerenje vlažnosti tla.

## 4. REZULTATI

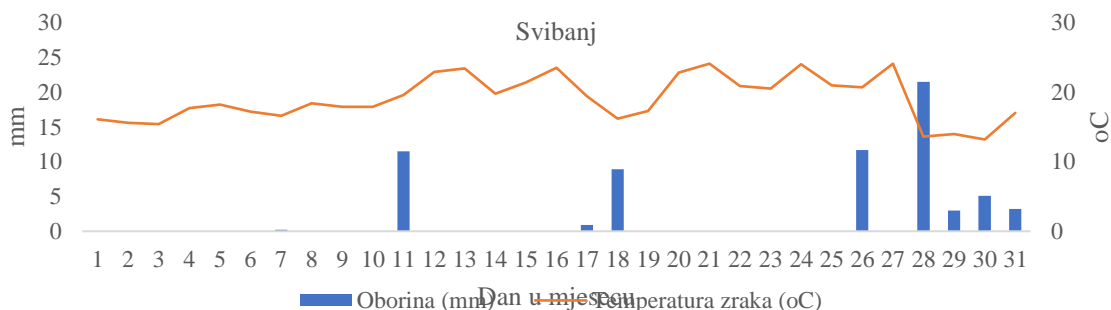
### 4.1. Vremenske prilike

Količina oborine i dnevne temperature zraka tijekom mjeseca travnja su prikazane grafikonom 4. Tijekom mjeseca travnja je palo 35 mm oborine što je za 18,8 mm manje u odnosu na višegodišnji prosjek (1961. – 1990. = 53,8 mm). Što se tiče temperature zraka, tijekom mjeseca travnja prosječna temperatura zraka je bila niža za 0,6 °C u odnosu na višegodišnji prosjek (1961. – 1990. = 11,3 °C).



Grafikon 4. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka (°C) tijekom mjeseca travnja

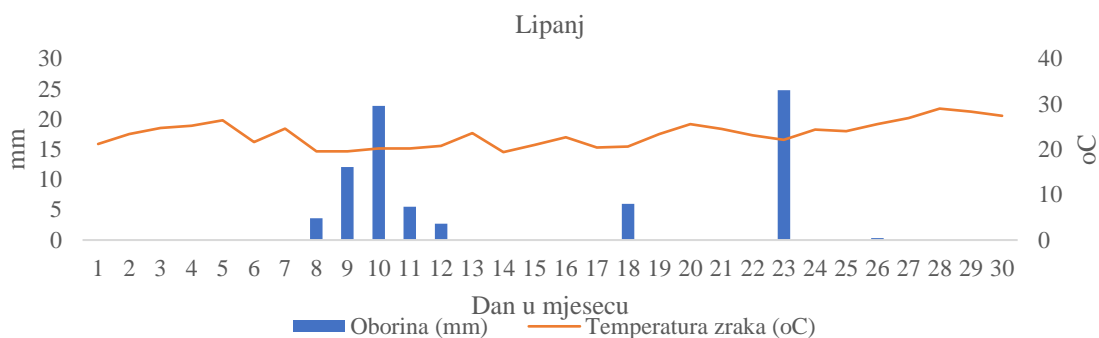
Dnevna količina oborine (mm) i temperature zraka (°C) tijekom mjeseca svibnja su prikazani grafikonom 5. Na području Osijeka je svibanj bio topao i prosječan u pogledu količine oborine. Prosječna temperatura zraka tijekom mjeseca svibnja je bila 19,0 °C što je za 2,5 °C više od višegodišnjeg prosjeka (1961. – 1990. = 16,5 °C). Mjesečna količina oborine (66 mm) je bila gotovo jednaka višegodišnjem prosjeku, odnosno za 7,5 mm viša u odnosu na višegodišnji prosjek (1961. – 1990. = 58,5 mm).



Grafikon 5. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka (°C) tijekom mjeseca svibnja

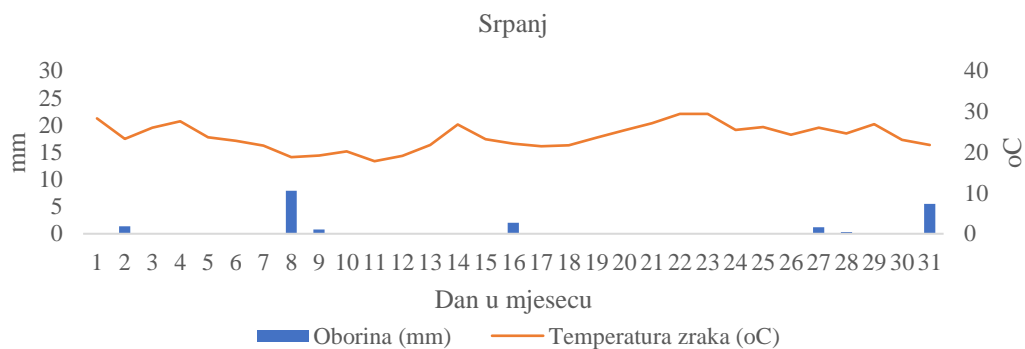


Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka (°C) tijekom mjeseca lipnja su prikazane u grafikonu 6. Tijekom mjeseca lipnja je palo 11 mm manje oborine (77,2 mm) u odnosu na višegodišnji prosjek (1961. – 1990. = 88 mm). Srednja mjesečna temperatura zraka je bila 23,3 °C što je za 3,8 °C više u odnosu na višegodišnji prosjek (1961. – 1990. = 19,5 °C).



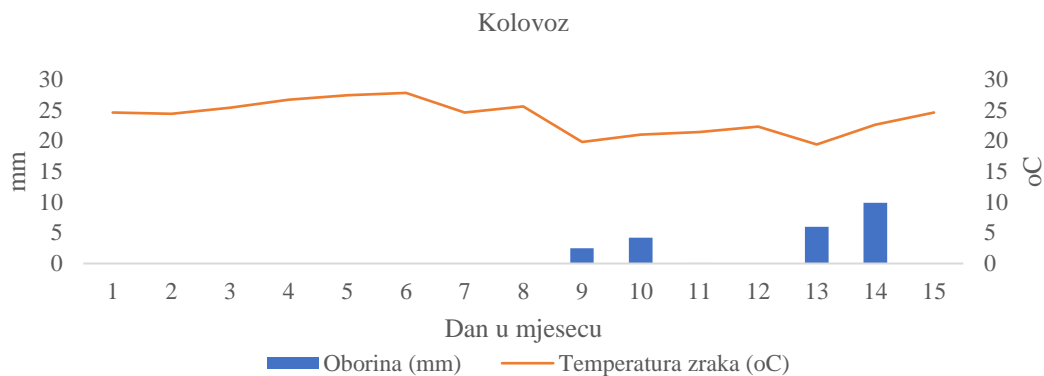
Grafikon 6. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka (°C) tijekom mjeseca lipnja

Mjesec srpanj je bio ekstremno topao i sušan. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka je prikazana grafikonom 7. Tijekom mjeseca srpnja je palo 19,2 mm oborine, što je za 45,6 mm manje u odnosu na višegodišnji prosjek (1961. – 1990. = 64,8 mm). Srednja mjesečna temperatura zraka je bila 23,8 °C što je za 2,7 °C više u odnosu na višegodišnji prosjek (1961. – 1990. = 21,1 °C).



Grafikon 7. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka (°C) tijekom mjeseca srpnja

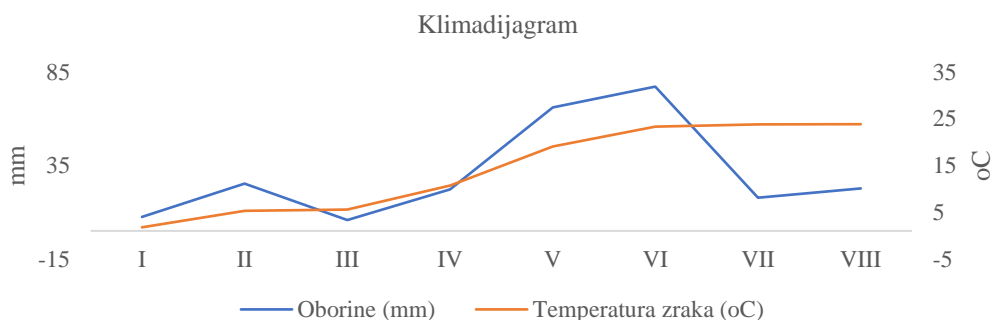
Podaci o količini oborine (mm) i temperaturama zraka (°C) za mjesec kolovoz su prikazane do 15. kolovoza kada je bio zadnji dan poljskog istraživanja (grafikon 8.). U spomenutom razdoblju je ukupno palo 22,7 mm oborine, a prosječna temperatura zraka je bila 23,8 °C.



Grafikon 8. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka (°C) tijekom mjeseca kolovoza

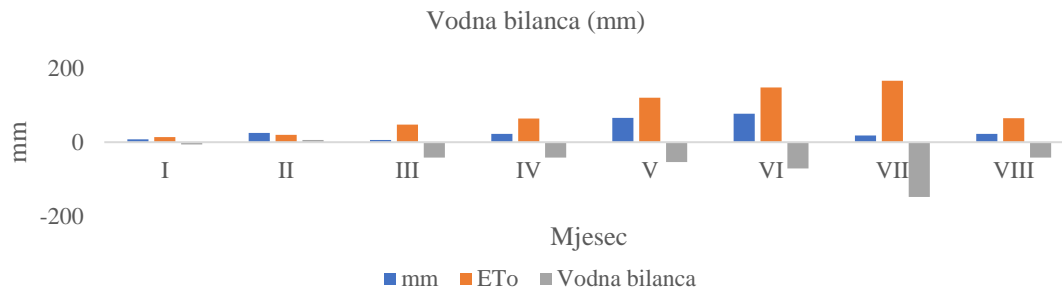
#### 4.2. Vodna bilanca

Klimadijagram za promatrano razdoblje od siječnja do 15. kolovoza 2022. godine je prikazana grafikonom 9. Zamijećen je nedostatak oborine tijekom proljetnog razdoblja, od sredine mjeseca veljače do sredine mjeseca travnja i tijekom ljetnog razdoblja, od početka mjeseca lipnja pa sve do kraja razdoblja istraživanja, odnosno do sredine mjeseca kolovoza.



Grafikon 9. Klimadijagram za promatrano razdoblje

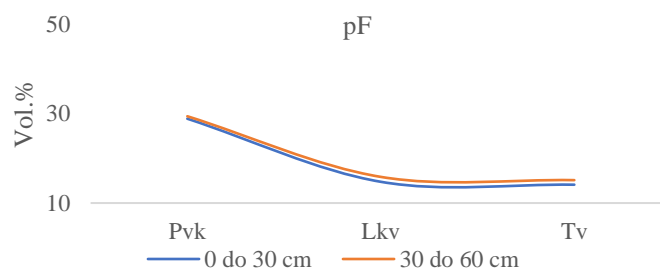
Tijekom promatranog razdoblja je ukupno nedostajalo 397,5 mm oborine, odnosno 356 mm oborine u razdoblju od travnja do kolovoza (grafikon 10.). Najveći nedostatak oborine je zamijećen tijekom mjeseca srpnja (147,4 mm).



Grafikon 10. Vodna bilanca za promatrano razdoblje (siječanj – kolovoz)

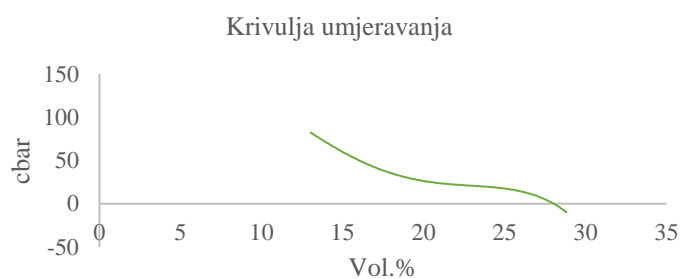
### 4.3. Rezultati umjeravanja senzora

Rezultati pF analize su prikazani grafikonom 11. Na dubini tla od 0 do 30 cm je sadržaj vode u rasponu od 28,87 %vol. (Pvk) do 14,1 %Vol. (Tv). Na dubini tla od 30 do 60 cm je sadržaj vode u tlu u rasponu od 29,42 % Vol. (Pvk) do 15,2 Vol.% (Tv).



Grafikon 11. Rezultati pF analize

Rezultati umjeravanja uređaja za mjerenja vlažnosti tla su prikazani krivuljom umjeravanja (grafikon 12.)

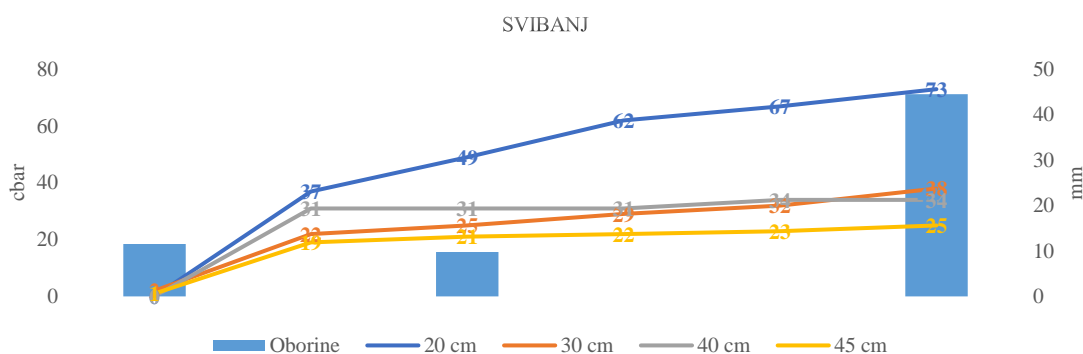


Grafikon 12. Krivulja umjeravanja

#### 4.4. Dinamika vlažnosti tla

##### *Watermark uređaj*

Dinamika vlažnosti tla tijekom mjeseca svibnja je prikazana grafikonom 13. Vlažnost tla bila je u rasponu od 0 do 73 cbar na 20 cm dubine senzora, od 2 do 38 cbar na 30 cm dubine senzora, od 0 do 34 cbar na 40 cm dubine senzora te od 1 do 25 cbar na 45 cm dubine senzora.



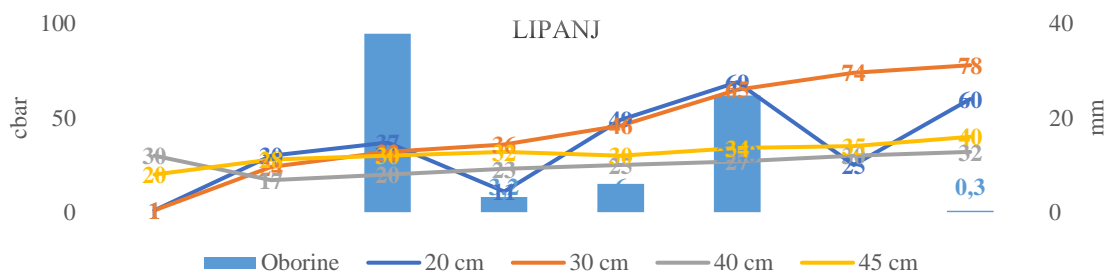
Grafikon 13. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca svibnja

Sveukupne je tijekom mjeseca svibnja sadržaj vode u tlu mjereno šest puta. U prosjeku je vlažnost tla na dubini od 20 cm bila 48 cbar, na dubini od 30 cm je bila 27,83 cbar, na dubini od 40 cm je bila 23,66 cbar te 18,50 cbar na dubini od 45 cm (tablica 3.).

Tablica 3. Watermark mjerenja tijekom mjeseca svibnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjek	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	6	48,00	0,00	73,00	26,86	55,96	10,96
30 cm	6	27,83	2,00	38,00	12,95	46,53	5,28
40 cm	6	23,66	0,00	34,00	12,40	52,41	5,06
45 cm	6	18,50	1,00	25,00	8,80	47,58	3,59

Grafikonom 14. je prikazana dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca lipnja. Vlažnost tla na dubini od 20 cm je bila u rasponu od 1 do 69 cbar, na dubini od 30 cm je bila u rasponu od 1 do 78 cbar, na dubini od 40 cm od 17 do 32 cbar te na dubini od 45 cm od 20 do 40 cbar.



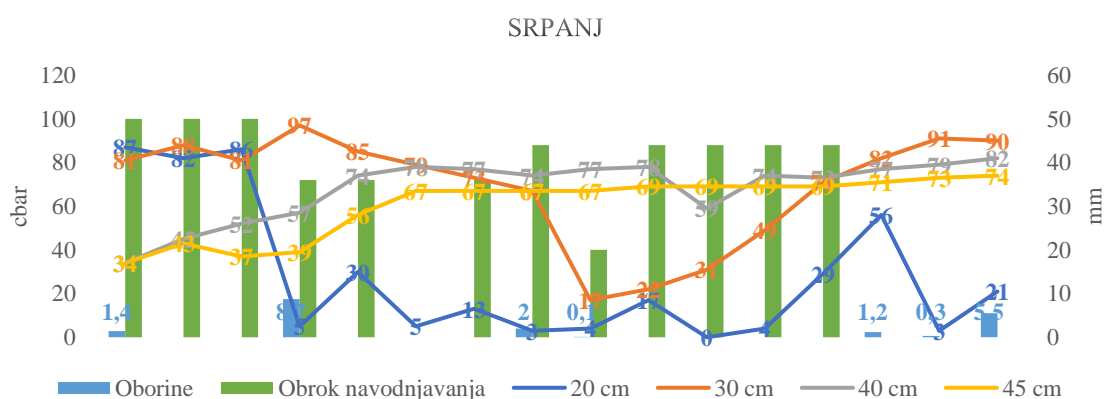
Grafikon 14. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca lipnja

Sveukupno je tijekom mjeseca lipnja sadržaj vode u tlu mjereno osam puta. Kako je vidljivo iz tablice 4., prosječan sadržaj vode na dubini od 20 cm je bio 37,75 cbar, na dubini od 30 cm 44,5 cbar, na dubini od 40 cm je bio 25,5 cbar te na dubini od 45 cm je bio 31,13 cbar.

Tablica 4. Watermark mjerenja tijekom mjeseca lipnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjeak	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	8	37,75	1,00	69,00	21,43	56,79	7,57
30 cm	8	44,50	1,00	78,00	26,60	59,79	9,40
40 cm	8	25,50	17,00	32,00	5,26	20,64	1,86
45 cm	8	31,13	20,00	40,00	5,84	18,76	2,06

Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca srpnja je prikazana grafikonom 15.



Grafikon 15. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca srpnja

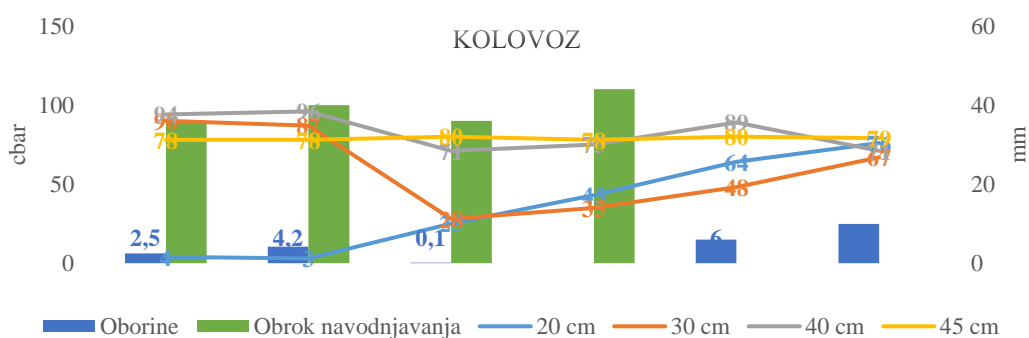
Sveukupno je tijekom mjeseca srpnja vlažnost tla mjerena 16 puta (tablica 5.), dodano je 454 mm kroz 11 obroka navodnjavanja (grafikon 15.).

Tablica 5. Watermark mjerenja tijekom mjeseca srpnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjek	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	16	27,81	0	87	31,82	114,41	7,95
30 cm	16	69,00	17	97	25,38	36,78	6,34
40 cm	16	68,13	34	82	14,22	20,88	3,56
45 cm	16	60,69	34	74	14,02	23,10	3,50

Vlažnost tla na dubini od 20 cm je bila u rasponu od 1 do 27 cbar, na dubini od 30 cm je bila u rasponu od 17 do 69 cbar, na dubini od 40 cm od 34 do 68 cbar te na dubini od 45 cm od 34 do 74 cbar.

Grafikonom 16. je prikazana dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca kolovoza, odnosno do kraja poljskog istraživanja (15. kolovoz).



Grafikon 16. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca kolovoza

Tijekom mjeseca kolovoza je sadržaj vode u tlu mjeran šest puta, a dodano je 156 mm u četiri obroka navodnjavanja (grafikon 16.). U prosjeku je sadržaj vode u tlu na dubini od 20 cm bio 35,8 cbar, na dubini od 30 cm je u prosjeku izmjereno 29,2 cbar, na dubini od 40 cm je u prosjeku izmjereno 82,7 cbar te na dubini od 45 cm je u prosjeku izmjereno 78,8 cbar (tablica 6.).

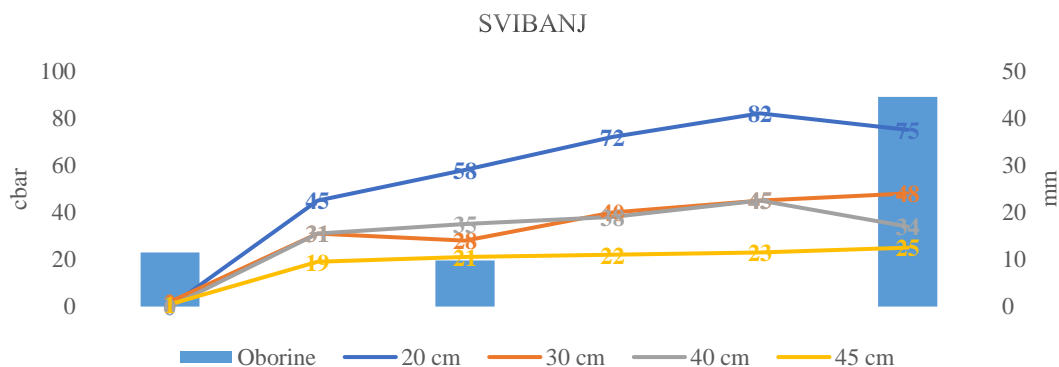
Tablica 6. Watermark mjerenja tijekom mjeseca kolovoza na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjek	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	6	35,83	3,00	76,00	30,55	85,25	12,47
30 cm	6	59,16	28,00	90,00	26,33	44,50	10,74
40 cm	6	82,66	71,00	96,00	11,63	14,07	4,75
45 cm	6	78,83	78,00	80,00	0,98	1,24	0,40

Na dubini od 20 cm je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 3 do 76 cbar, od 28 do 90 cbar na dubini od 30 cm, od 71 do 96 cbar na dubini od 40 cm te od 78 do 80 cbar na dubini od 45 cm.

#### Tenziometar

Dinamika vlažnosti tla tijekom mjeseca svibnja je prikazana grafikonom 17. Vlažnost tla bila je u rasponu od 0 do 82 cbar na 20 cm dubine senzora, od 2 do 48 cbar na 30 cm dubine senzora, od 0 do 45 cbar na 40 cm dubine senzora te od 1 do 25 cbar na 45 cm dubine senzora.



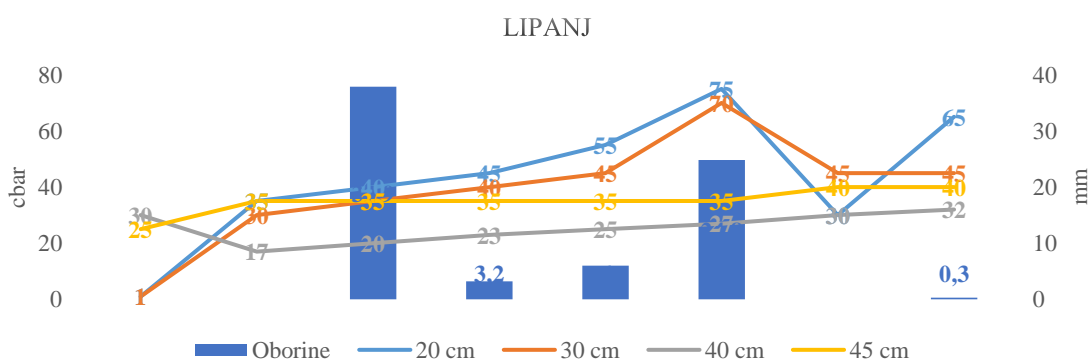
Grafikon 17. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca svibnja

Sveukupno je tijekom mjeseca svibnja sadržaj vode u tlu mjereno šest puta. U prosjeku je vlažnost tla na dubini od 20 cm bila 55,3 cbar, na dubini od 30 cm je bila 32,3 cbar, na dubini od 40 cm je bila 40,5 cbar te 18,50 cbar na dubini od 45 cm (tablica 7.).

Tablica 7. Mjerenja tenziometrom tijekom mjeseca svibnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjek	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	6	55,33	0,00	82,00	30,17	54,52	12,31
30 cm	6	32,33	2,00	48,00	16,76	51,85	6,84
40 cm	6	30,5	0,00	45,00	15,68	51,41	6,40
45 cm	6	18,5	1,00	25,00	8,80	47,58	3,59

Grafikonom 18. je prikazana dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca lipnja. Sveukupno je tijekom mjeseca lipnja sadržaj vode u tlu mjereno osam puta. U prosjeku je vlažnost tla na dubini od 20 cm bila 43,25 cbar, na dubini od 30 cm je bila 38,87 cbar, na dubini od 40 cm je bila 35,0 cbar te 25,50 cbar na dubini od 45 cm (tablica 8.).



Grafikon 18. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca lipnja

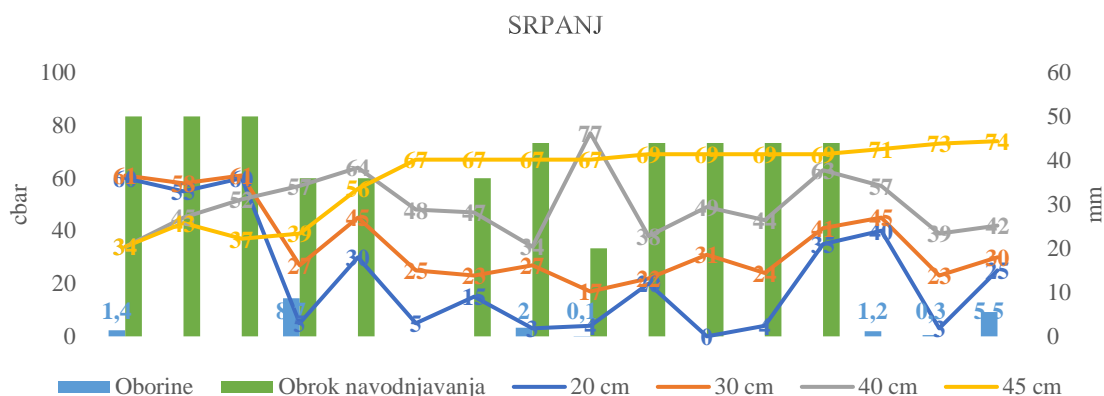
Vlažnost tla na dubini od 20 cm je bila u rasponu od 1 do 75 cbar, na dubini od 30 cm je bila u rasponu od 1 do 70 cbar, na dubini od 40 cm od 25 do 40 cbar te na dubini od 45 cm od 17 do 32 cbar (tablica 8.).

Tablica 8. Mjerenja tenziometrom tijekom mjeseca lipnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjek	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	8	43,25	1,00	75,00	22,87	52,88	8,08
30 cm	8	38,87	1,00	70,00	19,31	49,67	6,82
40 cm	8	35,00	25,00	40,00	4,62	13,22	1,63
45 cm	8	25,50	17,00	32,00	5,26	20,64	1,86



Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca srpnja je prikazana grafikonom 19. Tijekom mjeseca srpnja je sadržaj vode u tlu mjeran šesnaest puta, a dodano je 454 mm u jedanaest obroka navodnjavanja (grafikon 19.). U prosjeku je sadržaj vode u tlu na dubini od 20 cm bio 22,75 cbar, na dubini od 30 cm je u prosjeku izmjereno 35,00 cbar, na dubini od 40 cm je u prosjeku izmjereno 49,37 cbar te na dubini od 45 cm je u prosjeku izmjereno 60,68 cbar (tablica 9.).



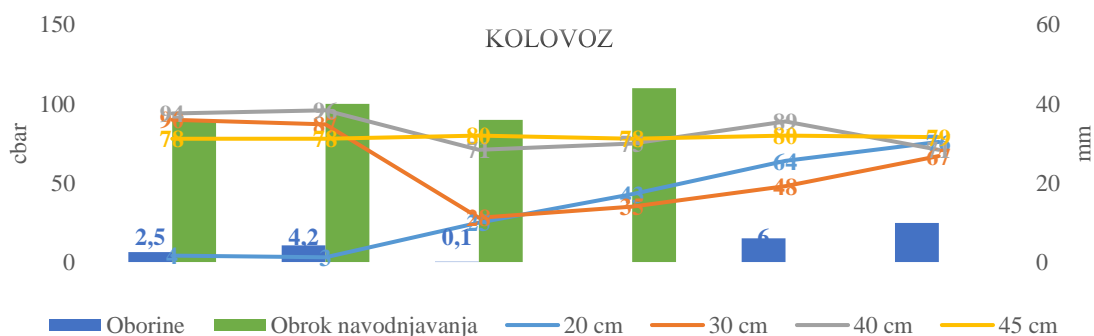
Grafikon 19. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca srpnja

Vlažnost tla bila je u rasponu od 0 do 60 cbar na 20 cm dubine senzora, od 17 do 61 cbar na 30 cm dubine senzora, od 37 do 77 cbar na 40 cm dubine senzora te od 34 do 74 cbar na 45 cm dubine senzora (tablica 9.).

Tablica 9. Mjerenja tenziometrom tijekom mjeseca srpnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjek	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	16	22,75	0,00	60,00	21,63	95,08	5,40
30 cm	16	35,00	17,00	61,00	14,80	42,30	3,70
40 cm	16	49,37	71,00	96,00	11,84	23,99	2,96
45 cm	16	60,68	78,00	80,00	14,02	23,10	3,50

Grafikonom 20. je prikazana dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca kolovoza, odnosno do kraja poljskog istraživanja (15. kolovoz).



Grafikon 20. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca kolovoza

Tijekom mjeseca kolovoza je sadržaj vode u tlu mjeran šest puta, a dodano je 156 mm u četiri obroka navodnjavanja (grafikon 20.). U prosjeku je sadržaj vode u tlu na dubini od 20 cm bio 38,5 cbar, na dubini od 30 cm je u prosjeku izmjereno 54,1 cbar, na dubini od 40 cm je u prosjeku izmjereno 49,5 cbar te na dubini od 45 cm je u prosjeku izmjereno 32,3 cbar (tablica 10.).

Tablica 10. Mjerenja teziometrom tijekom mjeseca kolovoza na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm)

	N	Prosjek	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije	Standardna greška
20 cm	6	38,50	1,00	80,00	30,84	80,12	12,59
30 cm	6	54,16	28,00	80,00	20,42	37,71	8,34
40 cm	6	49,50	31,00	61,00	10,65	21,52	4,34
45 cm	6	32,33	20,00	40,00	9,58	29,64	3,91

Na dubini od 20 cm je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 1,0 do 80 cbar, od 28 do 80 cbar na dubini od 30 cm, od 31 do 61 cbar na dubini od 40 cm te od 20 do 40 cbar na dubini od 45 cm.

#### 4.4. Kvaliteta vode za navodnjavanje

Rezultati analize kvalitete vode za navodnjavanje ne pokazuju odstupanje u količini soli, pH vrijednosti te sadržaju elemenata: Fe, Cl, Mn, Ca, Mg, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Izmjerena su odstupanja u sadržaju amonija (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 0,71 mg/l). Prema tome, voda za navodnjavanje se može koristiti bez ograničenja, dok povećan sadržaj amonijevih iona treba uzeti u obzir kod analize tla i preporuke za gnojidbu.

## 5. RASPRAVA

Promatrano razdoblje je okarakterizirao nedostatak oborine i nadprosječno visoke temperature zraka posebice u ljetnom razdoblju kada je tijekom mjeseca lipnja srednja dnevna temperatura zraka bila za čak 3,8 °C viša u odnosu na višegodišnji prosjek. Mjesec srpanj je bio najzahtjevniji u pogledu klimatskih čimbenika jer se pored nadprosječno visoke temperature zraka, koja je za 2,7 °C bila viša u odnosu na višegodišnji prosjek, javio nedostatak oborine. Naime, tijekom mjeseca srpnja je na promatranom području palo tek 19,2 mm oborine što svakako nije bilo dostatno da bi potrebe kulture bile zadovoljene. U prilog tome govori rezultat analize vodne bilance prema koje je tijekom promatranog razdoblja ukupno nedostajalo 397,5 mm oborine, odnosno 356 mm oborine u razdoblju od travnja do kolovoza, a pri tome je najveći nedostatak oborine zamijećen tijekom mjeseca srpnja (147,4 mm). U početnom dijelu istraživanja, odnosno tijekom mjeseca svibnja i lipnja je sadržaj vode bio u rasponu 80 do 100 % pvk, odnosno nije bilo potrebe za navodnjavanjem.

U početnom dijelu istraživanja, tijekom mjeseca svibnja je jasno vidljiv manji sadržaj vode u tlu na dubini od 20 cm što je posljedica isušivanja površinskog sloja uslijed vjetra i temperature zraka, te naravno uslijed potrošnje vode od strane biljaka. Povećanjem dubine na kojoj su postavljeni uređaji za mjerenje vlažnosti tla na početnom dijelu istraživanja je rastao i sadržaj vode u tlu (20 cm = 48 cbar; 45 cm = 18,5 cbar). To znači da je u tlu još bila prisutna zaliha proljetne vlage.

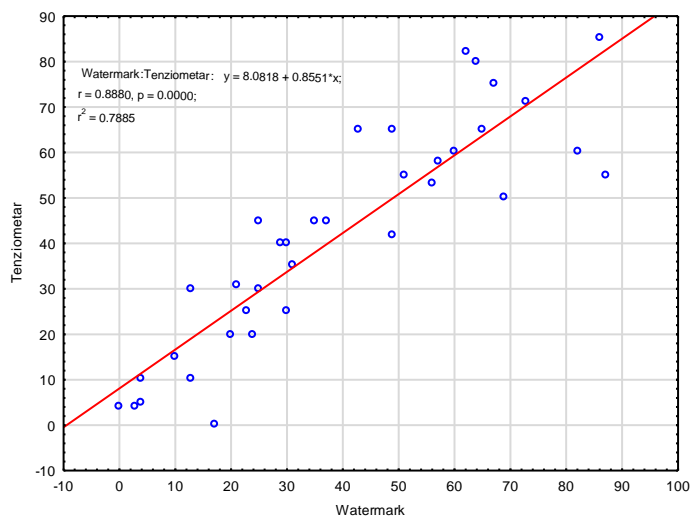
Trenutak početka navodnjavanja je uglavnom određivan prema rezultatima mjerenja vlažnosti tla na dubini od 20 do 30 cm gdje se nalazi glavina mase korijenovog sustava, a pored toga je na toj dubini najveća dinamika sadržaja vode u tlu. Tijekom mjeseca lipnja je izraženije smanjivanje sadržaja vode u tlu u čitavom dijelu profila, odnosno od 20 do 45 cm što je posljedica utroška vode od strane biljaka. Na dubini od 20 i 30 cm gdje je najzamjetnija dinamika vlažnosti tla. Primjerice, krajem mjeseca svibnja je palo 44,4 mm na što su oba senzora odreagirala, a to dokazuje smanjenje vlažnosti tla na Watermark senzoru (20 cm) od 73 cbar do 1 cbar pri čemu 1 cbar predstavlja saturirano tlo, te od 38 cbar do 1 cbar (30 cm). Što se tiče tenziometra, u spomenutom razdoblju je sadržaj vode u tlu na dubini od 20 cm pao sa 73 cbar na 1 cbar te na dubini od 30 cm, sadržaj vode u tlu je pao od 38 cbar na 1 cbar. Na dubini od 40 i 45 cm nije zabilježena promjena u vlažnosti tla kod nijednog senzora.

Tijekom mjeseca lipnja su oba senzora na 20 cm zabilježila promjene u vlažnosti tla nakon oborine 37,9 mm (od 7. do 12. lipnja) te od 24,8 mm (23. lipnja).

Obzirom na to da tijekom mjeseca svibnja i lipnja nije bilo značajnijeg nedostatka vode, sustav za navodnjavanje je pušten u pogon tek u mjesecu srpnju kada je ukupno dodano 454 mm kroz jedanaest obroka navodnjavanja. Obrok navodnjavanja tijekom mjeseca srpnja je bio u rasponu od 20 do 50 l m<sup>2</sup>, što znači da je navodnjavao od 5 do 11 sati (h). Iz navedenog se može zaključiti kako je protok jedne kapaljke 4 l sec<sup>-1</sup>. Prema rezultatima umjeravanja, sadržaj vode u tlu kod vrijednosti 10 do 40 cbar predstavlja vrijednost 100 % pvk, 40 – 60 cbar predstavlja vrijednost 80 % pvk, a 60 – 80 cbar predstavlja vrijednost 60 % pvk. Prema tome, trenutak početka navodnjavanja je bio kada su vrijednosti na uređaju bile u rasponu od 40 do 80 % pvk. Senzor koji je bio postavljen na dubinu od 20 cm je reagirao na promjene vlažnosti tla što je jasno vidljivo iz grafikona 19. Kod spomenutog senzora, jednako kao i kod senzora koje je bio postavljen na dubinu od 30 cm i 40 cm, vidljivo je da obrocima navodnjavanja sadržaj vode u tlu uspješno održavan u rasponu od 60 – 100 % pvk. Ipak, važno je istaknuti kako je veći sadržaj vode u tlu zabilježen na senzoru koji je bio postavljen na dubinu od 20 cm što je i logičan rezultat obroka navodnjavanja. Veća dinamika vlažnosti tla do dubine od 30 cm je vidljiva iz tablice 9., gdje je raspon vlažnosti tla na dubini od 20 cm od 0 do 60 cbar, odnosno od 17 do 61 cbar na dubini od 30 cm. Uslijed nedostatka oborine i nadprosječno visokih temperatura zraka tijekom mjeseca kolovoza se javlja nedostatak vode koji je nadoknađen sa 156 mm u četiri obroka navodnjavanja. Pri tome je sadržaj vode u tlu na dubini od 20 cm uspješno održavan na vrijednosti od 100 % pvk, dok je daljnjim dodavanjem dva obroka navodnjavanja (36 mm i 40 mm) sadržaj vode na dubini od 30 cm povećan na 100 % pvk (28 cbar, grafikon 20.). Nakon toga su dodana dva obroka navodnjavanja od 36 mm i 44 mm što je sadržaj vode u tlu na dubini od 20 cm i 30 cm uspješno održavan na 80 do 100 % pvk. Obzirom na to da je u slijedećih par dana palo preko 16 l kiše, s navodnjavanjem je završeno sve do kraja istraživanja. Što se tiče senzora na dubini od 40 cm i 45 cm vidljiv je ujednačen sadržaj vode u tlu tijekom cijelog mjeseca kolovoza, odnosno od početka mjeseca do kraja istraživanja (15. kolovoza). Sadržaj vode u tlu je u prosjeku na obje dubine je bio na razini od 60 % pvk. Obrok navodnjavanja od 36 mm i 45 mm nije promijenio sadržaj vode u tlu na spomenutim dubinama.

Tenziometar je ujednačeno pratio izmjene vlažnosti tla, jednako kao i Watermark uređaj. Uređaji su pokazali dobru ujednačenost u reakciji na izmjene vlažnosti tla uslijed oborina ili

obroka navodnjavanja. Statistički značajan ( $p < 0,01$ ) koeficijent korelacije je  $r = 0,8$  (grafikon 21.).



Grafikon 21. Korelacijska povezanost između mjerenja dobivena Watermark i tenziometrom

Važno je istaknuti kako je za dobro funkcioniranje tenziometra bilo potrebno učestalo provjeravanje sadržaja vode u spremniku kako uređaj ne bi ostao bez vode. U tom slučaju se gubi kontakt između senzora i tla, odnosno senzor prestaje biti funkcionalan. Navedeno je najčešće izdvojeno kao najveći nedostatak ovog senzora, uz činjenicu kako je točnost mjerenja uvjetovana visokim sadržajem vode u tlu.

## 6. ZAKLJUČAK

Određivanje trenutka početka navodnjavanja je jedan od najvažnijih elemenata u praksi navodnjavanja. Pravilno odabran uređaj za mjerenje vlažnosti tla će ovisiti o uzgajanoj kulturi, izvoru i kvaliteti vode za navodnjavanje. Prema rezultatima istraživanja nema ograničenja u korištenju vode za navodnjavanje u pogledu njezine kakvoće. Trajanjem navodnjavanja u prosjeku od 8 do 10 sati je uspješno održavan sadržaj vode u tlu na razini od 60 (80) do 100 % pvk na svim dubinama na kojima su senzori postavljeni. Watermark, jednako kao tenziometar je brzo reagirao na izmjene vlažnosti tla uslijed oborina ili obroka navodnjavanja. Spomenuto je posebice izraženo tijekom mjeseci u kojima je zabilježen značajan nedostatak oborine, odnosno tijekom mjeseca srpnja i kolovoza. U spomenutim mjesecima je zabilježena najveća dinamika vlažnosti tla. Analiza korelacijske povezanosti ukazuje na vrlo jaku povezanost između Watermark i mjerenja dobivenih tenziometrom, što znači da su oba senzora dobro reagirali na izmjene vlažnosti tla, posebice na dubini od 20 i 30 cm.

## 7. LITERATURA

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998.): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, Italy.
2. Adalakun, I.A., Ranjan, R.S. (2013.): Design of a multilevel TDR probe for measuring soil water content at different depths. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 56(4): 1451-1460.
3. Benor, M., Levy, G.J., Mishael, Y., Nadler, A. (2012.): Salinity Effects on the Fieldscout TDR 300 Soil Moisture Meter Readings. Soil Physic Note, 77: 412-416.
4. Black, C.A. (1965.): Methods of Soil Analysis: Part I Physical and mineralogical properties. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
5. Brevik, E. (2012.): Evaluation of the FieldScout TDR300 for Determining Volumetric Water Content in Sandy South Georgia Soils. Soil Horizont, 53: 27–30.
6. Chung, C.C., Lin, C.P. (2009.): Apparent Dielectric Constant and Effective Frequency of TDR Measurements: Influencing Factors and Comparison. Vadose Zone Journal, 8: 548 – 556.
7. Cormier, J., Depardieu, C., Letourneau, G., Boily, C., Gallichand, J., Caron, J. (2020.): Tensiometer-based irrigation scheduling and water use efficiency of field-grown strawberries. Agronomy Journal, 112: 2581– 2597.
8. Čačić, F. (2019.): Metode i uređaji za mjerenje vlage. Završi rad. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.
9. Food and agricultural organisation of United Nations (1985.): Water quality for agriculture. Irrigation and drainage paper 29, 1985. Rome, Italy.
10. Gereš, D. (2004.) Kruženje vode u zemljinom sustavu. Građevinar, vol. 56, no. 06, str. 355-365. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/10157> (18.7. 2022.)
11. Haman, D.Z., Yeager, T.H. (2003.): Controlling Irrigation with Tensiometers and Time domain reflectometry (TDR). A final report from years of research about using various tools to monitor water in containers to control irrigation. Dostupno na: <http://www.nurserycropscience.info/water/system-design-and->

- [management/efficiency/yeager-controlling-irrigation-with-tdr-and.pdf/view](#)  
(15. 06. 2022.)
12. Haryati, U., Sinukaban, N., Murtalaksono, K., Abdurachman, A. (2010.): Management Allowable Depletion (MAD) Level for Water Use Efficiency of Chili on Typic Kanhapludults at Tamanbogo, Lampung. Indonesian Soil and Climate Journal, 31: 11 – 25.
  13. Hoppula, K.I., Salo, T.J. (2007.): Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. Irrigation Science, 25: 401–409.
  14. IAEA, International Atomic Energy Agency (2008.): Field Estimation of Soil Water Content A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology. Training course series No. 30. Vienna, 2008. Dostupno na: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/079/39079658.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/079/39079658.pdf?r=1) (18. 07. 2022.)
  15. Kirkham, M.B. (2004.): Principles of Soil and Plant Water Relations; Elsevier Academic Press: Burlington, MA, USA, 153–161.
  16. Krüger, E., Schmidt, G., Brückner U. (1999.): Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. Scientia Horticulturae, 81(4): 409-424.
  17. Kukal, S.S., Hira, G.S. Sidhu, A.S. (2005.): Soil matric potential-based irrigation scheduling to rice (*Oryza sativa*). Irrigation Science, 23: 153–159.
  18. Li, SH., Huguet, JG. Bussi, C. (1989.): Irrigation scheduling in a mature peach orchard using tensiometers and dendrometers. Irrigation Drainage System, 3: 1–12.
  19. Madjar, S., Šoštarčić J. (2009.): Navodnjavanje poljoprivrednih kultura. OBŽ, Osijek. Str. 6 – 55.
  20. Marković, M. (2013.): Utjecaj navodnjavanja i gnojidbe dušikom na prinos i kakvoću hibrida kukuruza (*Zea mays* L.). Doktorska disertacija. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet Osijek.
  21. MOA, Ministry of agriculture (2015.): Irrigation scheduling with tensiometers. Water conservation factsheet 577 100-2. British Columbia. Dostupno na: [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/agricultural-land-and-environment/water/irrigation/577100-2\\_irrigation\\_scheduling\\_with\\_tensiometers.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/agricultural-land-and-environment/water/irrigation/577100-2_irrigation_scheduling_with_tensiometers.pdf) (22. 07. 2022.)



22. Mortl, A., R. Munoz-Carpena., D. Kaplan, Y. Li. 2011. Calibration of a combined dielectric probe for soil moisture and pore water salinity measurement in organic and mineral coasta wetland soils. *Geoderma* 161(1-2): 50-62.
23. Purgar, M. (2019.) Mjerenje pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzorka tla u hidrauličkom edometru. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.
24. Raviv, M., Lieth, J. H. (2008.): *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, Netherland.
25. Reynolds, S.G. (1970.): The gravimetric method of soil moisture determination Part I A study of equipment, and methodological problems. *Journal of Hydrology*, 11(3): 258-273.
26. Serena, M., B. Leinauer, and M. Schiavov. 2011. Comparing soil moisture uniformity in sprinklers and subsurface drip irrigated warm season turfgrass. Paper presented at: Fundamental for life: Soil, crop, and environmental sciences. ASA, CSSA, SSSA Annual Meetings, San Antonio, TX. 16-19 Oct. Paper 104-4.
27. Smith M. (1992.): *CROPWAT - A Computer Program for Irrigation Planning and Management*; Irrigation and Drainage Paper 46; Food and Agriculture Organisation: Rome, Italy.
28. Spectrum Technologies 2009. *Fieldscout TDR 300 soil moisture meter product manual*. Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, IL.
29. Stonewell, L., Gelernter W. (2008.): Evaluation of a Geonics EM38 and NTechGreessker sensor array for use in precision turfgrass management. Joint Annual Meeting, Houston, TX. 5-9, Oct.
30. Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980.): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.
31. USDA, United States Department of Agronomy (1990.): *Irrigation Water Management When and How Much to Irrigate*. Dostupno na: <http://animalrange.montana.edu/documents/extension/cropirr.pdf> (14. 08.2022.)
32. Vucić N. (1987.). *Vodni, vazdušni i toplotni režim zemljišta*, Novi Sad
33. Vukadinović, V., Vukadinović V. (2018.): *Zemljišni resursi: Vrednovanje poljoprivrednih zemljišnih resursa*. Str. 29 – 71. Dostupno na: [http://tlo-i-biljka.eu/Gnojidba/Zemljisni\\_resursi.pdf](http://tlo-i-biljka.eu/Gnojidba/Zemljisni_resursi.pdf) (17. 06.2022.)
34. Vasilj, Đ. (2000.): *Biometrika i eksperimentiranje u bilinogojstvu*. Zagreb.

35. Voroney, P. (2019.): Horse pasture management. Chapter 4 - Soils for Horse Pasture Management, 65 – 79. Urednik: Paul Sharpe, Academic Press.
36. Zaninović, K.; Gajć-Čapka, M.; Tadić, M.P.; Vučetić, M.; Milković, J.; Bajić, A.; Cindrić, K.; Cvitan, L.; Katusin, Z.; Kaucić, D. (2008.): Climate Atlas of Croatia; Meteorological and Hydrological Service of Croatia: Zagreb, Croatia, 2008.
37. Weil, R.P.; Brady, N.C. The Nature and Properties of Soils, 15th ed.; Pearson Educ.: Harlow, UK, 2
38. Western, A. W., and M. S. Seyfried. 2005. A calibration and temperature correction procedure for the water-content reflectometer. *Hydrol. Proc.* 19(18): 3785-3793.
39. Yu, X., B. Zhang, N. Liu, and X. Yu. 2010. Comparison study of three common technologies for freezing-thawing measurement. *Adv. Civil Eng.* 2013–2217.

## **8. POPIS SLIKA**

Slika 1. Hidrološki procesi. Str. 3

Slika 2. Prikaz građe tla. Str. 3

Slika 3. Prikaz sposobnosti držanja čestica tla kod različitih prikaza vodnih konstanti. Str. 6

Slika 4. Metode mjerenja vlažnosti tla. Str. 12

Slika 5. Cilindri po Kopeckom. Str. 13

Slika 6. Umjeravanje senzora za umjeravanje vlažnosti tla. Str. 13

Slika 7. Tenziometar. Str. 15

Slika 8. Dijelovi tenziometra. Str. 15

Slika 9. Tenziometar u dubini korijenovog sustava. Str. 16

Slika 10. TDR uređaj. Str. 17

Slika 11. Watermark uređaj za mjerenje vlage tla. Str. 19

Slika 12. Gipsani blok. Str. 19

Slika 13. Watermark. Str. 20

Slika 14. Prikaz prikladnog mjesta za postavljanje senzora. Str. 21

Slika 15. Shematski prikaz voćnjaka i položaj senzora za mjerenje vlažnosti tla. Str. 22

Slika 16. Watermark senzor u posudi s vodom. Str. 23

Slika 17. Tenziometar u posudi s vodom. Str. 23

Slika 18. Svrđlo za postavljanje senzora u tlo. Str. 24

Slika 19. Punjenje senzora destiliranom vodom. Str. 24

## 9. POPIS TABLICA I GRAFIKONA

Grafikon 1. Krivulja umjeravanja. Str. 14

Grafikon 2. Odnos TDR mjerenja i sadržaja vode u tlu mjeren metodom gravimetrije. Str. 18

Grafikon 3. Krivulja umjeravanja. Str. 21

Grafikon 4. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ ) tijekom mjeseca travnja. Str. 27

Grafikon 5. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ ) tijekom mjeseca svibnja. Str. 27

Grafikon 6. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ ) tijekom mjeseca lipnja. Str. 28

Grafikon 7. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ ) tijekom mjeseca srpnja. Str. 28

Grafikon 8. Dnevna količina oborine (mm) i temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ ) tijekom mjeseca kolovoza. Str. 29

Grafikon 9. Klimadijagram za promatrano razdoblje. Str. 29

Grafikon 10. Grafikon 10. Vodna bilanca za promatrano razdoblje (siječanj – kolovoz). Str. 30

Grafikon 11. Grafikon 11. Rezultati pF analize. Str. 30

Grafikon 12. Grafikon 12. Krivulja umjeravanja. Str. 30

Grafikon 13. Grafikon 13. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca svibnja. Str. 31

Grafikon 14. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca lipnja. Str. 32

Grafikon 15. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca srpnja. Str. 32

- Grafikon 16. Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark uređajem tijekom mjeseca kolovoza. Str. 33
- Grafikon 17. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca svibnja. Str. 34
- Grafikon 18. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca lipnja. Str. 35
- Grafikon 19. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca srpnja. Str. 36
- Grafikon 20. Dinamika vlažnosti tla mjerena tenziometrom tijekom mjeseca kolovoza. Str. 37
- Grafikon 21. Korelacijska povezanost između mjerenja dobivena Watermark i tenziometrom. Str. 40
- Tablica 1. Sile držanja čestice tla kod različitih stanja vlažnosti tla. Str. 8
- Tablica 2. Pvk, Lkv i pristupačna voda ( $m^3 m^3$ ) ovisno o tipu tla. Str. 9
- Tablica 3. Watermark mjerenja tijekom mjeseca svibnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 31
- Tablica 4. Watermark mjerenja tijekom mjeseca lipnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 32
- Tablica 5. Watermark mjerenja tijekom mjeseca srpnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 33
- Tablica 6. Watermark mjerenja tijekom mjeseca kolovoza na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 34
- Tablica 7. Mjerenja tenziometrom tijekom mjeseca svibnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 35
- Tablica 8. Mjerenja tenziometrom tijekom mjeseca lipnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 35
- Tablica 9. Mjerenja tenziometrom tijekom mjeseca srpnja na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 36
- Tablica 10. Mjerenja tenziometrom tijekom mjeseca kolovoza na promatranim dubinama tla (20, 30, 40 i 45 cm). Str. 37

## 10. SAŽETAK

Istraživanje je postavljeno na pokušalištu Tenja, Fakultetu agrobiotehničkih znanosti Osijek. U nasadu jabuke su postavljena dva tipa senzora, odnosno Watermark senzor koji radi na principu elektrometrije te tenziometar koji radi na principu tenziometrije. Prije postavljanja u tlo, senzori su pripremljeni prema uputama proizvođača te je izrađena krivulja umjeravanja koja je služila za interpretaciju dobivenih podataka, odnosno za određivanje trenutka početka navodnjavanja. Količina oborine tijekom svibnja i lipnja su zadovoljile potrebu biljaka za vodom, odnosno nije bilo potrebe za navodnjavanjem. Tijekom mjeseca srpnja je ukupno dodano 454 mm u jedanaest obroka navodnjavanja. Tijekom mjeseca kolovoza je ukupno dodano 156 mm u četiri obroka navodnjavanja. Oba senzora su dobro reagirali na izmjene vlažnosti tla, posebice u gornjem sloju profila tla, odnosno na dubini od 20 cm i 30 cm gdje je i očekivana najveća dinamika vlažnosti. Obrocima navodnjavanja je uspješno sadržaj vode u tlu održavan na razini od 60 (80) do 100 % poljskog vodnog kapaciteta. Analiza korelacijske povezanosti između Watermark senzora i tenziometra je pokazala vrlo jaku statistički opravdanu ( $p < 0,01$ ) povezanost ( $r = 0,8$ ).

## **11. SUMMARY**

The research was set up at the Tenja experimental site of the Faculty of Agrobiotechnical Sciences, Osijek. Two types of sensors for measuring soil water content were placed in the apple orchard, namely the Watermark sensor that works on the principle of electrometry and the tensiometer that works on the principle of tensiometry. Before placing the sensors in the soil, they were prepared according to the manufacturer's instructions, and a calibration curve was created that was used to interpret the obtained data, i.e. to determine the irrigation time. The amount of precipitation during May and June satisfied the plants' need for water, that is, there was no need for irrigation. During the month of July, a total of 454 mm was added in eleven irrigation events. During the month of August, a total of 156 mm was added in four irrigation events. Both sensors responded well to changes in soil moisture, especially in the upper layer of the soil profile, that is, at a depth of 20 cm and 30 cm, where the highest dynamics of moisture are expected. With irrigation rates the soil water content was successfully maintained at the level of 60 (80) to 100% of the field's water capacity. The correlation analysis between the Watermark sensor and the tensiometer showed a very strong statistically justified ( $p < 0.01$ ) correlation ( $r = 0.8$ ).

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Diplomski rad

Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Sveučilišni diplomski studij Povrćarstvo i cvjećarstvo

Praćenje dinamike vlažnosti tla različitim sensorima u navodnjavanom voćnjaku

Ana Stanušić

**Sažetak:** Istraživanje je postavljeno na pokušalištu Tenja, Fakultetu agrobiotehničkih znanosti Osijek. U nasadu jabuke su postavljena dva tipa senzora, odnosno Watermark senzor koji radi na principu elektrometrije te tenziometar koji radi na principu tenziometrije. Prije postavljanja u tlo, senzori su pripremljeni prema uputama proizvođača te je izrađena krivulja umjeravanja koja je služila za interpretaciju dobivenih podataka, odnosno za određivanje trenutka početka navodnjavanja. Količina oborine tijekom svibnja i lipnja su zadovoljile potrebu biljaka za vodom, odnosno nije bilo potrebe za navodnjavanjem. Tijekom mjeseca srpnja je ukupno dodano 454 mm u jedanaest obroka navodnjavanja. Tijekom mjeseca kolovoza je ukupno dodano 156 mm u četiri obroka navodnjavanja. Oba senzora su dobro reagirali na izmjene vlažnosti tla, posebice u gornjem sloju profila tla, odnosno na dubini od 20 cm i 30 cm gdje je i očekivana najveća dinamika vlažnosti. Obrocima navodnjavanja je uspješno sadržaj vode u tlu održavan na razini od 60 (80) do 100 % poljskog vodnog kapaciteta. Analiza korelacijske povezanosti između Watermark senzora i tenziometra je pokazala vrlo jaku statistički opravdanu ( $p < 0,01$ ) povezanost ( $r = 0,8$ ).

**Rad je izrađen pri:** Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

**Mentor:** izv. prof. dr sc. Monika Marković

**Broj stranica:** 50

**Broj grafikona i slika:** 34

**Broj tablica:** 10

**Broj literaturnih navoda:** 39

**Broj priloga:** 0

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Ključne riječi:** mjerenje vlažnosti tla, senzori, lokalizirano navodnjavanje

**Datum obrane:**

**Povjerenstvo za ocjenu završnog rada:**

1. prof. dr. sc. Aleksandar Stanisavljević, član
2. izv. prof. dr. sc. Monika Marković, mentor
3. Dejan Bošnjak, dipl. ing. agr.

Rad je pohranjen u: Knjižnica fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište u Osijeku, Vladimira Preloga 1

**BASIC DOCUMENTATION CARD**



Measuring soil water dynamics in an irrigated orchard by different soil moisture sensors

Ana Stanušić

**Summary:** The research was set up at the Tenja experimental site of the Faculty of Agrobiotechnical Sciences, Osijek. Two types of sensors for measuring soil water content were placed in the apple orchard, namely the Watermark sensor that works on the principle of electrometry and the tensiometer that works on the principle of tensiometry. Before placing the sensors in the soil, they were prepared according to the manufacturer's instructions, and a calibration curve was created that was used to interpret the obtained data, i.e. to determine the irrigation time. The amount of precipitation during May and June satisfied the plants' need for water, that is, there was no need for irrigation. During the month of July, a total of 454 mm was added in eleven irrigation events. During the month of August, a total of 156 mm was added in four irrigation events. Both sensors responded well to changes in soil moisture, especially in the upper layer of the soil profile, that is, at a depth of 20 cm and 30 cm, where the highest dynamics of moisture are expected. With irrigation rates the soil water content was successfully maintained at the level of 60 (80) to 100% of the field's water capacity. The correlation analysis between the Watermark sensor and the tensiometer showed a very strong statistically justified ( $p < 0.01$ ) correlation ( $r = 0.8$ ).

**Thesis performed at:** Faculty of agrobiotechnical sciences Osijek

**Mentor:** Monika Marković, Associate professor

**Number of pages:** 50

**Number of figures:** 34

**Number of tables:** 10

**Number of references:** 39

**Number of appendices:** 0

**Original in:** Croatian

**Key words:** measuring soil water content, soil moisture sensors, dripping irrigation

**Thesis defended on date:**

**Original in:** Croatian

**Reviewers:**

1. Aleksandar Stanisavljević, PhD, Full professor, president
2. Monika Marković, PhD, Associate professor, mentor
3. Dejan Bošnjak, mag. ing. agr.

**Thesis deposited at:** Library, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Vladimira Preloga 1