

Utvrđivanje vlage tla Cosmic Ray Neutron senzorom i potreba kultura za navodnjavanjem na pokušalištu Maksimir

Madžar, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:372766>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

**Utvrdjivanje vlage tla Cosmic Ray Neutron senzorom
i potreba kultura za navodnjavanjem
na pokušalištu Maksimir**

DIPLOMSKI RAD

Marko Madžar

Zagreb, rujan, 2024.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

Diplomski studij:

Poljoprivredna tehnika-Melioracije

**Utvrđivanje vlage tla Cosmic Ray Neutron senzorom
i potreba kultura za navodnjavanjem
na pokušalištu Maksimir**

DIPLOMSKI RAD

Marko Madžar

Mentor:

Prof. dr. sc. Gabrijel Ondrašek

Zagreb, rujan, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZJAVA STUDENTA
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Marko Madžar**, JMBAG 0178113393, rođen 06.10.1998. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

Utvrdjivanje vlage tla Cosmic Ray Neutron senzorom i potreba kultura za navodnjavanjem na pokušalištu Maksimir

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica/jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____

Potpis studenta

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta **Marka Madžara**, JMBAG 0178113393, naslova

**Utvrđivanje vlage tla Cosmic Ray Neutron senzorom i potreba kultura za navodnjavanjem
na pokušalištu Maksimir**

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____, dana _____.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. Prof. dr. sc. **Gabrijel Ondrašek** mentor

2. Izv. prof. dr. sc. **Monika Zovko** član

3. Prof. dr. sc. **Željko Jukić** član

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Cilj rada	3
2. Pregled literature	4
2.1. Tradicionalne metode za određivanje sadržaja vode u tlu	4
2.2. Metoda kozmičkog zračenja za određivanje vlažnosti tla	5
2.3. Modeliranje potreba poljoprivrednih kultura za vodom	7
3. Materijali i metode istraživanja	9
3.1. Instalacija, kalibracija i validacija Cosmic Ray Neutron senzora	9
3.2. Metodologija izračuna potreba kultura za vodom u CROPWAT-u	13
4. Rezultati i rasprava	14
4.1. Vrijednosti sadržaja vode u tlu	14
4.2. Izračun potreba kultura za vodom u CROPWAT-u	16
5. Zaključak	22
6. Popis literature	23
Životopis	26

Sažetak

Na pokušalištu Maksimir 2024. godine uspješno je instaliran i validiran napredni CRNS uređaj za mjerenje vlažnosti tla. Validacija uređaja, provedena usporedbom s gravimetrijskom i TDR metodom pokazala je visoku točnost CRNS. U travnju 2024., razlika u mjerenjima između CRNS i gravimetrijske metode iznosila je samo 1,8 %, dok je u rujnu, pri usporedbi s TDR metodom razlika bila 5,7 %. Iako rezultati CRNS mogu varirati u odnosu na metode koje mjere manji volumen tla, njegova sposobnost obuhvata većih površina i dubljih slojeva tla čini ga neprocjenjivim alatom u poljoprivredi i ekološkim istraživanjima. Analiza efektivnih oborina i normi navodnjavanja za različite usjeve, poput pšenice, kukuruza, soje i suncokreta, provedena u računalnom programu CROPWAT za razdoblje od 1988. do 2017. godine, pokazuje kako usjevi različito reagiraju na raspoloživost efektivnih oborina u smislu normi navodnjavanja, koje su najmanje kod pšenice (56 mm), zatim kukuruza i suncokreta (105 mm), a najveće kod soje (124 mm). Korištenje CRNS-a u kombinaciji s drugim metodama omogućava bolje planiranje navodnjavanja prema specifičnim potrebama kultura, što je ključno za održivu poljoprivredu i optimalno korištenje vodnih resursa pogotovo u uvjetima navodnjavanja.

Ključne riječi: vlažnost tla, Cosmic Ray Neutron senzor, CropWat, navodnjavanje.

Summary

At the Maksimir experimental field in 2024, an advanced Cosmic Ray Neutron Sensor (CRNS) for measuring soil moisture was successfully installed and validated. The validation of the device, conducted by comparing it with the gravimetric and TDR methods, demonstrated the high accuracy of the CRNS. In April 2024, the difference in measurements between the CRNS and the gravimetric method was only 1.8 %, while in September, when compared with the TDR method, the difference was 5.7 %. Although CRNS results may vary from methods that measure smaller soil volumes, its ability to cover larger areas and deeper soil layers makes it an invaluable tool in agriculture and ecological research. The analysis of effective precipitation and irrigation norms for different crops, such as wheat, corn, soybean, and sunflower, conducted using the CROPWAT software for the period from 1988 to 2017, shows how crops respond differently to the availability of effective precipitation in terms of irrigation norms, which are lowest for wheat (56 mm), followed by corn and sunflower (105 mm), and highest for soybean (124 mm). The use of the CRNS in combination with other methods allows for better irrigation planning according to the specific needs of crops, which is crucial for sustainable agriculture and optimal use of water resources, especially in irrigation conditions.

Key words: soil moisture, Cosmic Ray Neutron sensor, CropWat, irrigation.

1. Uvod

Gospodarenje vodnim resursima u poljoprivredi predstavlja jedan od najvećih izazova današnjice, osobito u kontekstu klimatskih promjena i sve veće potražnje za hranom. Poljoprivredna proizvodnja uvelike ovisi o dostupnosti vode, a njezin manjak izravno smanjuje kvalitetu i količinu prinosa (Kirda, 2002.; Tognetti i sur., 2006.; Quiroga i sur., 2011.). Nedostatak vode predstavlja jedan od glavnih abiotskih čimbenika koji ograničava produktivnost usjeva, posebno u sušnim regijama (Abebe i sur., 2003.). S obzirom da sektor poljoprivrede koristi oko 70% svjetskih zaliha slatke vode (Feres i Soriano, 2007., USDA, 1967.), održivije upravljanje vodnim resursima postaje neophodno. Neučinkovito gospodarenje vodom može dovesti do smanjenja prinosa, degradacije tla i iscrpljivanja vodnih zaliha. Stoga, integracija suvremenih tehnoloških rješenja postaje ključna za unaprjeđenje sustava navodnjavanja i optimizaciju korištenja vode u poljoprivredi, čime se osigurava dugoročna održivost ovog sektora.

Jedan od najvažnijih aspekata uspješnog gospodarenja vodom u poljoprivredi je precizno praćenje stanja vlažnosti tla, a posebice u realnom vremenu. Tradicionalne metode mjerenja vlažnosti tla, iako korisne, često su ograničene u svojoj primjeni na širem području (IAEA, 2017.), zbog čega postaje izazovno održavati ravnotežu između dovoljnih količina vode i prevencije njenog neučinkovitog korištenja. Primjerice, tradicionalne metode za mjerenje vlažnosti tla, poput gravimetrijske metode, korištenja TDR (Time Domain Reflectometry) senzora i FDR (Frequency Domain Reflectometry) senzora, često su ograničene jer pružaju podatke samo na lokaliziranim mjestima i/ili su vremenski zahtjevne. Iako su ove metode precizne na malim uzorcima, ne mogu pružiti širu sliku o vlažnosti tla na većim poljoprivrednim površinama, što je ključno za pravilno upravljanje navodnjavanjem. S obzirom na ograničenja postojećih metoda, postoji rastuća potreba za tehnologijama koje mogu pratiti vlažnost tla na većim površinama i u stvarnom vremenu. Nadalje, klimatske promjene dodatno pogoršavaju problem gospodarenja vodom u poljoprivredi (Ondrašek, 2015.). Sve češći ekstremni vremenski događaji poput suša i poplava mijenjaju uzorke oborina i dostupnost vode. Poljoprivrednici se suočavaju s većom nepredvidljivošću, što zahtijeva efikasnije i prilagodljivije metode upravljanja vodnim resursima. Suočeni s ovim izazovima, napredne metode za praćenje i upravljanje vodom postaju neophodne za održavanje održivih poljoprivrednih sustava.

Napredne i moderne tehnologije utvrđivanja vlažnosti tla, poput Cosmic Ray Neutron Senzora (CRNS) donose novu dimenziju preciznom monitoringu vlažnosti tla. CRNS koristi prirodnu radijaciju koja dolazi iz svemira (IAEA, 2017.). Kozmičke zrake koje udaraju u Zemljinu atmosferu stvaraju neutronske radijacije, koja potom ulazi u interakciju s tvarima na površini Zemlje, uključujući vodu u tlu. Ova interakcija smanjuje broj neutronske čestice koje se mogu detektirati na tlu, jer vodik u vodi apsorbira neutrone. Na temelju ovog fenomena, CRNS može detektirati promjene u sadržaju vode u tlu. Nadalje, jedna od glavnih prednosti CRNS tehnologije je sposobnost mjerenja vlažnosti tla na relativno većim površinama, u radijusu od 300-tinjak metara, odnosno nekoliko hektara, što je znatno više od tradicionalnih senzora koji pokrivaju samo točkaste uzorke. Ovo omogućuje preciznije

upravljanje navodnjavanjem i bolji pregled dinamike vode u tlu na širem području. Dodatno, CRNS ne zahtijeva direktan kontakt s tlom, što ovu tehnologiju čini korisnom u teško dostupnim ili osjetljivim poljoprivrednim područjima.

U praksi, primjena CRNS senzora u poljoprivredi može revolucionirati način na koji se upravlja navodnjavanjem. Umjesto korištenja procjena ili nepotpunih podataka o vlažnosti tla, poljoprivrednici mogu dobiti jasne, točne informacije o stvarnim uvjetima na njihovim poljima. Ovo omogućava preciznu primjenu vode, smanjujući rizik od prekomjernog ili nedovoljnog navodnjavanja, čime se optimizira potrošnja resursa i povećava produktivnost. U uvjetima sve većeg pritiska na vodne resurse, CRNS senzori pomažu poljoprivrednicima da smanje potrošnju vode, a istovremeno održavaju optimalne uvjete za rast usjeva. Ovo ne samo da doprinosi održivom korištenju vode, već i pomaže u očuvanju okoliša, smanjenju zagađenja i degradacije tla te sprječavanju iscrpljivanja vodnih zaliha.

Nadalje, CROPWAT kao softverski alat koji je razvio FAO (Smith, 1992) također može znatno doprinijeti boljem gospodarenju vodom u poljoprivredi i planiranju potrošnje vode za buduće infrastrukturne projekte kao što je implementacija sustava navodnjavanja na određenom području (Smith, 1992). CROPWAT modelira potrebe kultura za vodom na temelju specifičnih klimatskih uvjeta, vrsta usjeva, faza rasta i dostupnosti vode. Ovaj program omogućuje simulaciju raznih scenarija navodnjavanja i izračun potrebne količine vode za optimalan rast usjeva, a što je posebno bitno sa aspekta klimatskih promjena i suša. Kombiniranjem CRNS podataka o stvarnoj vlažnosti tla s CROPWAT-ovim modelima proračuna potreba za vodom, moguće je optimizirati raspodjelu vode na temelju stvarnih uvjeta u polju i specifičnih potreba usjeva. CRNS senzori daju podatke u stvarnom vremenu o trenutnom stanju vlažnosti tla, dok CROPWAT koristi te podatke kako bi simulirao optimalne rasporede navodnjavanja i spriječio prekomjernu ili nedovoljnu primjenu vode. Stoga, bi integracija CRNS senzora i CROPWAT-a mogla dodatno omogućiti učinkovitije upravljanje navodnjavanjem koje je prilagođeno stvarnim uvjetima u tlu i potrebama specifičnih usjeva, čime se smanjuju gubici vode, poboljšava produktivnost, te povećava održivost poljoprivrednih sustava.

Uvođenje suvremenih tehnologija poput CRNS i softverskih alata poput CROPWAT-a u poljoprivredi predstavlja značajan napredak u gospodarenju vodnim resursima. CRN senzori omogućuju detaljno praćenje vlažnosti tla na velikim površinama u stvarnom vremenu, dok CROPWAT pruža precizne modele za planiranje navodnjavanja, prilagođene specifičnim uvjetima usjeva i klime. Kombinacijom ovih tehnologija, poljoprivrednici mogu značajno smanjiti nepotrebnu potrošnju vode, povećati prinose te smanjiti negativan utjecaj na okoliš. U svijetlu klimatskih promjena i sve većih pritisaka na vodne resurse, ovakva rješenja postaju ključna za održivost globalne poljoprivrede, jer omogućuju racionalno korištenje vode i očuvanje prirodnih resursa za buduće generacije.

1.1. Cilj rada

Cilj rada je bio instalirati, umjeriti i pustiti u rad CRNs na pokušalištu Maksimir, Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, te utvrditi potrebe kultura (kukuruz, soja, pšenica i suncokret) za navodnjavanjem u računalnom programu CROPWAT, ver. 8.0.

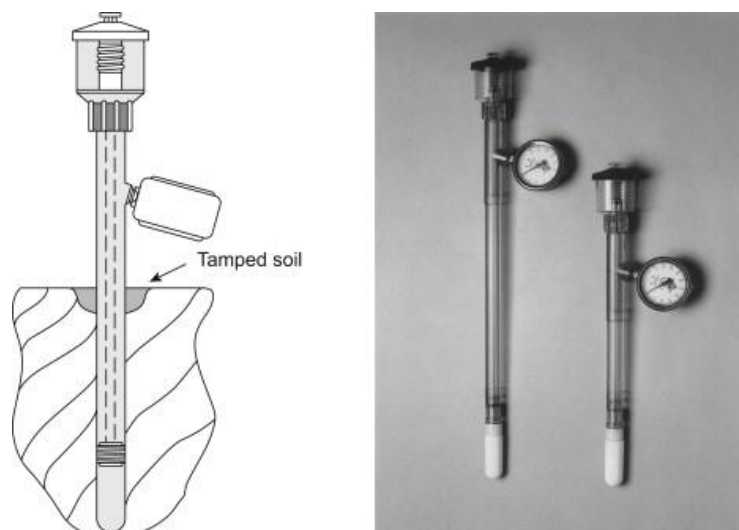
2. Pregled literature

2.1. Tradicionalne metode za određivanje sadržaja vode u tlu

Sadržaj vode u tlu je moguće odrediti gravimetrijski te pomoću raznih senzora. Gravimetrijskom metodom obavlja se vaganje tla prije i nakon sušenja (na 105°C do konstantne mase) te se razlika u masi predstavlja kao izgubljena voda (HRN ISO 11465:2004.). Ova metoda je pouzdana, ali nije toliko praktična za svakodnevnu primjenu jer zahtijeva veći broj uzorkovanja kroz čitavu vegetacijsku sezonu. Unatoč tome ovakva metoda je pogodna za umjeravanje raznih uređaja koji će u budućnosti brže i preciznije davati podatke o vlazi tla.

Metoda senzorskog utvrđivanja vlage tla danas je jako rasprostranjena upravo zbog jednostavnosti i brzine prikupljanja podataka. Vlaga tla se senzorski može odrediti: tenziometrijski, elektrometrijski, mjerenjem dielektrične konstante, mjerenjem termalnih karakteristika, spektralnom refleksijom te mjerenjem radioaktivnog zračenja.

Tenziometarska metoda radi na principu tenziometra koji mjeri silu kojom se voda drži za čestice tla. Tenziometar se postavlja u zonu korijenja. Na slici 2.1 prikazan je tenziometar. Jedan od tenziometara u primjeni naziva se Irrometar. To je uređaj kojeg sačinjava zatvorena cijev ispunjena vodom, vakumirani brojčanik i porozni vrh koji se postavlja u zemlju. Ako u tlu nema dovoljno vode tlak kojim se voda drži za čestice tla prikazat će visoke vrijednosti na tenziometru. U slučaju kada ima dovoljno vode vrijednosti tlaka prikazane na tenziometru su niske.



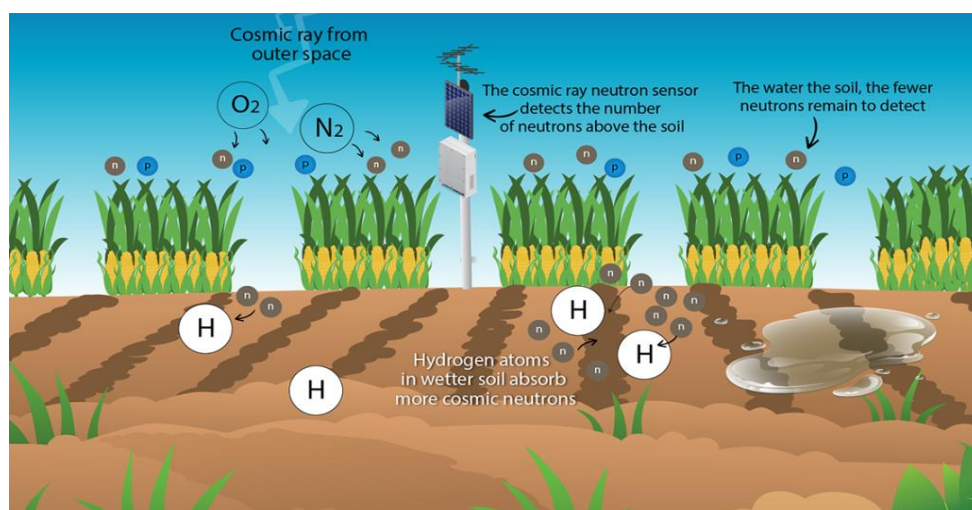
Slika 2.1. Tenziometar

Izvor:Kirkham (2004.)

Elektrometrijska metoda mjeri električnu vodljivost medija, odnosno tla i zahtijeva određenu prisutnost vode u tlu da bi se mogla primijeniti u praksi. Senzori koji se primjenjuju za elektrometrijsku metodu mogu biti gipsani (watermark) i volumetrijski. Gipsani senzori se relativno jednostavno instaliraju i nisu skupi za održavanje. Daju podatke tijekom cijele sezone, a ti se podaci spremaju na zapisivač podataka ili se preko agrometeorološke stanice na koju su povezani izravno šalju na obradu. Volumetrijski senzori imaju elektrode koje su smještene između dva sloja vitroplasta te ne dodiruju tlo izravno. Mjere vlagu u volumenu tla od 0,3 do 1,0 l. Time Domain Reflectometry (TDR) je precizna metoda mjerenja sadržaja vlage u tlu kojom se mjeri vrijeme koje je potrebno da elektromagnetni signal prođe kroz čelične senzore smještene u tlu te se reflektira nazad do receptora. Ovom metodom se minimalno zadire u tlo. Ova metoda nije u potpunosti primjenjiva u tlima s visokim udjelom soli ili gline. Frequency Domain Reflectometry (FDR) se također temelji na električnom signalu, ali ovaj put je u pitanju električni napon. Vlaga se spektralnom refleksijom određuje procjenom na širem području promatranja. Temelji se na činjenici da vlažna tla manje reflektiraju zračenje odnosno da ga apsorbiraju.

2.2. Metoda kozmičkog zračenja za određivanje vlažnosti tla

Upotreba kozmičkog zračenja za određivanje vlažnosti tla je nuklearna tehnologija samostalnog i kontinuiranog praćenja sadržaja vode u tlu (IAEA, 2017.). Bazira se na mjerenju prisutnosti vode u gornjim slojevima tla gdje se razvija glavnina korijena biljke, na dubini od 30-50 cm i radijusa od 150-250 m (IAEA,2017.) . Za određivanje vlažnosti tla na ovaj način koristi se Cosmic Ray Neutron senzor. CRN senzor određuje količinu vode u tlu preko intenziteta prirodnih neutrona u tlu koji su obrnuto proporcionalni sadržaju vode tlu (Slika 2.2.).



Slika 2.2. Određivanje sadržaja vode u tlu pomoću CRN senzora

Izvor: Benzinger i Jawerth (2018.)

Sam postupak mjerenja se odvija na način da CRNS postavljen na oko 100 cm od površine tla bilježi intenzitet neutrona okolnog prostora (Slika 2.2.). Algoritam za pretvaranje brzina brojanja neutrona (neobrađeni podaci) u sadržaj vode u tlu je uključen u ovaj protokol. Algoritam zahtijeva najmanje jedan kalibracijski parametar koji može biti određen unakrsnom kalibracijom jednog senzora u odnosu na već kalibrirani senzor ili izvođenjem terenske kalibracije. Osnovni cilj kalibracije je odrediti teoretsku stopu brojanja suhog tla za određeno mjesto, koje će poslužiti kao referentno. Velika prednost ovoga pristupa mjerenja sadržaja vlage u tlu je da se prikupljeni podaci mogu dohvatiti daljinski na jedan od tri načina: preko unutarnjeg Iridium satelitskog modema, unutarnjeg GSM modema ili vanjskog GSM prolaznog modema spojenog na serijski priključak CRNS-ovo spremnik podataka (IAEA, 2017.).

Schrön i sur. (2017.) u svom radu predstavljaju poboljšanu metodu za obradu i interpretaciju podataka dobivenih CRNS-om razvojem novih funkcija prostorne osjetljivosti za mjerenja težinskih točaka, temeljene na ažuriranim simulacijama fizike neutrona. Nove funkcije uzimaju u obzir čimbenike poput tlaka zraka i visine vegetacije, a poboljšale su izvedbu CRNS-a na različitim mjestima u usporedbi s konvencionalnim pristupima. Navedena studija sugerira da iako CRNS najbolje radi na homogenom terenu (bez kamenja, betona, asfalta i sl. materijala) još uvijek može ponuditi vrijedne uvide u složenim okruženjima.

Köhli i sur. (2018.) u studiji primjenjuju CRNS u ekološkim i hidrološkim istraživanjima. Koristeći simulacije prijenosa neutrona istraživači su otkrili da su ovi senzori osjetljivi na širi energetski raspon neutrona nego što se dosad mislilo (0,1 eV do 106 eV). Također su otkrili da su senzori posebno osjetljivi na neutrone koji dolaze iz atmosfere. Ova otkrića govore da bi istraživači pri korištenju ovih senzora trebali uzeti u obzir i pozadinu kozmičkih zraka i prizemne sekundarne neutrone.

Stevanato i sur. (2019.) istraživali su razvoj inovativnog CRNS za primjenu u poljoprivredne svrhe, s posebnim naglaskom na mjerenje vlage u tlima višegodišnjih drvenastih kultura. Studija provedena na pokusnim poljima u Potsdamu je usporedila podatke CRNS Finapp s dvije komercijalne sonde CRNS, pokazujući vrlo dobro slaganje u izmjerenim parametrima. Rezultati su istaknuli ujednačenost vlažnosti tla na različitim dubinama, pri čemu se je senzor pokazao vrlo osjetljivim na pojavu oborina. U Lagosantu, studija je također pokazala dobro podudaranje između sonde Finapp i sonde točkastih razmjera u odgovoru na oborine, pri čemu je novo testirani senzor također zadovoljavajuće reagirao na oborine. U radu se također raspravljalo o tehničkim detaljima kao što su prikupljanje podataka, diskriminacija čestica i obrada podataka. Naglašavaju se prednosti CRNS-a za mjerenje vlažnosti tla na velikim površinama, prevladavajući probleme heterogenosti prisutne u tradicionalnim točkastim metodama.

Power i sur. (2021.) u radu obrađuju crspy, Python paket dizajniran za usklađivanje i pojednostavljenje obrade podataka CRNS za analizu vlažnosti tla. Crspy je paket koji nudi open-source platformu jednostavnu za korištenje, a koja integrira trenutne metodologije i visokokvalitetne globalne podatkovne proizvode. Paket ima za cilj promovirati širu upotrebu CRNS podataka u istraživanju i nastavi, olakšati studije na globalnoj razini i potaknuti angažman zajednice u daljnjem razvoju alata.

2.3. Modeliranje potreba poljoprivrednih kultura za vodom

Razumijevanje potreba biljnih kultura za vodom ključno je za osiguravanje stabilnih i visokih prinosa, osobito u uvjetima sve izraženijih klimatskih promjena i učestalih suša. Određene studije pokazuju da je reakcija biljaka na kombinaciju dvaju različitih abiotskih stresova jedinstvena te se ne može jednostavno predvidjeti na temelju odgovora biljaka na svaki stres zasebno (Mittler, 2005.). Ova saznanja naglašavaju važnost prilagođenog pristupa u upravljanju vodom i drugim resursima kako bi se učinkovito odgovorilo na složene izazove u poljoprivrednoj proizvodnji. Kako bi se postiglo održivo korištenje vodnih resursa u poljoprivredi, neophodno je precizno modelirati potrebe kultura za vodom, uzimajući u obzir specifične klimatske uvjete, faze razvoja biljaka i karakteristike tla. U tom kontekstu, program CROPWAT, razvijen od strane FAO-a, predstavlja vrijedan alat za proračun i optimizaciju navodnjavanja, odnosno potreba kultura za vodom (Smith, 1992). Potrebe kultura za vodom ili tzv. norme navodnjavanja, definiraju se kao količina vode koja je potrebna usjevima za normalan rast i razvoj u određenom okruženju tijekom jedne vegetacijske sezone (Ondrašek, 2015.). Ove potrebe mogu varirati ovisno o vrsti usjeva, fazi njihovog razvoja, klimatskim uvjetima te tipu i stanju tla. Stoga, precizno planiranje navodnjavanja zahtijeva razumijevanje ovih potreba kako bi se spriječilo prekomjerno ili nedovoljno navodnjavanje, što može dovesti do gubitaka u prinosima, degradacije tla ili iscrpljivanja vodnih resursa.

CROPWAT koristi meteorološke podatke (npr. o temperaturi, vjetru, oborinama i vlažnosti), podatke o tlu i specifične karakteristike usjeva kako bi proračunao referentnu evapotranspiraciju i potrebe kultura za vodom. Također, jedna od glavnih karakteristika i prednosti CROPWAT-a je njegova sposobnost da modelira različite scenarije navodnjavanja i precizno odredi količinu vode potrebnu za optimalan rast usjeva. Na temelju određenih podataka, CROPWAT može izračunati glavne parametre bilance vode (izraz 1), koji definiraju potrebe raznih poljoprivrednih kultura za navodnjavanjem.

Pri utvrđivanju vodne bilance u agroekosustavu potrebno je razmotriti podatke o dnevnoj referentnoj evapotranspiraciji (ET_0), tj. količini vode koja se gubi s travnate površine (visina trave oko 10 cm) evaporacijom i transpiracijom. Kako se referentna evapotranspiracija odnosi samo na travnjake razvijeni su koeficijenti kultura (K_c) koji su specifični za svaku biljnu vrstu i koji omogućavaju izračun evapotranspiracije za određenu biljnu kulturu. Evapotranspiracija kulture se tako izračunava prema formuli: $ET_c = ET_0 * K_c$. Za izračun vodne bilance potrebni su podaci o: temperaturi i vlazi zraka, insolaciji i brzini vjetra. Bilanca vode se matematički može izraziti preko izraza:

$$(1) \Delta W = W_{in}(O+N+K+P_{in}+Pp_{in}) - W_{out}(E+T+P_{out}+Pp_{out}+Per)$$

ΔW označava bilancu vode koja može biti pozitivna ili negativna,

W_{in} označava svu vodu koja je ušla u sustav, O su oborine, N navodnjavanje, K označava kapilarno uzdizanje, P_{in} površinsko pritjecanje, dok Pp_{in} označava potpovršinsko pritjecanje.

W_{out} označava svu vodu koja je izišla iz sustava, E je evaporacija, T je transpiracija, P_{out} je površinsko otjecanje, P_{pout} je potpovršinsko otjecanje, a Per je perkolacija.

CROPWAT također omogućuje simulaciju različitih scenarija kako bi se procijenili učinci klimatskih promjena, suša ili promjene u vrsti usjeva na potrebu za vodom. Ovo je osobito korisno za dugoročno planiranje i prilagodbu poljoprivrednih praksi u uvjetima promjenjive klime. Program pruža mogućnost da se usklađuje s lokalnim uvjetima i resursima, čime omogućava poljoprivrednicima prilagođavanje specifičnim okolišnim uvjetima.

3. Materijal i metode istraživanja

3.1. Instalacija, kalibracija i validacija Cosmic Ray Neutron Senzora

CRNS se sastoji od jednog ili dva metalna cilindrična senzora koji sadrže plinove helij-3 ili bor trifluorid, te su odgovarajućim kablovima povezani s uređajem za bilježenje podataka i termaliziranim brojačem neutrona smještenim u posebnom kućištu (Slika 3.1.). Pored navedenog, da bi CRNS uređaj bio u funkciji potrebni su i ostali ključni dijelovi: vanjski senzori za mjerenje temperature i relativne vlage zraka, kišomjer, solarni panel s niskonaponskim punjačem i baterijom i satelitska antena koji su smješteni na metalnom stupu (Slika 3.1.). U sklopu projekta "Improving Efficiency in Water and Soil Management", 2022.-2027., tijekom travnja 2024. godine instaliran je Cosmic Ray Neutron senzor na pokušalištu Maksimir, Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Slika 3.1.).



Slika 3.1. Prikaz instaliranog CRNS uređaja na pokušalištu Maksimir (Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet) Izvor: Ondrašek (2024.)

Za ispravan rad CRNS potrebno je provesti njegovo umjeravanje. Metoda mjerenja neutrona u tlu pomoću kozmičkog zračenja primjenom CRNS uređaja ključan je postupak kako bi se osigurala točnost i preciznost podataka o vlažnosti tla i drugim varijablama koje se mjere ovim uređajem. Kako je prethodno navedeno, CRNS koristi neutronske kozmičke zrake za neinvazivno mjerenje vlažnosti tla u relativno velikom volumenu tla na nekoliko ha do dubine od oko 50 cm, tipično promjer do 300 m (IAEA, 2017.). Postupak umjeravanja CRNS-a obuhvaća nekoliko ključnih koraka:

1) Prikupljanje referentnih podataka o vlažnosti tla

Prvi korak u kalibraciji je prikupljanje referentnih podataka o stvarnoj vlažnosti tla na terenu. Ovo se obično provodi korištenjem standardnih metoda uzorkovanja tla (npr. uzimanjem uzoraka tla na različitim dubinama) te analizom sadržaja vode u laboratoriju metodom gravimetrije ili pomoću terenskih sonde za mjerenje vlažnosti tla (TDR, FDR i sl.). Uzorkovanje treba biti izvedeno unutar područja pokrivenog senzorom (promjer od približno 300 m) i u različitim vremenskim uvjetima kako bi se osigurala pouzdanost kalibracije. Također, uzorkovanje tla mora uključivati više dubina (svakih 5 cm do 50 cm dubine) kako bi se obuhvatio cijeli profil tla do kojega senzor prima signal.

2) Prikupljanje podataka s CRNS-a

CRNS uređaj kontinuirano prikuplja podatke koji su dostupni u svakom trenutku. Ovaj senzor kontinuirano mjeri broj detektiranih neutrona, koji ovisi o sadržaju vodika u tlu, odnosno sadržaju vode.

3) Izračun broja neutrona i korekcija za pozadinske efekte

Broj neutrona koji detektira CRNS osjetljiv je na više faktora, kao što su visina lokacije, atmosferski tlak, te promjene u broju kozmičkih zraka. Stoga, za točne rezultate potrebno je primijeniti nekoliko korekcija:

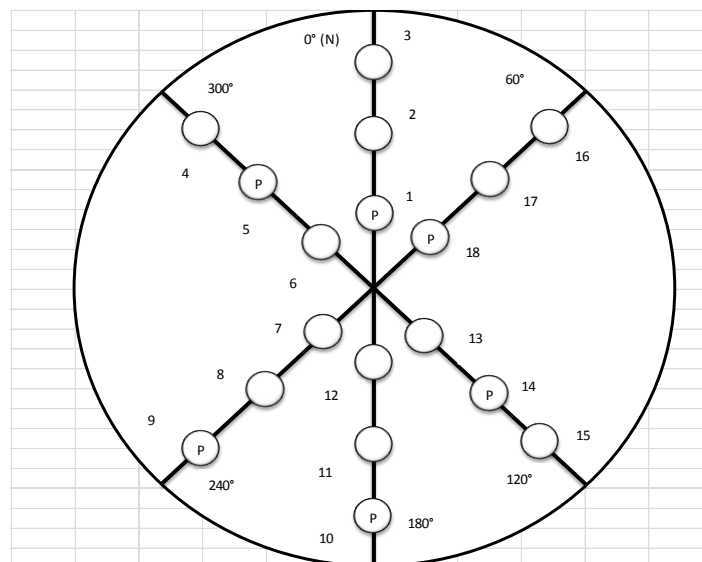
- i) Korekcija za visinu: Broj kozmičkih zraka primjenjiv je s obzirom na nadmorsku visinu, pa se rezultati CRNS-a prema tome korigiraju.
- ii) Korekcija za atmosferski tlak: Atmosferski tlak utječe na gustoću zraka i tako na broj detektiranih neutrona.
- iii) Korekcija za promjene u galaktičkom kozmičkom zračenju: Promjene u solarnoj aktivnosti također utječu na broj kozmičkih zraka, pa se mogu primijeniti dodatne korekcije.

4) Izračun faktora kalibracije

Nakon što su referentni podaci o vlažnosti tla prikupljeni, i podaci iz CRNS-a korigirani za relevantne efekte, izračunava se faktor kalibracije. Ovaj faktor se koristi za pretvaranje broja neutrona koje detektira senzor u stvarnu vlažnost tla. To se radi pomoću regresijskih analiza ili drugih statističkih metoda kako bi se pronašla veza između detekcija neutrona i stvarne vlažnosti tla.

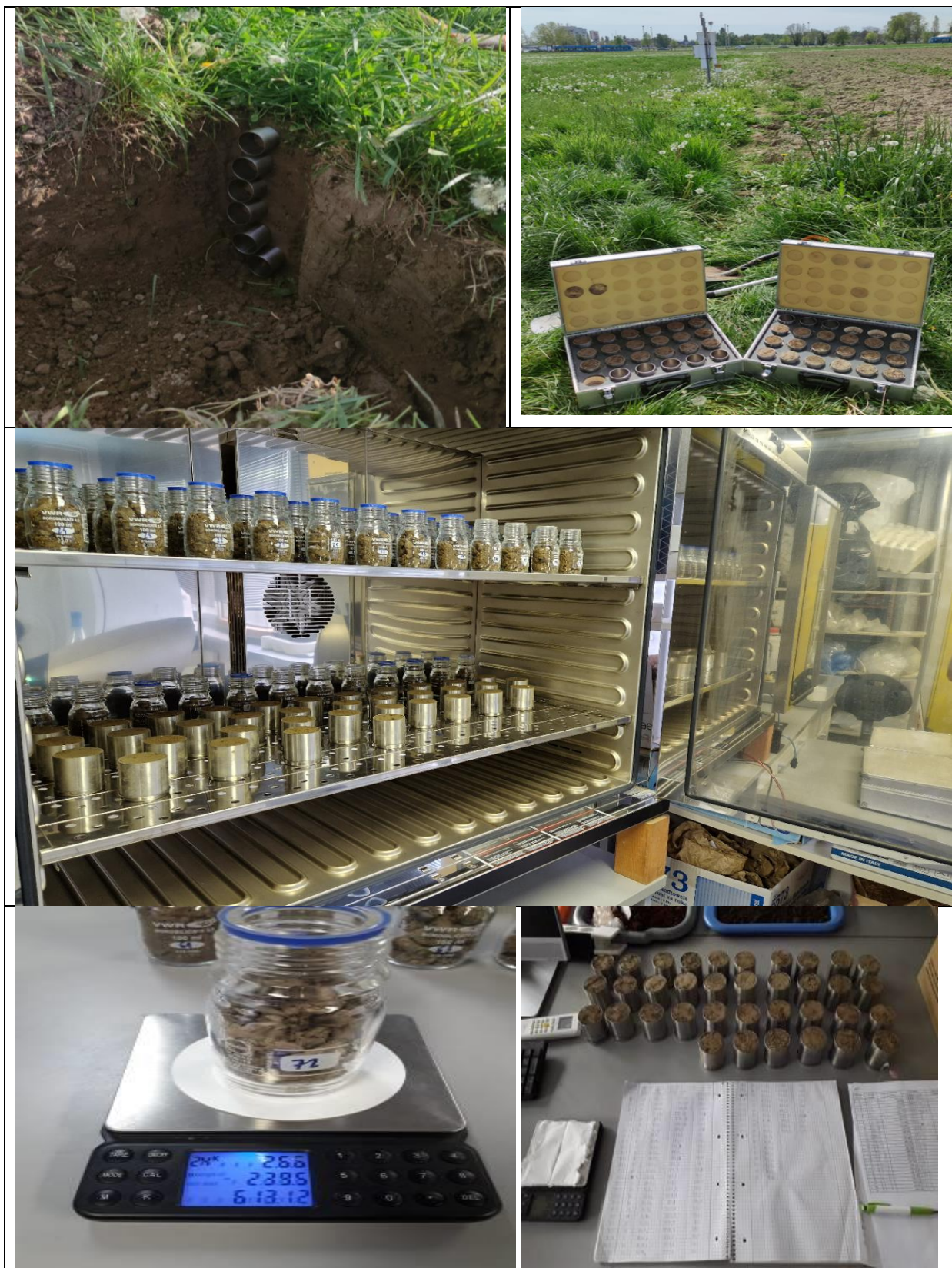
5) Validacija kalibracije

Nakon što se izračuna faktor kalibracije, potrebno ga je validirati s dodatnim podacima o vlažnosti tla koji nisu korišteni u početnom umjeravanju. Ovo je ključno kako bi se osigurala pouzdanost modela. Sve prethodno navedene radnje provedene se uspješno na pokušalištu Maksimir tijekom travnja, svibnja i rujna 2024. Za postupak validacije korištene su dvije metode utvrđivanja vlažnosti tla na pokušalištu Maksimir: i) gravimetrijski (ISO 11461:2001; EN ISO 11461:2014), te ii) TDR sondom. Validacija je obavljena u vremenski različitim uvjetima: početkom vegetacije (5. travnja) i krajem vegetacije (10. rujna) 2024. godine. Primjerice, uzorkovanje tla provedeno je prema shemi uzorkovanja na svakih 60° (0°, 60°, 120°, 180°, 240° i 300°) s radijusima od 10, 50 i 125 m (Slika 3.2.). Ova metoda uzorkovanja odabrana je kako bi se osigurali reprezentativni uzorci s cijele površine, pri čemu svako područje jednako doprinosi kalibraciji CRNS-a (s osjetljivošću koja eksponencijalno slabi s udaljenošću od senzora).



Slika 3.2. Shema uzorkovanja tla u neporušenom stanju iz profila tla (P) i u porušenom stanju za utvrđivanje sadržaja vode (gravimetrijski i TDR sondom) i specifične gustoće tla

Nadalje, otvoreno je 6 profila tla iz kojih je uzeto ukupno 36 uzoraka tla u neporušenom stanju (na svakom profilu je uzeto po 6 uzoraka na svakih 5 cm dubine) u metalne cilindre, te su uzeta 72 uzorka tla sondiranjem u porušenom stanju na dubinu do 50 cm koji su odmah stavljeni u za to predviđene staklene bočice volumena 100 ml (Slika 3.3.). Svi su uzorci izvagani na terenu i u laboratoriju. Uzorci biljnog materijala uzeti su sa cijele površine, a u analizu je ušlo 10-ak različitih vrsta bilja što je dalo reprezentativan uzorak biljnog materijala. Neposredno nakon uzimanja uzoraka tla, isti su dopremljeni u Analitički laboratorij Zavoda za melioracije gdje su prema standardnim postupcima utvrđeni sadržaj vlage u tlu (gravimetrijski) i specifična gustoća tla (IAEA, 2017.).



Slike 3.3. Postupak uzimanja uzoraka tla u (ne)porušenom stanju za gravimetrijsku metodu mjerenja vlage u tlu, njihova pohrana u transportne kutije, sušenje uzoraka i unos podataka

3.2. Metodologija izračuna potreba kultura za navodnjavanjem u CropWat-u

Potrebe kultura za navodnjavanjem na pokušalištu Maksimir izračunate su korištenjem računalnog programa CROPWAT 8.0 (Gabr, 2022). Glavni vremenski parametri koji utječu na evapotranspiraciju su zračenje, temperatura zraka, vlažnost i brzina vjetra. (Allan, 1998.)

Referentna evapotranspiracija ET_0 izračunata je prema izrazu Penman-Monteith (Allen i sur., 1998) (2):

$$(2) ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

gdje su:

ET_0 : referentna evapotranspiracija (mm/dan)

R_n : neto radijacija (MJ/m²/dan)

G : zemljišni gradijent topline (MJ/m²/dan)

T : srednja temperatura zraka na 2 m visine (°C)

u_2 : srednja brzina vjetra na 2 m visine (m/s)

$e_s - e_a$: deficit napona vodene pare na 2 m visine (kPa)

Δ : pad napona zasićene vodene pare (kPa/°C)

γ : psihrometrijska konstanta

Za modeliranje potreba soje, pšenice, suncokreta i kukuruza za navodnjavanjem (norme navodnjavanja) korišteni su klimatološki podaci za 30-godišnje razdoblje 1988.-2017. za postaju Zagreb - Maksimir (45°49'19" S; 16°2'1" I). Efektivne oborine izračunate su prema USDA-SCS metodi (USDA, 1967). Postavke tla su preuzete iz instalirane baze podataka CROPWAT programa za srednje tekurno tlo (loam), kao i koeficijenti kultura (K_c) za analizirane usjeve.

4. Rezultati i rasprava

4.1. Validacija sadržaja vode u tlu

Validacija podataka iz uređaja za mjerenje u znanstvenim istraživanjima ključan je korak u osiguravanju točnosti i pouzdanosti. CRNS koristi kozmičke zrake za mjerenje vlažnosti tla na velikoj površini i dubini, što omogućuje precizno praćenje u realnom vremenu. Međutim, kako bi se njegovi rezultati mogli vjerodostojno koristiti u poljoprivredi, ekologiji ili hidrološkim studijama, potrebno je usporediti rezultate dobivene ovom metodom s tradicionalnim tehnikama, kao što su gravimetrijska metoda i/ili TDR metoda.

U travnju 2024., neposredno nakon postavljanja CRNS-a na pokušalištu Maksimir, provedena je prva validacija instaliranog CRNS uređaja (Tablica 4.1.). CRNS je zabilježio minimalni sadržaj vode u tlu od 28,6 %, maksimalni od 31,1%, te srednju vrijednost od 29,7 %. Gravimetrijska metoda, s druge strane, dala je širi raspon rezultata, od minimalnih 20,0 % do maksimalnih 48,0 %, uz prosjek od 31,5 %. Utvrđena razlika u sadržaju vlage između dvije metode mjerenja u travnju od 1,8 % je relativno mala, što ukazuje na visoku točnost CRNS-a, s obzirom na različite prirode mjerenja (Tablica 4.1.). Općenito, gravimetrijska metoda uključuje uzimanje uzoraka tla i njihovu analizu u laboratoriju, što rezultira preciznim mjerenjima, ali također ograničava prostorno i vremensko pokriće podataka. Uzorci tla uzeti su iz različitih slojeva i različitih lokacija unutar promjera od oko 300 metara, koliko je otprilike efikasno djelovanje CRNS uređaja.

Tablica 4.1. Usporedba rezultata validacije CRNS-a pomoću dvije metode mjerenja sadržaja vode u tlu (%)

Parametar	Metoda i datum mjerenja			
	CRNS	Gravimetrija	CRNS	TDR
	05.04.2024.		10.09.2024.	
Minimum	28,6	20,0	27,1	14,6
Maksimum	31,1	48,0	28,2	32,3
Srednja vrijednost	29,7	31,5	27,7	22,0
Standardna devijacija	0,718	4,53	1,23	5,14
Razlika u sadržaju vode u tlu između metoda	1,8 %		5,7 %	

Sljedeća usporedba provedena je nekoliko mjeseci kasnije, 10. rujna (Tablica 4.1.). Metoda pomoću CRNS-a zabilježila je raspon vlažnosti tla od 27,1% do 28,2%, s prosjekom od 27,7 %. Ovi rezultati uspoređeni su s TDR metodom, koja se temelji na elektromagnetskim valovima za mjerenje vlažnosti u manjem volumenu tla. TDR metoda je pokazala veći raspon sadržaja

vlage u tlu, od 14,6 % do 32,3 %, s prosječnom vrijednošću od 22,0 % (Tablica 4.1.). Razlika između prosjeka dvije metode je iznosila 5,7%, a veća standardna devijacija metode TDR (5,14 %) ukazuje na manju preciznost u odnosu na CRNS, koji pokazuje stabilnije očitavanje s nižom standardnom devijacijom (0,718 %). Općenito, TDR metoda pokriva mali volumen tla oko sonde, obično unutar nekoliko centimetara od površine (Slika 4.1.) i tako bilježi vlažnost koja se u tom malom prostoru može znatno razlikovati od prosječne vlažnosti na većem području. Nadalje, CRNS mjeri vlažnost u većem volumenu tla i može detektirati vlagu i u dubljim slojevima, što je važno u sušnim razdobljima poput rujna. Gornji slojevi tla, koje primarno mjeri TDR, mogu biti znatno suši zbog isparavanja ili nedostatka padalina, dok dublji slojevi mogu zadržati više vlage.



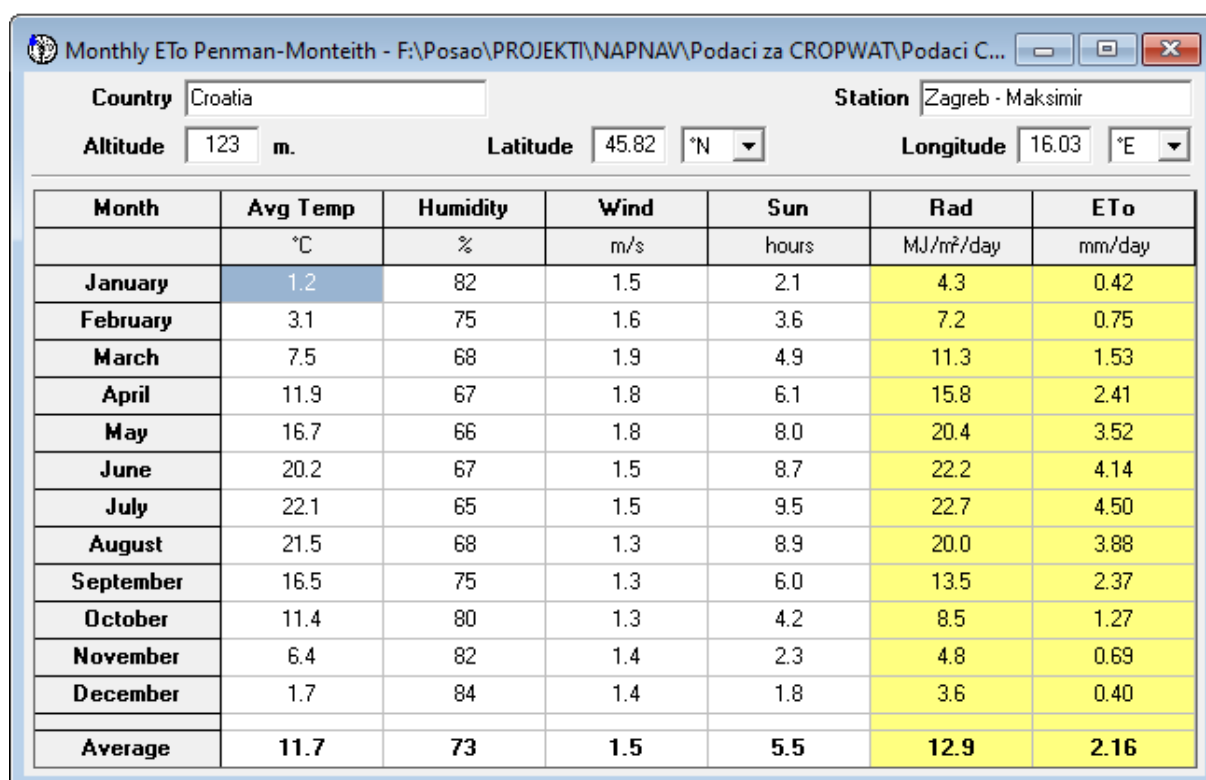
Slika 4.1. TDR metoda mjerenja vode u tlu

Nadalje, postavljanje CRNS-a u prijelaznoj sezoni između proljeća i ljeta, također može utjecati na mjerenja. Vlažnost tla osjetno varira tijekom prijelaza iz vlažnijeg proljeća u sušnije ljeto, a takvi se prijelazi mogu različito odraziti na metode koje mjere različite dijelove tla. Iako je CRNS u fazi prilagodbe novom okruženju, postignuta podudarnost s gravimetrijskom metodom potvrđuje njegovu pouzdanost.

Rezultati validacije pokazuju da je CRNS općenito vrlo precizan u mjerenju vlažnosti tla, osobito kada se uspoređuje s gravimetrijskom metodom. Mala razlika od 1,8 % pokazuje da je kalibracija uređaja uspješno provedena, unatoč velikoj prostornoj pokrivenosti koju obuhvaća. Nasuprot tome, veća razlika s TDR metodom od 5,7 % ukazuje na specifične prednosti i nedostatke različitih metoda. CRNS daje širu sliku stanja tla, koja može uključivati i dublje slojeve, dok TDR pruža preciznije podatke za gornje slojeve tla. Ova metoda može biti korisna za lokalizirane, brze procjene stanja tla, ali ne može zamijeniti CRNS u situacijama kada je potreban uvid u cjelokupni profil tla ili šira područja. Stoga su oba instrumenta korisna ovisno o specifičnim istraživačkim ili operativnim potrebama.

4.2. Izračun potreba kultura za vodom u CROPWAT-u

Na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir utvrđena referentna evapotranspiracija (ET_0) za prosječnu klimatološku godinu u promatranom razdoblju (1988.-2017.) prikazana na slici 4.2. Prosječna godišnja temperatura zraka je iznosila 11,7 °C, dok je maksimum ostvaren u srpnju (22,1 °C), a minimum u siječnju (1,2 °C). Vlaga zraka bila je najviša u hladnijem dijelu godine, a prosjek je bio 73 %. Brzina vjetra je bila poprilično ujednačena kroz godinu (1,5 m/s). Najveća insolacija je bila sredinom ljeta u srpnju (9,5 h), a godišnji prosjek iznosio je 5,5 h. Na temelju ovih podataka prosječna ET_0 na pokušalištu Maksimir iznosila je 2,16 mm/dan pri čemu je minimum izmjeren u prosincu (0,40 mm/dan), a maksimum u srpnju (4,50 mm/dan).



Month	Avg Temp	Humidity	Wind	Sun	Rad	ET ₀
	°C	%	m/s	hours	MJ/m ² /day	mm/day
January	1.2	82	1.5	2.1	4.3	0.42
February	3.1	75	1.6	3.6	7.2	0.75
March	7.5	68	1.9	4.9	11.3	1.53
April	11.9	67	1.8	6.1	15.8	2.41
May	16.7	66	1.8	8.0	20.4	3.52
June	20.2	67	1.5	8.7	22.2	4.14
July	22.1	65	1.5	9.5	22.7	4.50
August	21.5	68	1.3	8.9	20.0	3.88
September	16.5	75	1.3	6.0	13.5	2.37
October	11.4	80	1.3	4.2	8.5	1.27
November	6.4	82	1.4	2.3	4.8	0.69
December	1.7	84	1.4	1.8	3.6	0.40
Average	11.7	73	1.5	5.5	12.9	2.16

Slika 4.2. Prosječna referentna evapotranspiracija (ET_0) u razdoblju (1988.-2017.) na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir

Na slici 4.3. prikazane su ukupne i efektivne oborine pri čemu su ukupne oborine iznosile 858,9 mm dok su efektivne oborine iznosile 753,7 mm odnosno 87,75 % od ukupnih oborina. Maksimalne oborine izmjerene u rujnu iznosile su 102,9 mm, dok je minimum izmjeren u veljači (44,1 mm). Maksimalne efektivne oborine iznosile su 86,0 mm u rujnu, dok su minimalne iznosile 41,0 mm u veljači.

	Rain	Eff rain
	mm	mm
January	45.1	41.8
February	44.1	41.0
March	50.1	46.1
April	60.9	55.0
May	71.2	63.1
June	90.8	77.6
July	75.6	66.5
August	91.8	78.3
September	102.9	86.0
October	85.4	73.7
November	82.2	71.4
December	58.8	53.3
Total	858.9	753.7

Slika 4.3. Prosječne ukupne i efektivne oborine (Eff) u razdoblju (1988.-2017.) na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir za klimatološku postaju Maksimir

Rezultati modeliranja potreba kultura za navodnjavanjem za četiri poljoprivredne kulture – pšenicu, kukuruz, soju i suncokret – pokazuju kako se različite količine efektivnih oborina tijekom vegetacijske sezone odražavaju na potrebne norme navodnjavanja. Analizom ovih podataka uočavaju se zanimljivi trendovi i međusobne razlike među kulturama, koje su važne za razumijevanje potreba za vodom u različitim uvjetima uzgoja. Primjerice, tijekom vegetacijske sezone pšenice, prosječne efektivne oborine iznosile su 465,0 mm, što predstavlja relativno visoku količinu kiše za tu kulturu. Ove visoke oborine značajno su smanjile potrebu za navodnjavanjem, pa je norma navodnjavanja bila tek 56,1 mm (Slika 4.4.). Pšenica je kultura koja se često uzgaja u područjima s umjerenom klimom, gdje su proljetne i rane ljetne kiše česte. Međutim, pšenica je posebno osjetljiva na nedostatak vode u tlu, pri čemu stres u mejozi, kada se odvija muška sporogeneza, dovodi do sterilnosti muškog cvata i ozbiljnog smanjenja zmetanja zrna (Dembinska i sur., 1992.). U ovom slučaju, velika količina oborina tijekom vegetacijskog ciklusa smanjila je potrebu za navodnjavanjem, što ukazuje na povoljne uvjete za rast pšenice u ovoj sezoni.

Crop Water Requirements

E To station: Zagreb - Maksimir Crop: Winter Wheat f.f.

Rain station: Zagreb - Maksimir Planting date: 15/10

Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	2	Init	0.70	0.89	5.3	14.5	0.0
Oct	3	Init	0.70	0.75	8.3	24.0	0.0
Nov	1	Init	0.70	0.62	6.2	24.5	0.0
Nov	2	Deve	0.71	0.49	4.9	24.5	0.0
Nov	3	Deve	0.73	0.43	4.3	22.2	0.0
Dec	1	Deve	0.75	0.37	3.7	19.6	0.0
Dec	2	Deve	0.77	0.31	3.1	17.5	0.0
Dec	3	Deve	0.79	0.32	3.5	16.3	0.0
Jan	1	Deve	0.81	0.33	3.3	14.9	0.0
Jan	2	Deve	0.83	0.35	3.5	13.5	0.0
Jan	3	Deve	0.85	0.45	5.0	13.6	0.0
Feb	1	Deve	0.87	0.56	5.6	13.6	0.0
Feb	2	Deve	0.89	0.67	6.7	13.4	0.0
Feb	3	Deve	0.91	0.92	7.4	14.1	0.0
Mar	1	Deve	0.93	1.18	11.8	14.7	0.0
Mar	2	Deve	0.95	1.46	14.6	15.2	0.0
Mar	3	Deve	0.97	1.77	19.5	16.2	3.2
Apr	1	Mid	0.99	2.08	20.8	17.3	3.5
Apr	2	Mid	0.99	2.37	23.7	18.3	5.4
Apr	3	Mid	0.99	2.74	27.4	19.2	8.2
May	1	Mid	0.99	3.10	31.0	20.0	11.1
May	2	Late	0.97	3.43	34.3	20.8	13.5
May	3	Late	0.80	2.97	32.7	22.5	10.2
Jun	1	Late	0.58	2.26	22.6	25.1	0.0
Jun	2	Late	0.37	1.51	15.1	27.1	0.0
Jun	3	Late	0.25	1.06	1.1	2.5	1.1
					325.5	465.0	56.1

Slika 4.4. Prikaz osnovnih podataka za izračun norme navodnjavanja pšenice u razdoblju (1988.-2017.) na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir

Za kukuruz, prosječne efektivne oborine bile su nešto niže, iznoseći 417 mm, što je rezultiralo normom navodnjavanja od 105 mm (Slika 4.5.). Prinos i kakvoća zrna kukuruza međusobno su povezani i na njih uvelike utječu brojni čimbenici okoliša, kao što su ukupna količina oborina, sadržaj vode u tlu, temperatura zraka (Butts-Wilmsmeyer i sur., 2019., Waqas i sur., 2021.) i insolacije (Yang i sur., 2019.). Kukuruz je kultura koja zahtijeva više vode tijekom svog kritičnog razdoblja rasta, osobito tijekom faze cvjetanja i razvoja klipova. Određene studije su pokazale da nedostatak vode kod kukuruza može uzrokovati značajnije kašnjenje u razvoju ženskih spolnih organa, dok je muški cvat manje pogođen nedostatkom vode (Barnabas i sur., 2008.). Unatoč relativno povoljnim oborinama, utvrđena relativno visoka norma navodnjavanja ukazuje da količina prirodnih oborina nije bila dovoljna za potrebe biljke tijekom ključnih faza rasta i razvoja. Razdoblje vegetacije kukuruza obično se poklapa s toplijim ljetnim mjesecima, kada su temperature visoke, a isparavanje vode iz tla intenzivnije, što dodatno povećava potrebe za navodnjavanjem. Na slici 4.5. se jasno vidi da se nedostatak vode javlja sredinom vegetacije, od druge dekade lipnja do treće dekade kolovoza kad su temperature zraka na analiziranom području ujedno i najviše. Na slici 4.5. jasno je prikazano da se nedostatak vode javlja sredinom vegetacije, od druge dekade lipnja do treće dekade kolovoza, kada su temperature na analiziranom području najviše. Budući da se očekuje da visoke temperature i vlažnost u budućnosti neće varirati na isti način kao u prethodnim razdobljima, kvantitativne analize izravnih utjecaja temperatura postaju ključne za točne projekcije prinosa i razvoj ciljnih strategija za ublažavanje negativnih posljedica promjenjivih temperaturnih režima (Carter i sur., 2016.).

Crop Water Requirements							
ETo station		Zagreb - Maksimir		Crop		MAIZE (Grain)	
Rain station		Zagreb - Maksimir		Planting date		15/04	
Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Apr	2	Init	0.40	0.96	5.8	11.0	0.0
Apr	3	Init	0.40	1.11	11.1	19.2	0.0
May	1	Init	0.40	1.26	12.6	20.0	0.0
May	2	Deve	0.40	1.41	14.1	20.8	0.0
May	3	Deve	0.48	1.80	19.8	22.5	0.0
Jun	1	Deve	0.61	2.39	23.9	25.1	0.0
Jun	2	Deve	0.73	3.01	30.1	27.1	3.0
Jun	3	Deve	0.85	3.60	36.0	25.4	10.6
Jul	1	Mid	0.93	4.14	41.4	22.7	18.7
Jul	2	Mid	0.93	4.29	42.9	21.1	21.8
Jul	3	Mid	0.93	4.07	44.8	22.8	22.0
Aug	1	Mid	0.93	3.82	38.2	24.9	13.3
Aug	2	Mid	0.93	3.63	36.3	26.3	10.0
Aug	3	Late	0.88	2.97	32.7	27.1	5.6
Sep	1	Late	0.74	2.13	21.3	28.4	0.0
Sep	2	Late	0.61	1.44	14.4	29.6	0.0
Sep	3	Late	0.47	0.94	9.4	27.9	0.0
Oct	1	Late	0.36	0.60	3.6	15.4	0.0
					438.2	417.0	105.0

Slika 4.5. Prikaz osnovnih podataka za izračun norme navodnjavanja kukuruza u razdoblju (1988.-2017.) na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir

U usporedbi s prethodnim kulturama, soja je imala relativno niže prosječne efektivne oborine od 320 mm tijekom vegetacijske sezone, što je povećalo potrebu za navodnjavanjem na 124 mm (Slika 4.6). Soja je kultura koja ima specifične potrebe za vodom, posebno u fazi cvatnje i formiranja mahuna. U sušnim uvjetima soja često pokazuje osjetljivost na nedostatak vode, što može također negativno utjecati na prinos, odnosno masu zrna (Sionit i Kramer, 1977.). Ovi rezultati naglašavaju potrebu za pravovremenim i ciljanim navodnjavanjem kako bi se nadoknadio manjak kiše i osigurali dobri uvjeti za rast. Izraženiji nedostatak vode za soju zabilježen je od prve dekade lipnja do 2 dekade kolovoza (Slika 4.6.).

Crop Water Requirements

ETo station: Zagreb - Maksimir Crop: Soybean

Rain station: Zagreb - Maksimir Planting date: 01/05

Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
May	1	Init	0.35	1.10	11.0	20.0	0.0
May	2	Init	0.35	1.23	12.3	20.8	0.0
May	3	Deve	0.48	1.79	19.7	22.5	0.0
Jun	1	Deve	0.71	2.79	27.9	25.1	2.8
Jun	2	Mid	0.92	3.82	38.2	27.1	11.2
Jun	3	Mid	1.00	4.26	42.6	25.4	17.2
Jul	1	Mid	1.00	4.45	44.5	22.7	21.8
Jul	2	Mid	1.00	4.60	46.0	21.1	24.9
Jul	3	Mid	1.00	4.36	48.0	22.8	25.2
Aug	1	Late	0.96	3.91	39.1	24.9	14.2
Aug	2	Late	0.80	3.09	30.9	26.3	4.7
Aug	3	Late	0.63	2.11	23.2	27.1	0.0
Sep	1	Late	0.45	1.30	13.0	28.4	0.0
Sep	2	Late	0.36	0.84	1.7	5.9	1.7
					398.2	319.8	123.7

Slika 4.6. Prikaz osnovnih podataka za izračun norme navodnjavanja soje u razdoblju (1988.-2017.) na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir

Suncokret, s prosječnim efektivnim oborinama tijekom vegetacije od 319 mm je imao slične oborinske uvjete kao i soja, no njegova norma navodnjavanja bila je nešto niža, iznoseći 106 mm (Slika 4.7.). Suncokret je kultura koja je poznata po relativnoj otpornosti na sušu, što objašnjava niže potrebe za navodnjavanjem unatoč niskim oborinama. Ova prilagodba na sušne uvjete čini suncokret pogodnim za uzgoj u područjima s nižim oborinama, ali i dalje zahtijeva dodatno navodnjavanje tijekom kritičnih faza rasta, osobito tijekom cvjetanja i formiranja sjemena. Također, utvrđeno je da kod suncokreta stres izazvan nedostatkom vode do određene razine može smanjiti prinos sjemena, ali uz određeno povećanje sadržaja proteina u testiranim hibridima (Alahdadi i Oraki, 2011.). Osim pšenice i suncokret je u usporedbi sa sojom i kukuruzom imao manje potrebe za vodom. Izraženiji nedostatak vode javio se u razdoblju od prve dekade lipnja do prve dekade kolovoza (Slika 4.7.).

Crop Water Requirements

ETo station: Zagreb - Maksimir Crop: Sunflower

Rain station: Zagreb - Maksimir Planting date: 15/04

Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Apr	2	Init	0.35	0.84	5.1	11.0	0.0
Apr	3	Init	0.35	0.97	9.7	19.2	0.0
May	1	Deve	0.35	1.11	11.1	20.0	0.0
May	2	Deve	0.45	1.57	15.7	20.8	0.0
May	3	Deve	0.60	2.23	24.6	22.5	2.1
Jun	1	Deve	0.75	2.96	29.6	25.1	4.6
Jun	2	Mid	0.90	3.71	37.1	27.1	10.0
Jun	3	Mid	0.94	3.99	39.9	25.4	14.5
Jul	1	Mid	0.94	4.16	41.6	22.7	19.0
Jul	2	Mid	0.94	4.31	43.1	21.1	22.0
Jul	3	Mid	0.94	4.08	44.9	22.8	22.2
Aug	1	Late	0.87	3.54	35.4	24.9	10.5
Aug	2	Late	0.67	2.61	26.1	26.3	0.0
Aug	3	Late	0.47	1.58	17.4	27.1	0.0
Sep	1	Late	0.35	1.01	1.0	2.8	1.0
					382.3	318.6	105.8

Slika 4.7. Prikaz osnovnih podataka za izračun norme navodnjavanja suncokreta u razdoblju (1988.-2017.) na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir

5. Zaključak

Na pokušalištu Maksimir tijekom 2024. uspješno je instaliran i validiran napredni CRNS za mjerenje vlažnosti tla. Validacija CRNS kroz usporedbu s gravimetrijskom metodom i TDR-om pokazala je njegovu veliku točnost i pouzdanost za mjerenje vlažnosti tla u širokom području.

Validacija CRNS u travnju 2024. je provedena s gravimetrijskom metodom, te je utvrđena minimalna razlika od 1,8 %, dok je validacija pomoću TDR metode provedena u rujnu, pokazala veću razliku od 5,7 %. Iako se rezultati CRNS mogu neznatno razlikovati od metoda koje mjere vlažnost u manjem volumenu ili na specifičnim dubinama, njegova sposobnost da obuhvati velike površine i dublje slojeve tla čini ga neprocjenjivim alatom u poljoprivredi i ekološkim istraživanjima. Korištenjem kombinacije CRNS-a i drugih metoda poput TDR-a, moguće je dobiti sveobuhvatniji uvid u varijabilnost vlažnosti tla, čime se poboljšavaju predviđanja o stanju tla i upravljanje vodnim resursima.

Analiza rezultata efektivnih oborina i normi navodnjavanja utvrđena u računalnom programu CROPWAT za 30-godišnje razdoblje (1988.-2017.) na klimatološkoj postaji Zagreb-Maksimir pokazuje kako različiti poljoprivredni usjevi reagiraju na raspoloživost vode tijekom vegetacijske sezone. Tijekom vegetacijske sezone, pšenica je imala efektivne oborine od 465 mm, uz najnižu normu navodnjavanja od 56,1 mm. Kukuruz je zabilježio efektivne oborine od 417 mm, s normom navodnjavanja od 105 mm. Soja je imala efektivne oborine od 320 mm i najveću normu navodnjavanja od 124 mm, dok je suncokret, s efektivnim oborinama od 319 mm, zahtijevao normu navodnjavanja od 106 mm. Dok pšenica, s relativno visokim efektivnim oborinama tijekom vegetacije ima relativno niske potrebe za navodnjavanjem, kukuruz, soja i suncokret, ovisno o svojim biološkim potrebama i vremenskim uvjetima, zahtijevaju relativno veće norme navodnjavanja.

Kombinacija CRNS s drugim metodama omogućava dobivanje sveobuhvatne slike o stanju vlažnosti tla, što olakšava buduću implementaciju sustava navodnjavanja na pokušalištu Maksimir prema specifičnim potrebama različitih kultura, kao što su pšenica, kukuruz, soja i suncokret. Ovi podaci igraju ključnu ulogu u potpori održivoj poljoprivredi i optimalnom korištenju vodnih resursa na pokušalištu Maksimir.

6. Popis literature

1. Abebe, T., Guenzi, A. C., Martin, B., Cushman, J. C. (2003). Tolerance of mannitol-accumulating transgenic wheat to water stress and salinity. *Plant physiology*, 131(4), 1748-1755.
2. Alahdadi, I., Oraki, H. (2011). Effect of water stress on yield and yield components of sunflower hybrids. *African Journal of Biotechnology*, 10(34), 6504-6509.
3. Allan, 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*, 300(9), D05109.
4. Barnabás, B., Jäger, K., Fehér, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, cell & environment*, 31(1), 11-38.
5. Benzinger, B., Jawerth, N. (2018). Using cosmic rays to measure moisture levels in soil (Russian Edition). *IAEA Bulletin (Online)*, 59(3), 16-17.
6. Butts-Wilmsmeyer, C. J., Seebauer, J. R., Singleton, L., Below, F. E. (2019). Weather during key growth stages explains grain quality and yield of maize. *Agronomy*, 9(1), 16.
7. Carter, E. K., Melkonian, J., Riha, S. J., Shaw, S. B. (2016). Separating heat stress from moisture stress: analyzing yield response to high temperature in irrigated maize. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094012.
8. Dembinska, O., Lalonde, S., Saini, H. S. (1992). Evidence against the regulation of grain set by spikelet abscisic acid levels in water-stressed wheat. *Plant Physiology*, 100(3), 1599-1602.
9. Fereres, E., Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*, 58(2), 147-159.
10. Gabr, M. E. S. (2022). Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 3127-3142.

11. ISO 11461:2001; EN ISO 11461:2014): Kvaliteta tla - Određivanje volumnog sadržaja vode u tlu pomoću cilindra za uzimanje uzoraka - Gravimetrijska metoda
12. ISO, H. 11465, 2004: Kakvoća tla–Određivanje suhe tvari i sadržaja vode na osnovi mase–Gravimetrijska metoda (ISO 11465+ Cor 1: 1994); Soil quality–Determination of dry matter and water content on a mass basis–Gravimetric method (ISO 11465: 1993+ Cor 1: 1994).
13. Joint, F. A. O. (2017). *Cosmic Ray Neutron Sensing: Use, Calibration and Validation for Soil Moisture Estimation* (No. IAEA-TECDOC--1809). Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture.
14. Kirda, C. (2002). Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. *Food and Agricultural Organization of the United Nations, Deficit Irrigation Practices, Water Reports*, 22(102), 3-10.
15. Kirkham, M. B. (2004). *Principles of Soil and Plant Water Relations*, 2nd edn. Kansas, Dreibelbis, Throckmorton Plant Science Center, Manhattan.
16. Köhli, M., Schrön, M., Schmidt, U. (2018). Response functions for detectors in cosmic ray neutron sensing. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, 902, 184-189.
17. Mittler, R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in plant science*, 11(1), 15-19.
18. Ondrašek, G., Petošić, D., Tomić, F., Mustać, I., Filipović, V., Petek, M., Lazarević, B., Bubalo, M. (2015.): *Voda u agroekosustavu*, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
19. Power, D., Rico-Ramirez, M. A., Desilets, S., Desilets, D., Rosolem, R. (2021). Cosmic-Ray neutron Sensor PYthon tool (crspy 1.2. 1): an open-source tool for the processing of cosmic-ray neutron and soil moisture data. *Geoscientific Model Development*, 14(12), 7287-7307.
20. Quiroga, S., Fernández-Haddad, Z., Iglesias, A. (2011). Crop yields response to water pressures in the Ebro basin in Spain: risk and water policy implications. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 505-518.

21. Romić, D., Marušić, J. (2005). Nacionalni projekt navodnjavanja i gospodarenja poljoprivrednim zemljištem i vodama u Republici Hrvatskoj. *Građevni godišnjak...*, 2005, 1-150.
22. Schrön, M., Köhli, M., Scheffele, L., Iwema, J., Bogen, H. R., Lv, L., ... Zacharias, S. (2017). Improving calibration and validation of cosmic-ray neutron sensors in the light of spatial sensitivity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(10), 5009-5030.
23. Sionit, N., Kramer, P. J. (1977). Effect of water stress during different stages of growth of soybean 1. *Agronomy journal*, 69(2), 274-278.
24. Smith, M. (1992.): Cropwat-A computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage paper. No. 46, FAO, Rome
25. Stevanato, L., Baroni, G., Cohen, Y., Fontana, C. L., Gatto, S., Lunardon, M., Morselli, L. (2019). A novel cosmic-ray neutron sensor for soil moisture estimation over large areas. *Agriculture*, 9(9), 202.
26. Tognetti, R., d'Andria, R., Lavini, A., Morelli, G. (2006). The effect of deficit irrigation on crop yield and vegetative development of *Olea europaea* L.(cvs. Frantoio and Leccino). *European journal of agronomy*, 25(4), 356-364.
27. USDA.(1967.): Irrigation water requirements. Tech. Release No. 21, United States Dept. of Agr., Soil Management, 59: 67–75
28. Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Azher Nawaz, M., Farooq, M. (2021). Thermal stresses in maize: effects and management strategies. *Plants*, 10(2), 293.
29. Yang, Y., Xu, W., Hou, P., Liu, G., Liu, W., Wang, Y., ... Li, S. (2019). Improving maize grain yield by matching maize growth and solar radiation. *Scientific reports*, 9(1), 3635.
30. Internet 1: <https://pinova-meteo.com/blog/metode-odredivanja-vlage-u-tlu> (pristup 6.9.2024. 21:19 h)

Životopis

Marko Madžar rođen je u Zagrebu 6. Listopada 1998. godine. Pohađao je Nadbiskupsku klasičnu gimnaziju u Zagrebu od 2013. do 2017. Po završetku srednjoškolskog obrazovanja u srpnju 2017. godine upisao je Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Obranom završnog rada u rujnu 2022. godine na studiju Poljoprivredna tehnika završio je preddiplomski studij i potom upisao diplomski studij Poljoprivredna tehnika-Melioracije. Posjeduje vrlo dobro znanje engleskog jezika u govoru i pismu. Znanstveni interesi mu pokrivaju razne grane poljoprivrede i stočarstva i primjenu novih tehnologija u tim znanstvenim disciplinama. Od hobija vrijedi navesti bavljenje sportom u slobodno vrijeme, planinarenje i povijest.