

Usporedba različitih metoda praćenja vodnog stresa kod soje (*Glycine max* (L.) Merrill)

Spišić, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:151:414978>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



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

Marija Spišić
Diplomski sveučilišni studij Bilinogojstvo
Smjer Biljna proizvodnja

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA PRAĆENJA VODNOG STRESA KOD SOJE
(Glycine max (L.) Merr.)

Diplomski rad

Osijek, 2023.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Marija Spišić

Diplomski sveučilišni studij Bilinogojstvo

Smjer Biljna proizvodnja

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA PRAĆENJA VODNOG STRESA KOD SOJE
(Glycine max (L.) Merr.)

Diplomski rad

Osijek, 2023.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Marija Spišić

Diplomski sveučilišni studij Bilinogojstvo

Smjer Biljna proizvodnja

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA PRAĆENJA VODNOG STRESA KOD SOJE
(Glycine max (L.) Merr.)

Diplomski rad

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. prof. dr. sc. Irena Rapčan, predsjednica
2. izv. prof. dr. sc. Monika Marković, mentorica
3. dr. sc. Maja Matoša Kočar, članica

Osijek, 2023.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE.....	2
2.1. Općenito o soji.....	2
2.2. Agroekološki uvjeti za proizvodnju soje	3
2.3. Fiziološki pokazatelji stresa	5
2.4. Agrotehnika proizvodnje soje	7
2.5. Praćenje vodnog stresa u tlu i biljci	8
2.6. NDVI.....	13
3. MATERIJAL I METODE RADA.....	14
4. REZULTATI.....	23
4.1. Mikroklimatski uvjeti.....	23
4.2. Rezultati hidropedoloških analiza tla.....	24
4.3. Dinamika vlažnosti tla	26
4.4. Temperatura lista.....	32
4.5. Relativni sadržaj klorofila.....	33
4.6. Parametri fluorescencije klorofila a.....	35
4.6.1. Maksimalni kvantni prinos fotosustava II (TR_0/ABS)	35
4.6.2. Gustoća aktivnih reakcijskih središta (RC/CS_0).....	36
4.6.3. Indeks fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS}).....	37
4.6.4. Indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI (PI_{total})	38
4.7. Primjena algoritama strojnog učenja za klasifikaciju vodnog stresa biljke	40
4.7.1. Rezultati na testnom skupu podataka.....	41
5. RASPRAVA	42
6. ZAKLJUČAK	47
7. LITERATURA.....	48
8. SAŽETAK	56
9. SUMMARY	57
10. POPIS TABLICA	58
11. POPIS SLIKA	59
12. POPIS GRAFIKONA.....	60

1. UVOD

Pored sve učestalijih klimatskih ekstrema kao što su pojava suša, poplava i ekstremno visokih temperatura zraka, do vodnog stresa kod biljaka može doći uslijed povećanog sadržaja soli u tlu ili u vodi za navodnjavanje te nepravilnom prihranom. Biljke reagiraju na vodni stres različitim mehanizmima prilagodbe, a u slučaju da su stresu izložene dulje vremensko razdoblje tada dolazi do sniženja prinosa i narušavanja kakvoće. Uslijed stresa dolazi do morfoloških, fizioloških, bioloških i kemijskih promjena u biljkama što u konačnici utječe na rast i ostvarivanje punog potencijala rodosti. Lisar i sur. (2012.) navode sniženje prinosa uslijed stresa kod većine kultura do 50 %. Vodni stres u biljnoj proizvodnji može biti promatram u kontekstu vode u tlu te opskrbljenosti biljke vodom. U uvjetima vodnog stresa najvažnije je odabrati metodu kojom će se tijekom razdoblja vegetacije pratiti stres kako ne bio došlo do neželjenog sniženja prinosa. U tu svrhu se koriste različiti mjernih senzori kojima se prate vremenski uvjeti te sadržaj vode u tlu. Kada se u kontekstu vremenskih uvjeta analizira vodni stres, primarno se prati količina i raspored oborine, temperatura i vlažnost zraka, brzina vjetra te sati sijanja sunca. Navedeni parametri su neophodni kod analize potrebe biljaka za vodom, odnosno vode koja bi se trebala nadoknaditi navodnjavanjem. Pri tome je praćenje sadržaja vode u tlu osnova za određivanje trenutka početka navodnjavanja. Sadržaj vode u tlu može biti mjeren direktnom metodom gravimetrije i indirektnim metodama koje podrazumijevaju upotrebu senzora za mjerenje vlažnosti tla koji radi na principa tenziometrije, elektrometrije i reflektometrije, a mjere ili sadržaj vode u tlu (%mas. ili %vol.) ili neke od parametara koji se mogu dovesti u vezu sa sadržajem vode u tlu (cbar, kPa). U znanstvenim istraživanjima se koriste različite metode kojima se prati odgovor biljaka za stres izazvan sušom, visokim temperaturama, povećanim intenzitetom svjetlosti, solnim udarom ili nekim drugim izvorom stresa. Različitim mjernim sensorima se prati intenzitet fotosinteze, lisna površina, uvijenost lista, otvorenost puči, sadržaj klorofila i drugih pokazatelja reakcije biljke na stres. Cilj diplomskog rada je pratiti utjecaj vodnog stresa u kontroliranim uvjetima kod različitih tretmana navodnjavanja odnosno vodnog stresa u kritičnim fazama razvoja soje (cvatnja (R2, f1) i nalijevanje zrna (R6, f2).

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Općenito o soji

Soja (*Glycine max* (L.) Merr.) je jedna od značajnijih kultura u svijetu čije se zrno koristi kao izvor bjelančevina i ulja. Znanstvenim i tehnološkim razvojem se potvrđuje njena vrijednost i povećava upotreba u prehrani ljudi, ishrani stoke te kao sirovine u raznim granama industrije. Soja potječe iz Azije, gdje je dugo predstavljala glavni izvor hrane, a danas se uzgaja u više od 90 zemalja. Tek izgradnjom tvornica za preradu zrna u 20. stoljeću, soja postaje trgovačka roba.

Danas se pri preradi soje u svijetu najveći dio proizvedenog sojinog zrna koristi za ishranu stoke. Sojina sačma je najkvalitetnija biljno bjelančevinasta hrana i može biti glavni izvor bjelančevina kod ishrane stoke (naročito svinja, peradi, riba, tovnih goveda, visokomuznih krava i sportskih konja). Sojina biljka se također može koristiti kao zelena masa, sijeno ili za silažu, a dehidriranjem se dobiju brikete, granule i zeleno brašno. U ljudskoj prehrani koristi se cijelo zrno ili prerađeno sojino zrno. U tvornicama se prerađuje u proizvode kao što su: sir tofu, mlijeko, pljeskavice, hrenovke, kruh, razne slastice i drugo. Prerodom sojinog zrna dobiva se ulje i drugi proizvodi (sačme, pogače, brašno, teksturirani bjelančevinasti koncentri, izolati) s 38 do 95 % bjelančevina, koji se koriste za ishranu ljudi, domaćih životinja te kao sirovina u prehrambenoj, kemijskoj i farmaceutskoj industriji.

Tablicom 1. su prikazane požnjevene površine i proizvodnja soje u Republici Hrvatskoj u razdoblju od 2017. do 2021. godine. U Republici Hrvatskoj, ukupno požnjevene površine soje su u razdoblju od 2017. do 2021. godine varirale od 77090 (2018.) do 86260 ha (2021.), dok su prosječni prinosi po hektaru bili u rasponu od 2,4 do 3,2 t/ha (DZS, 2023.).

Tablica 1. Požnjevene površine i proizvodnja soje od 2017. do 2021. u Hrvatskoj

	<i>Mjerna jedinica</i>	<i>2017.</i>	<i>2018.</i>	<i>2019.</i>	<i>2020.</i>	<i>2021.</i>
<i>Požnjevena površina</i>	ha	85133	77090	78330	86190	86260
<i>Prinos po ha</i>	t	2,4	3,2	3,1	3,1	2,6

U svijetu, požnjevena površina soje je za razdoblje od 2017. do 2021. godine varirala od 121275801 (2019.) do 129523964 ha (2017.) uz prosječne prinose u rasponu od 2,8 t/ha do 2,9 t/ha (tablica 2.).

Tablica 2. Požnjevene površine i prinos soje od 2017. do 2021. u svijetu (FAO, 2023.)

	<i>Mjerna jedinica</i>	<i>2017.</i>	<i>2018.</i>	<i>2019.</i>	<i>2020.</i>	<i>2021.</i>
<i>Požnjevena površina</i>	ha	125863290	124064630	121275801	127057164	129523964
<i>Prinos po ha</i>	t	2,9	2,8	2,8	2,8	2,9

2.2. Agroekološki uvjeti za proizvodnju soje

Soja je pogodna za uzgoj na mnogim tipovima tala, no najbolje uspijeva na dubokim, strukturnim, plodnim tlima, bogatim humusom, dobrih vodozračnih odnosa, na kojima se ne stvara pokorica. Može dati dobre rezultate i na siromašnijim tlima, no potrebna je dobra opskrbljenost vodom. Za uspješnu nodulaciju i optimalnu aktivnost nitrofiksirajućih bakterija na korijenu soje pH tla treba biti od 6 do 8, jer je u kiselim tlima ($\text{pH} < 5,5$) onemogućeno stvaranje simbiotske zajednice. Isto vrijedi za zbijena i slana tla, tj. tla s pH većim od 8 (Vratarić i Sudarić, 2008.). Pojedine sorte imaju različite zahtjeve za tlo.

Svjetlo je važan energetski izvor u procesima fotosinteze, a o intenzitetu i spektralnom sastavu svjetla ovisi tijek rasta i razvoja biljke. Po načinu fotosinteze soja pripada C3 tipu biljaka. Za fotosintezu najpovoljnije su plavo-ljubičaste zrake valne duljine 400 do 500 nm čija apsorpcija na listovima iznosi 95 %. Nakon toga slijede crveno-narančaste zrake valne duljine 600 do 700 nm s 90 % apsorpcijom u listovima. Ostale zrake listovi apsorbiraju oko 60 % (Vrtarić i Sudarić, 2008.). Svjetlo ima veliki utjecaj i na morfološke osobine, te uzrokuje razlike u visini biljke i površini lista, što posredno utječe na ukupnu proizvodnju suhe tvari i prinos zrna. Feng i sur. (2019.) navode niže biljke, kraći hipokotil, te veću biomasu i promjer stabljike soje na tretmanima s povećanim intenzitetom svjetla. Nadalje, intenzitet svjetla utječe na veličinu i masu kvržica na korijenu soje. Ako ima dovoljno svjetla kvržice su krupnije, imaju veću masu, a povećana je i njihova moć fiksacije dušika (Molnar, 1998.). Osim intenziteta i spektralnog sastava svjetla, važna je i duljina dana. Soja je biljka kratkog dana, što znači da joj je za prelazak iz vegetativne u generativnu fazu potreban dan kraći od 12 do 14 h (Garner i

Allard, 1930.). Svjetlo, prema tome, inicira početak cvatnje, ali za prelazak u generativnu fazu važne su i temperature zraka te količina dostupnih hraniva. Prema osjetljivosti na fotoperiodizam, sorte soje možemo podijeliti u 13 grupa zriobe, pri čemu su najranije grupe zriobe 000, 00 i 0, a ostalih 10 koje označavamo rimskim brojevima (I. - X., Hartwig, 1973.). Glavna područja za proizvodnju soje u Hrvatskoj su između 44° i 46°S, gdje je duljina dana u vrijeme vegetacije soje između 13,5 i 15,5 sati. U tim područjima uzgoja dolaze u obzir sorte soje od 00 do II. grupe zriobe, pri čemu su u najistočnijem području optimalne I. - II. grupe zriobe, a u zapadnom 0. - 00. grupe zriobe (Vratarić i Sudarić, 2008.).

Potreba soje za vodom se razlikuje ovisno o fazi razvoja i vremenskim uvjetima. Najveća potreba soje za vodom je u reproduktivnoj fazi, odnosno u fazi nalijevanja zrna kada dolazi do sniženja prinosa ako dostupna voda nije dovoljna da bi se zadovoljile potrebe evapotranspiracije (ET, Westgate i sur., 1993.). Voda je jedan od najvažnijih čimbenika koji utječu na prinos i kakvoću soje, a dolazi uslijed nedovoljne vlažnosti tla u zoni korijenovog sustava i kod povećane transpiracije. Osim kod pojave suše, do vodnog stresa može doći i kod povećanog sadržaja soli u tlu ili u vodi za navodnjavanje. Vodna bilanca često nije optimalna za uzgoj poljoprivrednih kultura (pogotovo ako se ne primjenjuje navodnjavanje) stoga što biljkama pristupačna voda nije dovoljna kako bi se nadoknadila potrebna voda, odnosno ona voda koju biljka koristi za proces evapotranspiracije (ETo). Vodnom bilancom se prate prihodi i rashodi vode u tlu, odnosno količina vode koja u tlo dospije oborinama ili navodnjavanje, odnosno prate se rashodi vode ili količina vode koja je utrošena na proces ETo. Bilanciranjem sadržaja vode u tlu se teži zadržati optimalna vlažnost tla koja je u pogledu vodnih konstanti u rasponu između poljskog vodnog kapaciteta (Pvk) i lentokapilarne vlažnosti tla (Lkv). Rkv je idealno stanje vlažnosti tla kod kojeg su mikropore popunjene vodom, a makropore zrakom. Nastaje nakon procjeđivanja suvišne gravitacijske vode, a brzina procjeđivanja suvišne vode će ovisiti o teksturnom svojstvu tla (Wanderlinden i sur., 2011.) koja uvjetuje zadržavanje vode u tlu. Tla s povećanim sadržajem gline i organske tvari imaju veću vododržuću sposobnost od pjeskovitih tala (Lopez i Barklay, 2017.). Ako izostane prihod vode, sadržaj vode u tlu se smanjuje do vrijednosti Lkv pri čemu rastu sile držanja vode za čestice tla, odnosno voda postaje teže dostupna. U meliorativnoj praksi ovo stanje vlažnosti tla predstavlja trenutak početka navodnjavanja i naziva se tehnički minimum (Allen i sur., 1998.). Daljim opadanjem sadržaja vode u tlu dolazi do stanja vlažnosti tla koje se naziva točka venuća (Tv). Kod Tv tlo sadrži vodu, ali se voda u tlu drži jakim silama i biljkama je nedostupna. Tv će ovisiti o uzgajanoj kulturi i teksturi tla. Rai i sur. (2017.) navode da se kod tala fine teksture sadržaj vode

u tlu kod vrijednosti Tv kreće u rasponu od 26 %vol. do 32 %vol., dok je kod ostalih tala u rasponu od 10 %vol. do 15 %vol.

Tijekom sušnih razdoblja, odnosno kada je vodni potencijal tla manji od lentokapilarne točke, u biljkama se događaju određene fiziološke promjene jer su izložene nedostatku lako pristupačne vlage tla (vodnom stresu). U sušnim uvjetima biljka reagira smanjenjem lisne površine, odbacivanjem lišća (apscizija), pojačanim rastom korijena, pritvaranjem puči, osmotskom prilagodbom i zadebljanjem kutikule. U slučaju da je soja dulje vremenski razdoblje izložena stresu izazvanom nedostatkom vode, dolazi do morfoloških i fizioloških promjena, visine biljke, broja listova po biljci, broja grana po biljci, prinosa i komponenti prinosa, lisne površine i duljine korijena. Uslijed vodnog stresa dolazi do narušavanja fotosintetske aktivnosti biljke (Osakabe i sur., 2013.). Vodni stres dovodi do smanjenja vodnog potencijala lista te otvorenosti puči uslijed čega dolazi do slabijeg usvajanja CO₂ (Chaves i sur., 2009., Osakabe i Osakabe, 2012.). Rezultati ranije objavljenih istraživanja govore u prilog negativnog utjecaja vodnog stresa na prinos i kvalitetu soje (Ohashi i sur., 2008., Makbul i sur., 2011., Berhanu i sur., 2014., Cseresnyes i sur., 2016., Shukla i sur., 2018.)

2.3. Fiziološki pokazatelji stresa

U osnovi, stres se kod biljaka može svrstati u dvije osnovne kategorije. Abiotski stres izazivaju fizikalni ili kemijski činitelji okoliša kao što su osvjetljenje, temperatura, vlaga, različite toksične tvari, dok je biotski stres izazvan djelovanjem drugih organizama, najčešće patogenih mikroorganizama i štetnika. Često se ove dvije osnovne kategorije okolišnog stresa u djelovanju na biljke preklapaju, tj. pojavljuju istovremeno ili su međusobno povezane. Biljke najčešće nisu izložene samo jednoj vrsti stresa jer se u određenim uvjetima tla i klime može dogoditi višestruki stres ako su dva ili više činitelja izvan granica optimuma za biljke.

S fiziološkog stanovišta, preživljavanje ili oporavak organizma biljke je glavno svojstvo koje se podrazumijeva kada se govori o tolerantnosti na stres. Različiti oblici abiotskog stresa u biljkama mogu pokrenuti iste fiziološke mehanizme obrane. Primarni učinci poput smanjenja vodnog potencijala, odnosno dehidracije stanice izazvane različitim vrstama stresa, direktno utječu na fizikalna i biokemijska svojstva stanica, što izaziva sekundarne učinke, kao što su smanjena metabolička aktivnost, citotoksičnost pojedinih iona, cjelokupno narušavanje stanične homeostaze.

Biljke su izložene čestim promjenama temperature, a za razliku od životinja, njihova je temperatura ovisna o okolišu. Mnogi listovi su vrlo tanki, dobro prilagođeni apsorpciji FAR, malog toplinskog kapaciteta te vrlo lako gube suvišak toplinske energije uz brze temperaturne promjene fotosintetskog aparata. Međutim, kad je temperatura okoline ista kao i temperatura lista, nema gubitka toplinske energije.

Isparavanje vode s površine lista (transpiracija) može trošiti veliku količinu toplinske energije (latetna toplina) i tako hladiti list. Naravno, za najveću moguću transpiraciju potrebno je dovoljno raspoložive vode u tlu, a i transpiracija različitih biljnih vrsta jako se razlikuje efektom hlađenja. Listovi su općenito najtopliji dijelovi biljaka što (već iznad 30°C) može negativno utjecati na fotosintezu, a da pritom rast biljaka bude veći. Također, na niskim temperaturama rast biljaka često više ovisi o temperaturi, a manje o fotosintezi. Dakle, niske temperature ograničavaju rast, a visoke fotosintetu pa su učinci toplinskog stresa izraženi najviše smanjivanjem intenziteta fotosinteze.

Dva biljna procesa posebno su osjetljiva na toplinski stres, razvoj polena i fotosinteza, a ostali procesi, uključujući i disanje, znatno su otporniji na ekstremne temperature. Svjetlo je izvor energije za fotosintezu, ali je istovremeno i uzrok fotooksidacijskog stresa. Većina biljaka ima fotosintetsku učinkovitost u rasponu od 0,1% do 0,3% i mogu se vrlo dobro adaptirati na širok raspon osvjetljenja.

Budući da je fotosinteza već odavno prepoznata kao jedan od procesa na kojeg utječu okolišni uvjeti, razumijevanje fizioloških procesa kojima temperatura i svjetlost utječu na proces fotosinteze, važan je za poljoprivrednu proizvodnju. Iz tog razloga, ispitivanje fotosintetske učinkovitosti u uvjetima stresa bila je tema brojnih dosadašnjih istraživanja u kojima je metoda mjerenja fluorescencije klorofila a često korištena prilikom utvrđivanja pojave stresa na biljci preko njezine fotosintetske učinkovitosti. Fluorescencija klorofila a predstavlja emitiranje male količine energije u obliku svjetlosti kada se elektron brzo vraća iz pobuđenog stanja u osnovno te daje informaciju o funkcioniranju lanca transporta elektrona u fotosustavu II (Strasser i sur., 2004., Vukadinović i sur., 2014.). Fluorescencija klorofila a daje uvid u status i funkciju fotosintetskog aparata, učinkovitost fotosustava II i funkciju lanca transporta elektrona (Strasser i sur., 1995.)

2.4. Agrotehnika proizvodnje soje

Za visoke prinose, potrebno je izabrati kvalitetno sjeme soje. Kod izbora sorata za sjetvu potrebno je voditi računa o genetskom potencijalu rodosti sorte, tj. prinosu i kakvoći zrna (sadržaj ulja i bjelančevina u zrnu), dužini vegetacije, otpornosti na glavne bolesti, polijeganju i drugo. Vrijeme sjetve soje može znatno utjecati na prinos. Sam rok sjetve mora se odrediti prema sorti, cilju uzgoja, zemljopisnoj širini, agropedološkim i klimatskim činiteljima. Variranja u prinosu zrna su povezana s datumom sjetve, koji je pod utjecajem vremenskih uvjeta i njihovim utjecajem na razvoj bolesti, polijeganje, visinu biljaka, abortiranje cvjetova i oplodnju, kao i na ukupni rast te kakvoću zrna. Pedersen i Lauer (2004.) u rezultatima istraživanja navode veći broj zrna i mahuna te žetveni indeks kod ranijih rokova sjetve soje. Soju se može sijati na uske i široke redove, u trake, u kućice, a i širom kao postrni usjev. Način sjetve i veličina vegetacijskog prostora utječu na prinos soje. Sklop i raspored biljaka utječu na rast, razvoj i produktivnost soje. Prema Rahman i sur. (2011.), ovisno o vremenskim uvjetima i genotipu, prinos zrna soje je veći na tretmanima s većom gustoćom sjetve, dok se broj mahuna po biljci, broj zrna po mahuni te masa zrna smanjila. Preporuka je obaviti bakterizaciju sjemena soje prije sjetve, bakterijama *Bradyrhizobium japonicum spp.* jer unošenjem bakterija, fiksatora dušika popravlja strukturu tla, povećava se sadržaj bjelančevina u zrnu soje i štede se dušična gnojiva za sljedeću kulturu.

Pravilnom obradom tla se popravljaju prvenstveno fizička te kemijska i biološka svojstva tla. Vrijeme i način obrade tla se razlikuje ovisno o tipu tla i njegovim svojstvima, klimatskim uvjetima, predusjevu, dubini osnovne obrade, opremljenosti gospodarstva mehanizacijom te ekonomskoj opravdanosti. Konvencionalnu obradu tla za soju treba obaviti tijekom ljeta i početkom jeseni, što zavisi od predusjeva i agroekoloških uvjeta područja. Prema rezultatima istraživanja provedeno u SAD-i i Kanadi (DeFelice i sur., 2006.), prinos soje na različitim tretmanima obrade tla (konvencionalna i no-tillage) je ovisio o području uzgoja i tipu tla. Kod no-tillage obrade tla ili direktne sjetve je zabilježen viši prinos soje u južnim i zapadnim regijama te umjereno i dobro dreniranim tlima, dok je na tlima zasićenim vodom veći prinos soje ostvaren na tretmanima s konvencionalnom obradom tla.

Za vrijeme vegetacije soja neravnomjerno prima hraniva, a usvajanje ovisi o fazi rasta, sorti, plodnosti tla te klimatskim uvjetima. Ohyama i sur. (2016.) navode da je za proizvodnju 1 kg soje potrebno 93 g N, 32 g K, 23 g Ca, 10 g Mg, 9 g P, 7 g S.

Najbolji način suzbijanja korova kod uzgoja soje je kombinacija kemijskog i mehaničkog suzbijanja. Smatra se da za svaku vrstu korova treba detaljno znati za koliko tjedana poslije nicanja soje treba biti suzbijena. Kemijsko suzbijanje korova, tj. primjena herbicida je na prvom mjestu te je to najbrži i ekonomičniji put kojim se može postići dulja i bolja suzbijenost korova dok je mehaničko suzbijanje samo dopuna kemijskom. Najznačajnije su bolesti uzrokovane gljivama, a manje bakterijama i virusima. Od gljivičnih oboljenja na soji najznačajnije su: plamenjača soje (*Peronospora manshurica*), bijela trulež soje (*Sclerotinia sclerotiorum*), crna pjegavost stabljike (*Diaporthe phaseolorum* var. *caulivora*), palež mahuna i stabljike (*Diaporthe phaseolorum* var. *sojae*). Od bolesti prouzrokovanih bakterijama najviše je prisutna bakterijska plamenjača *Pseudomonas syringae* pv. *glycinea*. Od virusnih oboljenja kod uzgoja soje se javlja mozaik soje (SMV) i žuti mozaik soje (BPMV). Najčešće mjere borbe koje se koriste su: odabir tolerantnih sorti, sjetva zdravog sjemena i nadzor pri sjemenskoj proizvodnji, pravilan plodored, zaoravanje žetvenih ostataka, tretiranje usjeva fungicidima. Od štetnika se najčešće javljaju podzemne sovce i razne gusjenice.

Ako je soja uzgajana u uvjetima suše tada se potrebna voda navodnjavanjem nadoknađuje u slučaju da oborine nisu dostane da bi se zadovoljila potreba soje za vodom, odnosno ET. Najčešće je primjenjivana metoda navodnjavanja kišenjem, odnosno kišnim krilima (linijsko kišno krilo i bočno kišno krilo) te samohodni sektorski rasprskivač.

2.5. Praćenje vodnog stresa u tlu i biljci

Precizna mjerenja vodnog stresa u tlu i reakcija biljaka na vodni stres su osnova u razumijevanju potrebe biljaka za vodom. Sadržaj vode u tlu se određuje direktnim i indirektnim metodama. Direktna metoda podrazumijeva metodu gravimetrije koja je ujedno smatrana i najtočnijom metodom, a temelji se na vaganju mase vlažnog i suhog tla pri čemu razlika u masi čini sadržaj vode. Unatoč tome što je metoda gravimetrije najtočnija metoda, ona je također i vremenski zahtjevna, odnosno nepraktična za primjenu u praksi navodnjavanja. Iz tog razloga se koriste senzori za mjerenje vlažnosti tla kojima se određuje trenutak početka navodnjavanja. Primjena senzora za mjerenje vlažnosti tla predstavlja indirektnu metodu koja je temeljena na mjerenju ili vlažnosti tla ili nekih od parametara koji se mogu dovesti u vezu sa sadržajem vode u tlu (cbar, kPa). Tijekom vremena razvijene su različite metode na kojima funkcioniraju senzori za mjerenje vlažnosti tla, a neke od njih su metoda tenziometrije, reflektometrije i elektrometrije. Senzore za mjerenje vlažnosti tla se postavlja unutar ili između sjetvenih redova

na željenu dubinu koja će ovisiti o kulturi koja je uzgajana odnosno o dubini korijenovog sustava. Uobičajeno je senzore postaviti na dubinu tla do 30 cm gdje se nalazi glavina mase korijena uzgajanih kultura. Prije postavljanja u tlo, senzore je potrebno pripremiti prema uputama proizvođača. Kod primjene senzora za mjerenje vlažnosti tla, najvažnije je senzor pravilno postaviti u tlo kako bi se postigla što točnija mjerenja. Nadalje, za pravilan rad senzora važno je ostvariti što bolji kontakt senzora s tlom što će također ovisiti i o samoj teksturi tla. Primjerice, kod tala s povećanim sadržajem pijeska će se teže ostvariti dobar kontakt senzora s tlom. U konačnici, kada je senzor postavljen u tlo najvažnije je pravilno interpretirati mjerne vrijednosti, a za to je senzor potrebno umjeriti za svaki tip tla na kojem se koristi. Za umjeravanje senzora za mjerenje vlažnosti tla se koristi metoda gravimetrije. Uzorkuje se tlo u cilindrima po Kopeckom, važe se uzorak tla te se istovremeno mjeri sadržaj vode u tlu odabranim senzorom. Potom se uzorci tla suše u sušioniku na 105 °C te ponovno važu kako bi se odredila trenutačna vlažnost tla prema slijedećem izrazu (Black, 1965.):

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

Gdje je:

Trv = trenutačna vlažnost tla (%)

mv = masa vlažnog tla (g)

ms = masa suhog tla (g).

Rezultat umjeravanja senzora je krivulja umjeravanja koja služi kao vodilja za određivanje trenutka početka navodnjavanja. Odnosno, to znači da se prema izmjerenim vrijednostima prepoznaje sadržaj vode u tlu kod vrijednosti Lkv što ujedno predstavlja tehnički minimum, odnosno trenutak početka navodnjavanja.

Metoda elektrometrije

Rezultati brojnih istraživanja ukazuju na mogućnosti primjene Watermark senzora u praćenju sadržaja vode u tlu i planiranju navodnjavanja (Irmak i Haman, 2001., Intigliolo i Castel, 2004., Leib i sur., 2013., Marković i sur., 2014., Marković i sur., 2015., Marković i sur., 2016., Jabro i sur., 2020.).

Watermark senzor (slika 1.) radi na principu elektrometrije, a njegova prednost u odnosu na druge senzore je ta što senzor nije osjetljiv na nagle promjene pH reakcije tla i moguće ga je koristiti na različitim tipovima tala.



Slika 1. Watermark senzor (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Senzor je sastavljen od gipsa koji služi kao pufer. Unutar senzora se nalaze dvije elektrode od nehrđajućeg metala. Postavljen je u perforiranu cijev što senzoru daje čvrstoću i izdržljivost. Gips se vrlo brzo poprima stanje vlažnosti tla u koje je postavljeno. Watermark senzor prikazuje vrijednosti u centibarima (cbar), pri čemu se vrijednosti kreću od 0 do 199 cbar. Kada je u tlu sadržaj vode pri vrijednosti Rkv, tada je vrijednost na senzoru jednaka 0 cbar. Kako se sadržaj vode u tlu smanjuje tako vrijednosti na senzoru rastu.

Metoda tenziometrije

Tenziometar je senzor koji mjeri vodni potencijal tla te pokazuje sposobnost biljke da usvaja vodu iz tla (slika 2.). Jednako kao i Watermark često su korišteni u praksi navodnjavanja za određivanje trenutka početka navodnjavanja. Tenziometar također sadržaj vode u tlu iskazuje u centibarima pri čemu vrijednosti 0 cbar predstavlja saturirano tlo, od 5 do 10 cbar prekomjernu vlažnost tla, 10 do 20 cbar Rkv. Vrijednosti od 20 do 40 cbar predstavlja stanje vlažnosti kod Lkv i to kod lakših tala, dok vrijednosti od 40 do 60 cbar predstavljaju stanje vlažnosti tla kod težih tala, te >70 cbar suho tlo (Alam i Rogers, 1997.).



Slika 2. Tenziometar (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Tenziometar se sastoji od porozne čašice povezane plastičnom cijevi s manometrom. Porozna čašica je načinjena od keramike zbog svoje čvrstoće kao i zbog poroznosti. Tijelo cijevi je prozirno tako da se voda unutar tenziometra može lako vidjeti. Prilikom mjerenja se postavlja u tlo tako da porozna čašica bude na onoj dubini koja se mjeri vlažnost tla, što znači da je za svaku lokaciju mjerenja vlage i za svaku dubinu potreban poseban tenziometar pa se iz tog razloga izrađuju tenziometri različite dužine. Nakon toga, cijev se puni do vrha destiliranom vodom ili otopinom koja sprječava razvoj algi, odstrane se mjehurići zraka te se hermetički zatvori.

Prije postavljanja tenziometra u tlo potrebno ga je umjeriti za tip tla na kojem se koristi, a postupak je jednak kao i kod prethodno opisanog senzora, odnosno kod metode elektromerije. Tenziometar se u tlo postavlja na željenu dubinu tako da se omogući što bolji kontakt senzora sa tlom. Voda iz senzora odlazi u suho tlo što povećava vrijednosti na senzoru. Što je više tlo suho, veće su i vrijednosti, dok je kod navodnjavanja ili oborina obrnut proces. Nedostatak tenziometra je u tome što se preciznost senzora postiže kod visoke vlažnosti tla te potrebi za servisiranjem senzora (Risinger, 1987.).

Mjerenje volumnog sadržaja vode u tlu (% vol.)

Senzori koji mjere volumni sadržaj vode u tlu (slika 3.) daju direktan uvid u dinamiku vlažnosti tla s visokom točnošću ($\pm 0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 3 %). Pored navedenog, velika prednost takvih senzora je ta što senzor nije potrebno prethodno umjeriti za određeni tip tla ili supstrata. Nadalje, upotrebom ovakvog tipa senzora se površina tla minimalno narušava što nije slučaj kod metode gravimetrije ili senzora za mjerenje vlažnosti tla koje se ukopava u tlo.



Slika 3. Mjerenje volumnog sadržaja vode u tlu (%vol.) (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Time Domain Reflectometry (TDR, slika 4. i 5.) metoda omogućuje *in situ* mjerenja sadržaja vode u tlu, a izmjerene vrijednosti su prikazane u volumnom sadržaju vode u tlu (%vol.).



Slika 4. i 5. Time Domain Reflectometry (TDR) (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Metoda se temelji na mjerenju brzine električnog impulsa koji prolazi uzduž senzora, a u ovisnosti je o sadržaju vode u tlu. Senzori su novijeg datuma pa nude mogućnost pohrane podataka u sam senzor te odabira duljine senzora i sadržaja glinenih čestica (high clay; medium clay). Muñoz-Carpena (2004.) ističe prednosti i nedostatke TDR senzora. Neke od prednosti su: preciznost, nije obavezno umjeravanje za određene tipove tla, minimalno remećenje strukture tla, relativna neosjetljivost na promjenu pH te mogućnost istodobnog mjerenja EC tla. Autor nadalje navodi nedostatke: relativno skupa oprema, potencijalno ograničena primjena u uvjetima visokog sadržaja soli ili u visoko provodljivim teškim glinenim tlima, obavezno umjeravanje za tla s većom količinom vezane vode (vulkanska tla, tla s visokim sadržajem

organske tvari) te relativno mala osjetljivost na dinamiku vlažnosti tla. U rezultatima istraživanja Marković i sur. (2021.) je navedeno kako u usporedbi s Watermark senzorom i tenziometrom, TDR metoda procjenjuje manji sadržaj vode u tlu.

2.6. NDVI

Indeks normalizirane razlike vegetacije (NDVI), jedan od najranijih analitičkih proizvoda daljinskog istraživanja koji se koristio za pojednostavljenje složenosti multispektralnih slika, sada je najpopularniji indeks koji se koristi za procjenu vegetacije. Ova popularnost i široka upotreba odnose se na to kako se NDVI može izračunati s bilo kojim multispektralnim senzorom s vidljivim i bliskim infracrvenim pojasom. Sve niži troškovi i težina multispektralnih senzora omogućavaju njihovo postavljanje na satelitske, zračne i sve više – bespilotne zračne sustave (UAS). Dok su studije otkrile da je NDVI učinkovit za izražavanje statusa vegetacije i kvantificiranih atributa vegetacije, njegova široka upotreba i popularnost, posebno u aplikacijama UAS-a, nose urođene rizike zlouporabe kod krajnjih korisnika koji su dobili malo ili nimalo edukacije o daljinskom senzoru. Korištenje NDVI može biti vrlo učinkovito sve dok se razumiju njegova ograničenja i mogućnosti.

Opća svrha korištenja NDVI-a je poboljšati analizu informacija o vegetaciji s podacima iz daljinskog nadzora. Studije su pokazale da je NDVI učinkovit za razlikovanje savane, guste šume i poljoprivredne površine, određivanje zimzelenih u odnosu na sezonske vrste šuma, te za procjenu različitih svojstava vegetacije, uključujući LAI, biomasu, koncentraciju klorofila u lišću, produktivnost biljaka, djelomični vegetacijski pokrov i stres biljaka. Takve se procjene često izvode korelacijom vrijednosti NDVI daljinskog senzora s vrijednostima tih varijabli izmjerenim na zemlji. Neki od problema koji se pripisuje NDVI-u je njegova osjetljivost na promjene u okolišu i/ili biomasi kada uvjeti okoliša i biomase dosegnu određenu visoku razinu (Huang i sur., 2021.).

3. MATERIJAL I METODE RADA

Opis pokusa

Jednogodišnji pokus postavljen je u vegetacijskim posudama u plasteniku na Poljoprivrednom institutu Osijek. Pokus je postavljen s jednom sortom soje u dva tretmana navodnjavanja s pet ponavljanja, što je ukupno činilo 15 vegetacijski posuda. Na n1 tretmanu biljke soje uzgajane su u optimalnim uvjetima vlažnosti tla (80 do 100 % retencijskog kapaciteta za vodu, Rkv). U drugom tretmanu navodnjavanja (n2) biljke su bile podvrgnute stresu izazvanom nedostatkom vode (50 % Rkv) u dvije različite faze razvoja: 1. faza - cvatnja (R2, f1) i nalijevanje zrna (R6, f2) (Fehr i Caviness, 1977.), u svakoj fazi na zasebnom setu biljaka. Tijekom trajanja zasušivanja mjereni su temperatura lista, fluorescencija klorofila a, relativni sadržaj klorofila te fluorescencija biljke zabilježena uz pomoć blizinskog multispektralnog senzora.

Mikroklimatski uvjeti uzgoja i tlo

Temperatura (°C) i relativna vlažnost (%) zraka su svakodnevno mjerene uz pomoć senzora Data logger - LOG32 (Dostmann electronic GmbH, Njemačka). Tlo za uzgoj biljaka uzorkovano je s površinskog oraničnog sloja do dubine od 30 cm. Prije upotrebe tlo je prosijano kroz sito kako bi se dobila čista smjesa bez biljnih ostataka i krupnih agregata (slika 6.). Nakon prosijavanja tlo je prebačeno u vegetacijske posude visine 22,5 cm, promjera 28,5 cm i zapremine 12 000 cm³. Svaka posuda napunjena je s 11 000 cm³ tla. Rezultati fizikalnih, kemijskih i hidropedoloških svojstava tla su preuzeti od Marković (2013.).



Slika 6. Prosijavanje tla (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Biljni materijal i sjetva

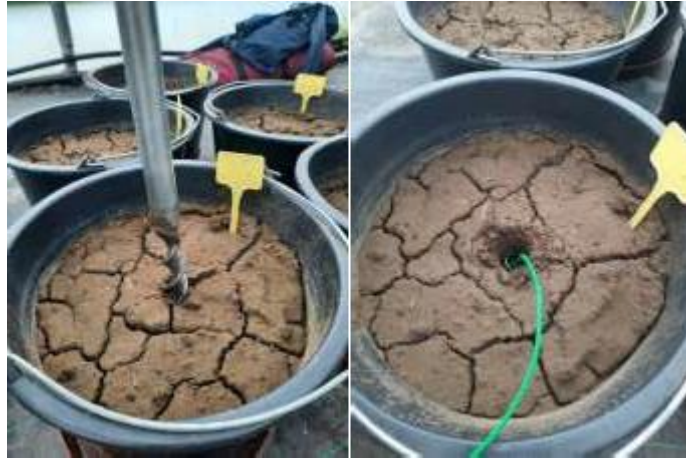
U istraživanju je korištena nova sorta soje Poljoprivrednog instituta Osijek, OS Nevena. OS Nevena je sorta 0 grupe zriobe (GZ), ima sive dlačice, ljubičasti cvijet i uski list. Sjetva je obavljena 25. travnja 2022. godine. U svaku vegetacijsku posudu posijano je šest sjemenki - po dvije sjemenke u svakom kutu jednakostraničnog trokuta dužine stranica 10 cm (slika 7.). Nakon nicanja, u V2 fazi razvoja (Fehr i Caviness, 1977.) biljke su prorijeđene kako bi u svakoj posudi ostale po tri biljke.



Slika 7. Sjetva soje (fotografija: Spišić, M., 2022.)

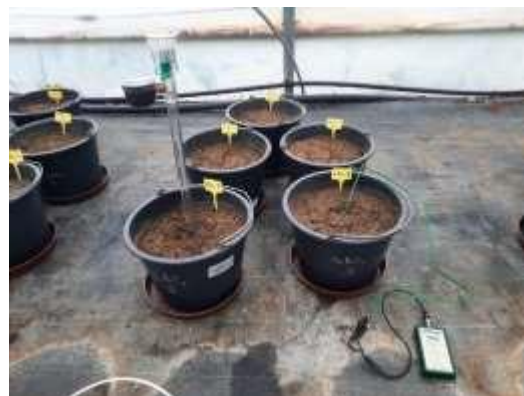
Vodni režim i senzori za mjerenje sadržaja vode u tlu

Tlo u vegetacijskim posudama je pet dana prije sjetve zasićeno do maksimalnog kapaciteta tla za vodu (Mkv), a nakon sjetve je sadržaj vode u tlu održavan na razini 100 % Rkv sve do faze cvatnje. Mkv je određen tako da se sa zalijevanjem prestalo u trenutku kada se pojavila drenažna voda. Sadržaj vode u tlu mjeren je metodama elektrometrije (Watermark, Irrrometer Company, Inc., Riverside, SAD), tenziometrije (tenziometar, Irrrometer Company, Inc., Riverside, USA), reflektometrije (TDR300, Specmeters, Specturm Technologies, Aurora, USA) i AT SM150 (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, United Kingdom) senzorom. Točnost izmjerenih vrijednosti, odnosno mjerenih senzora za praćenje vlažnosti tla je provjeravana metodom gravimetrije, odnosno vaganjem sjetvenih posuda prije i poslije zalijevanja što je ujedno poslužilo za izračun vodne bilance, odnosno ETo. Prije postavljanja u sjetvene posude, senzori za mjerenje vlažnosti tla su pripremljeni prema uputama proizvođača. Postavljanje Watermark senzora je prikazano slikama 8. i 9.



Slika 8. i 9. Postavljanje Watermark senzora (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Watermark senzori su postavljeni na dubinu od 15 cm, jednako kao i tenziometri što znači da su u istraživanju korišteni tenziometri od 15 cm duljine (slika 10.). Senzori su postavljeni u sjetvene posude odmah nakon sjetve kako ne bi došlo do oštećenja korijena kod naknadnog postavljanja. Nadalje, nakon sjetve je postavljen TDR300 senzor sa sensorima duljine 20 cm, a tijekom razdoblja istraživanja je praćen volumni sadržaj vode u tlu (vol. %) AT SM150 senzorom čija je duljina senzora 5 cm. Prema tome, u sjetvenim posadama je praćena dinamika vlažnosti tla u soju od 5 cm do 20 cm. Slika 12. prikazuje postavljene senzore.



Slika 10. Postavljeni senzori (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Vrijednosti dinamike vlažnosti tla su bilježene svakodnevno prije i poslije zalijevanja, odnosno obroka navodnjavanja. Obrok navodnjavanja je varirao u odnosu na mikroklimatske uvjete, sadržaj vode u tlu te količinu vode koju su biljke usvojile, odnosno ETo. Na n1 tretmanu je obrokom navodnjavanja sadržaj vode u tlu od vrijednosti Trv napunjen do vrijednosti 100 %

Rkv. Na N2 tretmanu tijekom zasušivanja sadržaj vode u tlu je obrokom navodnjavanja održavan na vrijednosti 50 % Rkv. Trenutak početka navodnjavanja je određen prema krivulji umjeravanja koja je preuzeta od Marković (2013.).

Mjerenje polifaznog rasta fluorescencije klorofila a

Polifazni rast fluorescencije klorofila a mjereno je senzorom Handy Plant Efficiency Analyser (PEA, Hansatech, Engleska, slika 11. i 12.). Senzor ima visoku vremensku rezoluciju (10 μ s) i bilježi promjene u intenzitetu fluorescencije počevši od 50 μ s nakon osvjetljavanja (Strasser i sur., 1995.). Senzor emitira puls crvene saturacijske svjetlosti maksimalne apsorpcije na 650 nm, 3 000 μ mFOTONA $m^{-2}s^{-1}$ u trajanju od 1s kojim se inducira zatvaranje svih reakcijskih središta i polifazni rast fluorescencije klorofila a, odnosno maksimalni intenzitet fluorescencije (F_m).



Slika 11. i 12. Senzor Handy Plant Efficiency Analyser (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Mjerenje se u fazi cvatnje (R2) provodilo od 7. do 10. lipnja 2022. godine, a u fazi nalijevanja zrna (R6, Fehr i Caviness, 1977.) od 4. do 8 srpnja 2022. godine. Mjerenja su obavljena u jutarnjim satima između 7:00 i 9:00 na srednjem listu troliske prvog od vrha potpuno razvijenog lista, na biljkama soje u kontrolnom i tretmanu zasušivanja. Listovi soje su prije mjerenja prilagođeni uvjetima tame pomoću za to predviđenih kvačica (klipsa) koje su postavljene na list 30 minuta prije početka mjerenja. U uvjetima tame otvaraju se sva reakcijska središta što je preduvjet za mjerenje minimalnog intenziteta fluorescencije (F_0).

Fluorescencija klorofila a mjerena je na tri biljke po ponavljanju, pet ponavljanja po tretmanu i dva tretmana po fazi razvoja što je ukupno iznosilo 60 mjerenja. Podatci dobiveni mjerenjem fluorescencije klorofila a upotrijebljeni su za izračunavanje parametara OJIP-testa

(Tablica 3.) prema Strasser i sur. (2004) i Yusuf i sur. (2010) u programu Microsoft Office Excel 2010.

Tablica 3. Izmjereni parametri fluorescencije klorofila a i izračunati parametri OJIP testa

Oznaka parametra	Opis parametra	Jednadžba parametra
Izmjereni parametri fluorescencije klorofila a		
F_0	Intenzitet fluorescencije nakon 50 μ s (korak O)	
F_{300}	Intenzitet fluorescencije nakon 300 μ s	
F_J	Intenzitet fluorescencije nakon 2 ms (korak J)	
F_I	Intenzitet fluorescencije nakon 30 ms (korak I)	
F_m	Maksimalni intenzitet fluorescencije (korak P)	
Izračunati parametri OJIP testa prema Strasser i sur. (2004) i Yusuf i sur. (2010)		
F_v	Maksimalna varijabilna fluorescencija	$F_m - F_0$
V_J	Varijabilna fluorescencija na J koraku	$(F_J - F_0)/(F_m - F_0)$
V_I	Varijabilna fluorescencija na I koraku	$(F_I - F_0)/(F_m - F_0)$
M_0	Ukupna brzina zatvaranja reakcijskog centra	$4(F_{300} - F_0)/(F_m - F_0)$
TR_0/ABS	Maksimalni kvantni prinos fotosustava II	$[1 - (F_0/F_m)]$
RC/CS_0	Gustoća aktivnih reakcijskih središta	$F_v/F_m \times (V_J/M_0) \times ABS/CS_0$
PI_{ABS}	Indeks fotosintetske učinkovitosti	$(RC/ABS) \times (TR_0/DI_0) \times [ET_0/(TR_0 - ET_0)];$ $RC/ABS = [(F_J - F_0)/4(F_{300} - F_0)] \times (TR_0/ABS)$ $TR_0/DI_0 = F_v/F_0$ $ET_0/(TR_0 - ET_0) = (F_m - F_J) / (F_J - F_0)$
PI_{TOTAL}	Indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI	$PI_{ABS} \times RE_0/ET_0(1 - RE_0/ET_0);$ $RE_0/ET_0 = (1 - V_I)/(1 - V_J)$

Mjerenje temperature lista

Temperatura lista mjerena je istovremeno s mjerenjem polifaznog rasta fluorescencije klorofila a pomoću senzora Dual Focus Infrared Thermometer (B+B Thermo-Technik GmbH, Germany), na istom listu na kojem je mjeren polifazni rast fluorescencije klorofila a (slika 13.). Na svakoj od tri biljke po ponavljanju napravljena su tri mjerenja temperature lista. Prema tome, na ukupno pet ponavljanja po tretmanu i dva tretmana po fazi razvoja napravljeno je 180 mjerenja temperature lista.



Slika 13. Senzor Dual Focus Infrared Thermometer (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Mjerenje relativnog sadržaja klorofila

Relativni sadržaj klorofila je mjenen istovremeno s mjerenjem polifaznog rasta fluorescencije klorofila a i temperature lista pomoću senzora Chlorophyll content meter CL-01 (Hansatech, UK), na istom listu na kojem su mjeneni polifazni rast fluorescencije klorofila a i temperatura lista (slika 14.). Na svakoj od tri biljke po ponavljanju napravljena su tri mjerenja relativnog sadržaja klorofila. Prema tome, na ukupno pet ponavljanja po tretmanu i dva tretmana po fazi razvoja napravljeno je 180 mjerenja relativnog sadržaja klorofila.



Slika 14. Senzor Chlorophyll content meter CL-01 (fotografija: Spišić, M., 2022.)

AS7263 Spektralni senzor

Mjerenja su provedena pomoću AMS (ams-OSRAM AG, Austrija) AS7263 senzorskog modula sa šest spektralnih pojaseva (3x2 foto diodnog niza) osjetljivih na valne duljine u

crvenom i bliskom infracrvenom spektru (610, 680, 730, 760, 810, 860 nm) s punom širinom na polovici maksimuma od 20 nm (slika 15.). Senzor se sastoji od plastičnog kućišta, leće i foto diodnog niza s otvorom od 0,75 mm i kutom gledanja od 20,5°. Senzor je bio spojen na prototipnu ploču Arduino Uno, a podatci su zapisivani na SD karticu temeljem programirane prekidačke funkcije gumba. Svaki prekid sastojao se od 10 uzastopnih mjerenja unutar 2000ms, a njihova srednja vrijednost bila je zapisana s vremenskom oznakom. Senzor je bio postavljen na 3D printanom nosaču i postavljeno na teleskopski tronožac visine 1,5m te napajan baterijom kapaciteta 10 Ah.

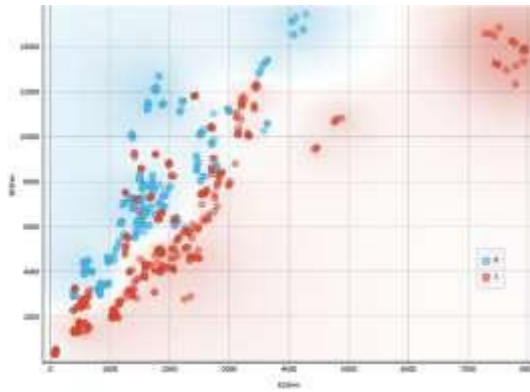


Slika 15. Spektralni senzor (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Senzor je postavljen pod kutom od 90° kako bi uhvatio biljku u teoretskoj širini polja od 0,6 m² (do tla). Mjerenja su provedena ujutro i prije solarnog podneva.

U ovom radu provedena je analiza i izrada modela strojnog učenja za klasifikaciju podataka u dvije klase – stres i nema stresa. Korištena su četiri različita modela strojnog učenja: SVM, kNN, logistička regresija i jednostavna neuronska mreža (slika 16.).

Podatci su se sastojali od 1099 primera, od kojih je 549 primjera bilo označeno kao „0“ – nema stresa, a 550 primjera bilo je označeno kao „1“ – stres. Skup podataka je balansiran, što osigurava da model bude realističniji i primjenjiviji u stvarnom svijetu te omogućava postizanje točnih i pouzdanih klasifikacija te u izgradnji primjenjivih modela strojnog učenja.



Slika 16. Prikaz skupa za učenje

Korišteni modeli strojnog učenja

SVM (engl. Support Vector Machine) je bio jedan od modela korištenih u ovom radu. SVM je algoritam za nadzirano učenje koje se koristi za klasifikaciju i regresiju. U radu, SVM je primijenjen na skup podataka kako bi se stvorio model za klasifikaciju. SVM koristi granice odluke za odvajanje različitih klasa i pronalazi hiper-ravnine koje najbolje dijele podatke.

Drugi model koji je korišten je bio kNN (engl. k-Nearest Neighbors). kNN je algoritam za nadzirano učenje koji se koristi za klasifikaciju. kNN klasificira primjer na temelju k najbližih primjera u trening skupu podataka. U diplomskom radu, kNN je primijenjan na skup podataka kako bi se stvorio model za klasifikaciju.

Logistička regresija je još jedan model koji je korišten u analizi skupa podataka. Logistička regresija je algoritam za klasifikaciju koji koristi sigmoidnu funkciju kako bi se predvidio vjerojatnosti za svaku klasu. U diplomskom radu, logistička regresija je primijenjena na naš skup podataka kako bi se stvorio model za klasifikaciju.

Konačno, korištena je i jednostavna neuronska mreža. Neuronske mreže su matematički model koji se sastoji od slojeva neurona povezanih međusobno. U ovom radu, neuronska mreža sa 100 skrivenih slojeva i ReLu aktivacijskom funkcijom primijenjena na skup podataka kako bi se stvorio model za klasifikaciju. Neuronska mreža ima mogućnost učenja i prilagodbe na skup podataka, što ju čini moćnim alatom za klasifikaciju.

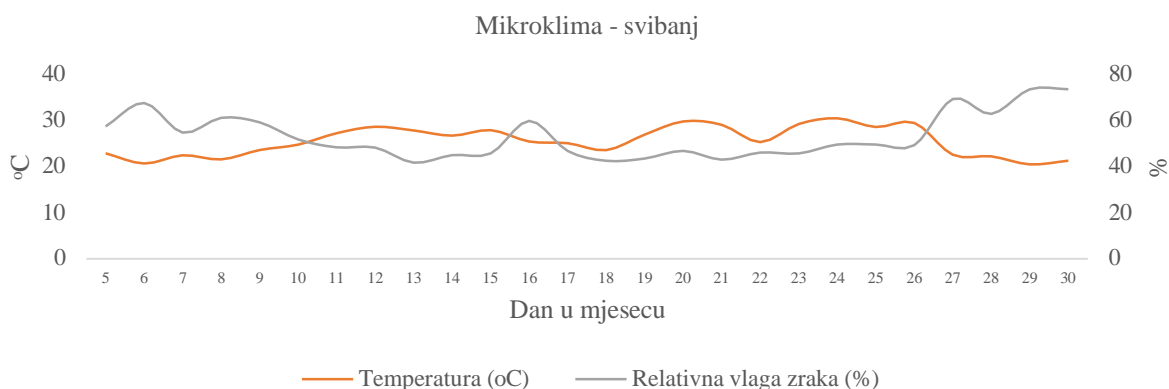
Statističke analize

Za testiranje razlika u prinosu zrna te komponentama prinosa zrna korišteni su analiza varijance (ANOVA) i Fisherov LSD test u programu Statistica 12.0 software (StatSoft Inc., 2013.).

4. REZULTATI

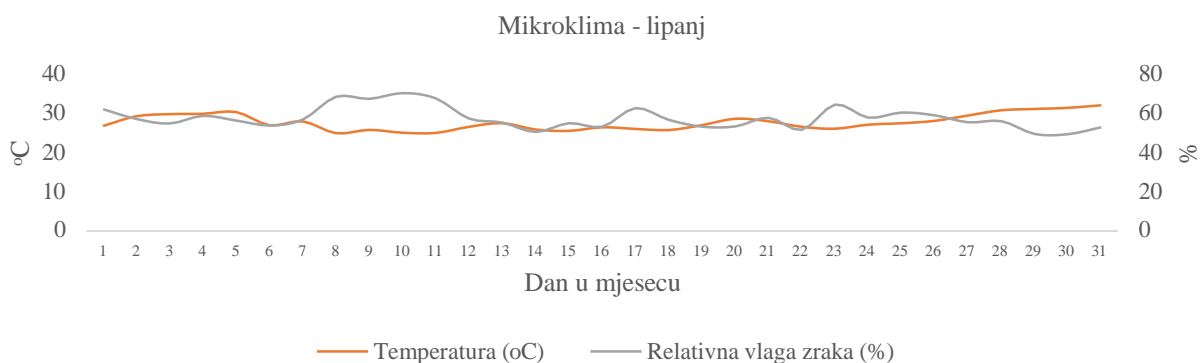
4.1. Mikroklimatski uvjeti

Mikroklimatski uvjeti tijekom mjeseca svibnja su prikazani grafikonom 1. Tijekom mjeseca svibnja je srednja dnevna temperatura zraka bila u rasponu od 20,6 do 29,7 °C. Relativna vlaga zraka je bila u rasponu od 41,7 do 73,4 %.



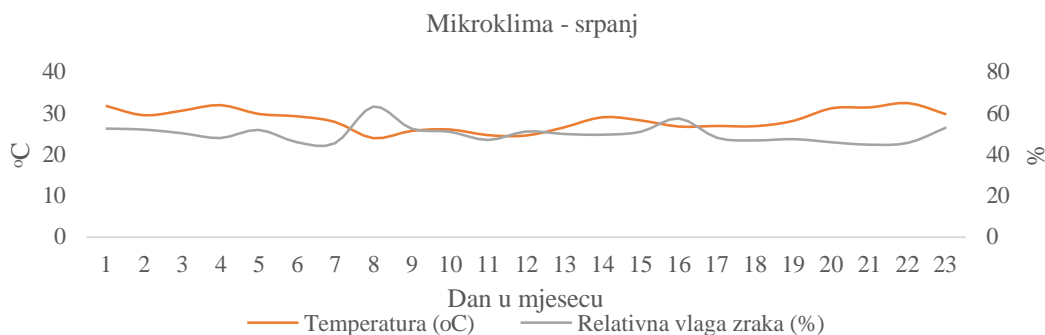
Grafikon 1. Dnevne vrijednosti temperature (°C) i relativne vlage (%) zraka tijekom mjeseca svibnja

Mikroklimatski uvjeti tijekom mjeseca lipnja su prikazani grafikonom 2. Tijekom mjeseca lipnja je srednja dnevna temperatura zraka bila u rasponu od 24,8 do 31,9 °C. Relativna vlaga zraka je bila u rasponu od 53,2 do 64,4 %.



Grafikon 2. Dnevne vrijednosti temperature (°C) i relativne vlage (%) zraka tijekom mjeseca lipnja

Tijekom mjeseca srpnja su srednje dnevne temperature zraka bile u rasponu od 24,8 °C do 31,9 °C. Relativna vlaga zraka u spomenutom mjesecu je bila u rasponu od 45 do 63,7 % (grafikon 3.).



Grafikon 3. Dnevne vrijednosti temperature (°C) i relativne vlage (%) zraka tijekom mjeseca srpnja

4.2. Rezultati hidropedoloških analiza tla

Tlo je klasificirano kao antropogenizirano hidromeliorirani hipoglej, praškasto glinaste ilovača. Osnovna fizikalna obilježja tla kao i rezultati hidropedoloških i kemijskih analiza tla korištenog u pokusu s posudama su prikazana u tablici 4.

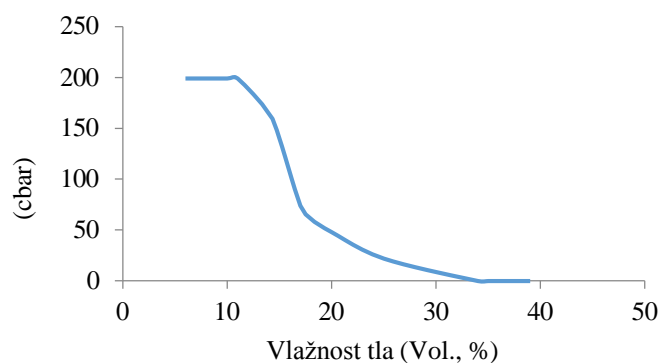
Volumna gustoća (ρ_v) je 1,5 g cm⁻³ te ne pokazuje veliku zbijenost horizonata (>2 g cm⁻³). Gustoća čvrste faze (ρ_s) je unutar granica kao i kod većine (2,58 g cm⁻³). Poroznost tla na uzorkovanoj dubini je 41,82 % vol. Tlo je srednjeg retencijskog kapaciteta za vodu ($K_v = 36,57$ % vol., Škorić, 1982.). Vrijednost kapaciteta tla za zrak (K_z) je 5,2 % vol. Na osnovu određenog indeksa plastičnosti (IP) plastičnosti tla, određeno je da je tlo vrlo plastično. Trenutačna vlaga tla (Tr_v) je 34,56 % vol., a prema analizi stabilnosti mikrostrukturnih agregata (S_s), utvrđeno je da su mikrostrukturni agregati stabilni, dok su makroagregati nestabilni.

Tablica 4. Rezultati fizikalne i kemijske analize tla korištenog u pokusu s posudama

Dubina (cm)	Mehanički sastav (mm)			Stabilnost agregata		Kapacitet tla za vodu (vol. %)	
	2-0,05	0,05- 0,002	<0,002	makro	mikro		
0-32	2,75	64,70	32,55	Nestabilan	Vrlo stabilan	36,61	Osrednji
Granice plastičnosti				IP		Ss	
WL		WP					
0-32	39,40		20,28	19,12		86,2	
Fizikalna svojstva	Volumen pora (%)	Apsolutni kapacitet tla (vol. %)		Specifična gustoća tla (g cm⁻³)			
		Za vodu	Za zrak	Volumna		Čvrste faze	
0-32	41,82	36,57	5,25	1,50		2,58	
Kemijska svojstva	pH		Humus (%)	Dušik (%)	Sadržaj fiziološki aktivnog mg/100 g tla		
	H₂O	KCl			P₂O₅	K₂O	
0-40	7,5	6,8	1,56	0,13	14,38	27,16	

WL = donja granica plastičnosti; WP = gornja granica plastičnosti; IP = indeks plastičnosti; Ss = stabilnost mikoragregata

Retencija vlage u tlu kod 0,33 kPa (Rkv) je u rasponu od 39,52 % vol. do 40,88 % vol., kod 6,25 kPa (Lkv) od 24,3 % vol. do 25,2 % vol. te kod 15 kPa (Tv) od 23,65 % vol. do 24,52 % vol. Krivulja umjeravanja Watermark senzora je prikazana grafikonom 4. Prema prikazanim vrijednostima sadržaj vode u tlu kod vrijednosti 100 % Rkv (n1) je u rasponu vrijednosti od 10 do 40 cbar, a kod vrijednosti 50 % Rkv (N2) je u rasponu vrijednosti od 80 do 100 cbar.

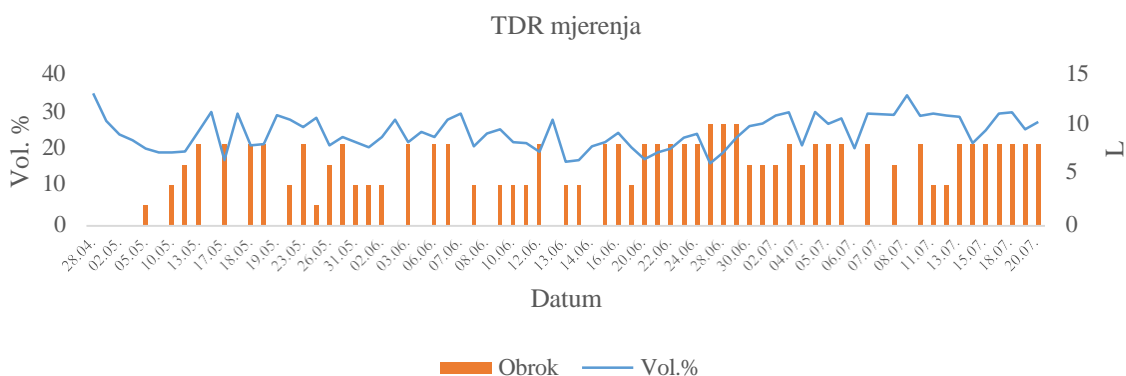


Grafikon 4. Krivulja umjeravanja

4.3. Dinamika vlažnosti tla

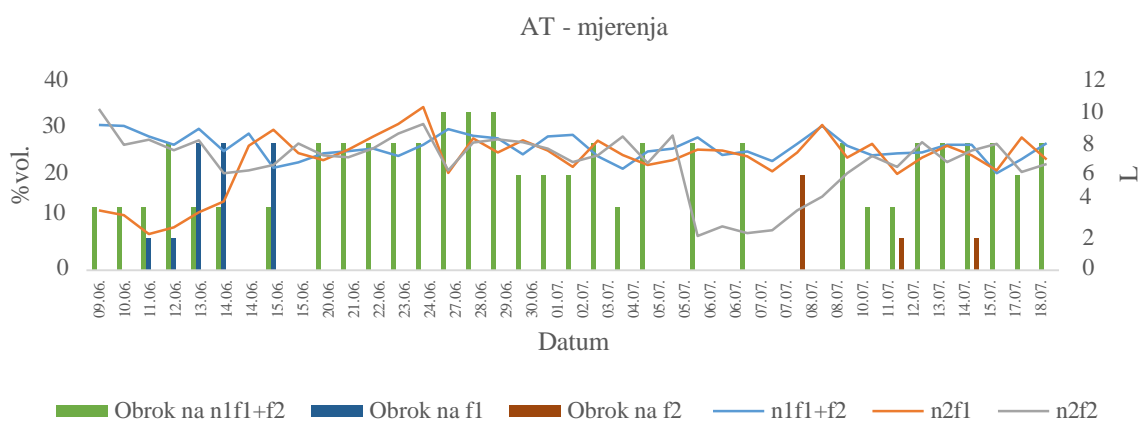
Obrok navodnjavanja je prilagođen stanju vlažnosti tla, odnosno kako bi sadržaj vode u tlu bio održavan na željenoj razini. Tijekom mjeseca svibnja je na svim tretmanima obrok navodnjavanja bio u rasponu od 2 L do 8 L. Norma navodnjavanja je bila prilično ujednačena, $n1f1+f2 = 76$ L, $n2f1 = 68$ L, $n2f2 = 68$ L. Tijekom mjeseca lipnja je tlo zasušeno na $n2f1$ tretmanu pa je norma navodnjavanja bila kako slijedi: $n1f1+f2 = 154$ L, $n2f1 = 126$ L, $n2f2 = 154$ L. Zasušivanje na $n2f1$ tretmanu je bilo u razdoblju od 7. do 10. lipnja, pri čemu je na spomenutom tretmanu izostavljen obrok navodnjavanja. Obrok navodnjavanja je tijekom mjeseca lipnja bio u rasponu od 0 L do 10 L. Zasušivanje na $n2f2$ tretmanu tijekom mjeseca srpnja je bilo u razdoblju od 5. do 8. srpnja. Obrok navodnjavanja je bio u rasponu od 0 do 8 L, a norma navodnjavanja 128 L ($n1f1+f2$), 120 L ($n2f1$) i 98 L ($n2f2$).

Na kontrolnom tretmanu na kojem je sadržaj vode u tlu održavan na razini 100 % Rkv, sadržaj vode u tlu je dodatno praćen TDR300 senzorom (grafikon 5). Vrijednosti su bile u rasponu od 19,36 % vol. do 34,8 % vol., dok je prosječan sadržaj vode u tlu bio 24,6 % vol.



Grafikon 5. Vrijednosti vlažnosti tla (% vol.) mjerene TDR300 senzorom

Rezultati mjerenja AT senzorom su prikazani grafikonom 6. U prosjeku su tijekom mjeseca lipnja i srpnja vrijednosti vlažnosti tla bile ujednačene na svim tretmanima, $n1f1+f2 = 25,97$ % vol., $n2f1 = 23,13$ % vol., $n2f2 = 22,83$ % vol.



Grafikon 6. Vrijednosti vlažnosti tla (%vol.) mjerene AT senzorom (n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv), n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv).

Tijekom mjeseca lipnja je sadržaj vode u tlu mjeren 18 puta (tablica 5.). Sadržaj vode je u prosjeku bio u rasponu od 21,69 % vol. na n2f1 tretmanu do 26,64 % vol. na n1f1+f2 tretmanu. Najmanji sadržaj vode je izmjeren na n2f1 tretmanu (7,60 %vol.).

Tablica 5. Prosječne vrijednosti vlažnosti tla (%vol.) izmjerene AT senzorom na tretmanima istraživanja

TRETMAN	MJESEC SVIBANJ				
	Broj mjerenja	Prosjek	Minimum	Maksimum	Std. Dev.
Lipanj					
n1f1+f2	18	26,64	21,60	30,60	2,68
n2f1	18	21,69	7,60	34,40	8,26
n2f2	18	25,93	20,40	34,00	3,49
Srpanj					
n1f1+f2	21	25,39	20,4	30,4	2,36
n2f1	21	24,37	20,3	30,6	2,52
n2f2	21	20,16	7,2	28,4	7,04

(n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv, n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv)

Tijekom mjeseca srpnja je sadržaj vode u tlu AT senzorom mjeren 21 put (tablica 5.). Sadržaj vode je bio u rasponu od 20,16 %vol. (n2f2) do 25,69 (n1f1+f2). Najniži sadržaj vode u tlu je izmjeren na n2f2 tretmanu (7,2 %vol.).

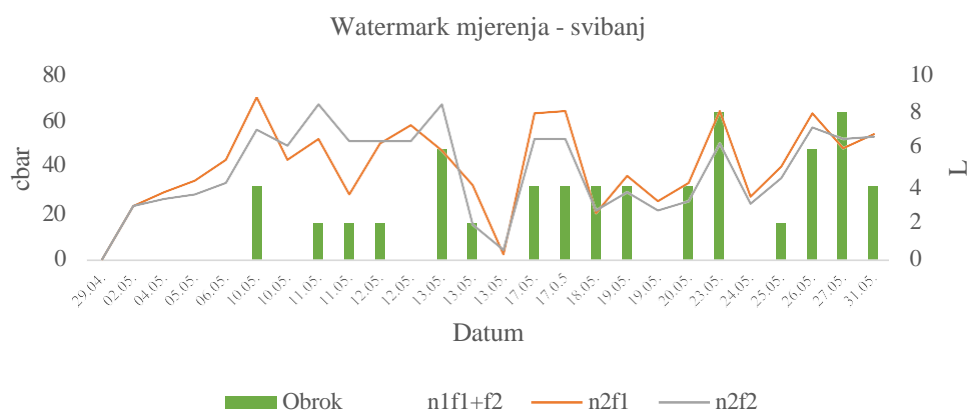
U tablici 6. su prikazane vrijednosti vlažnosti tla izmjerene Watermark senzorom tijekom razdoblja vegetacije. Tijekom mjeseca svibnja je sadržaj vode u tlu izmjeren 26 puta na svim tretmanima istraživanja. U prosjeku je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 38,15 cbar (n2f2) do 40,43 cbar (n2f1). Na svim tretmanima istraživanja je izmjerena jednaka minimalna vrijednost (0 cbar). Tijekom mjeseca lipnja je 31 put mjereno sadržaj vode u tlu. U prosjeku je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 51,84 cbar (n2f2) do 55,29 cbar (n2f1). Minimalne vrijednosti su bile u rasponu od 0 cbar (n2f2) do 2 cbar (n1f1+f2). Najveće maksimalne vrijednosti su izmjerene na n2f1 (116,00 cbar). Tijekom mjeseca srpnja je sadržaj vode u tlu mjereno 22 puta. U prosjeku je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 49,00 cbar (n2f1) do 60,55 (n2f2). Minimalne vrijednosti su bile na n2f1 tretmanu (22 cbar), a maksimalne na n2f2 (102 cbar).

Tablica 6. Prosječne vrijednosti vlažnosti tla (cbar) izmjerene Watermark senzorom na tretmanima istraživanja

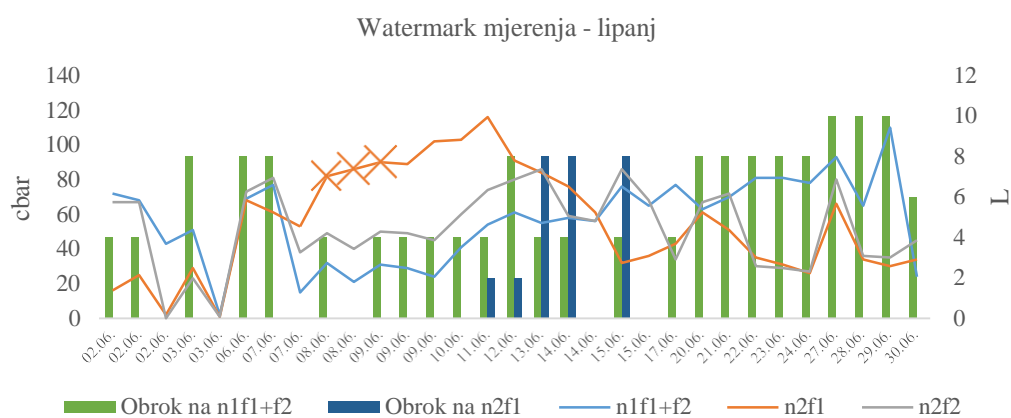
TRETMAN	MJESEC SVIBANJ				
	Broj mjerenja	Prosjek	Minimum	Maksimum	Std. Dev.
	Svibanj				
n1f1+f2	26	38,96	0,00	69,00	19,76
n2f1	26	40,30	0,00	70,00	18,50
n2f2	26	38,15	0,00	67,00	18,55
	Lipanj				
n1f1+f2	31	55,23	2,00	73,00	23,22
n2f1	31	55,29	1,00	116,00	30,81
n2f2	31	51,84	0,00	76,00	23,25
	Srpanj				
n1f1+f2	22	52,23	23,00	74,00	17,02
n2f1	22	49,00	22,00	71,00	14,16
n2f2	22	60,55	22,00	102,00	26,54

(n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv, n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv)

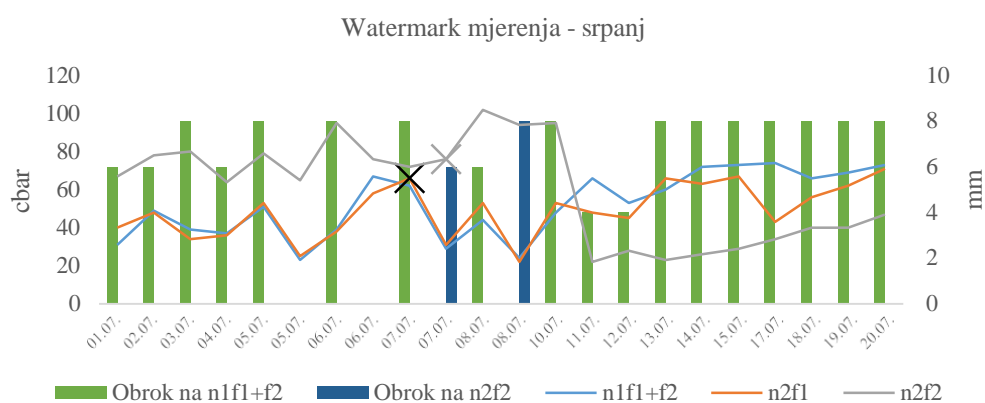
Dinamika vlažnosti tla mjerena Watermark senzorom i obroci navodnjavanja po tretmanima tijekom razdoblja istraživanja su prikazani grafikonom 7.



a) Mjesec svibanj



b) Mjesec lipanj



c) Mjesec srpanj

Grafikon 7. Dinamika vlažnosti tla i obroci navodnjavanja u mjesecu svibnju (a), lipnju (b) i srpnju (c) praćena Watermark senzorom (n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv, n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv)

Obzirom na to da je prvo zasušivanje bilo tijekom faze cvatnje, u mjesecu svibnju su obroci navodnjavanja na svim tretmanima bili jednaki. Obroci navodnjavanja su bili u rasponu od 2 L na početku istraživanja do 8 L na kraju mjeseca svibnja (grafikon 7a). Norma navodnjavanja, odnosno sveukupna količina vode dodana tijekom mjeseca svibnja je bila 68 L. Tijekom mjeseca lipnja i srpnja su obroci navodnjavanja bili u rasponu od 0 do 10 L, ovisno o tretmanu istraživanja i stanju vlažnosti tla. Tijekom mjeseca lipnja na kontrolnom tretmanu (n1f1+f2) te na n2f2 tretmanu je norma navodnjavanja bila 154 L. Obzirom na to da je tijekom mjeseca lipnja inducirana suša na n2f1 tretmanu, norma navodnjavanja je bila manja, odnosno 126 L (grafikon 7b). Tijekom mjeseca srpnja (grafikon 7c) je inducirana suša na n2f2 tretmanu pa je norma navodnjavanja bila 98 L, dok je na tretmanu n1f1+f2 norma navodnjavanja bila 128 L, a na n2f1 tretmanu 120 L.

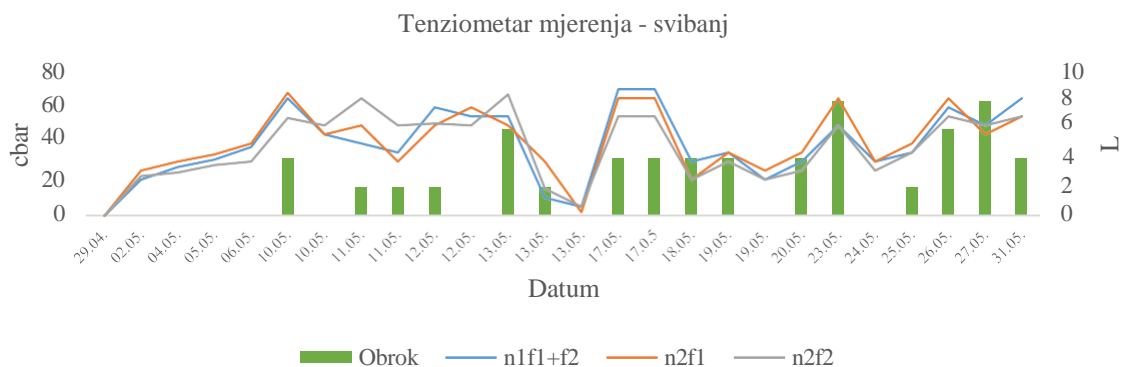
U tablici 7. i grafikonu 8. su prikazani obroci navodnjavanja i vrijednosti vlažnosti tla izmjerene tenziometrom tijekom razdoblja istraživanja. Tijekom mjeseca svibnja je sadržaj vode u tlu izmjeren 26 puta na svim tretmanima istraživanja.

Tablica 7. Prosječne vrijednosti vlažnosti tla (c_{bar}) izmjerene tenziometrom na tretmanima istraživanja

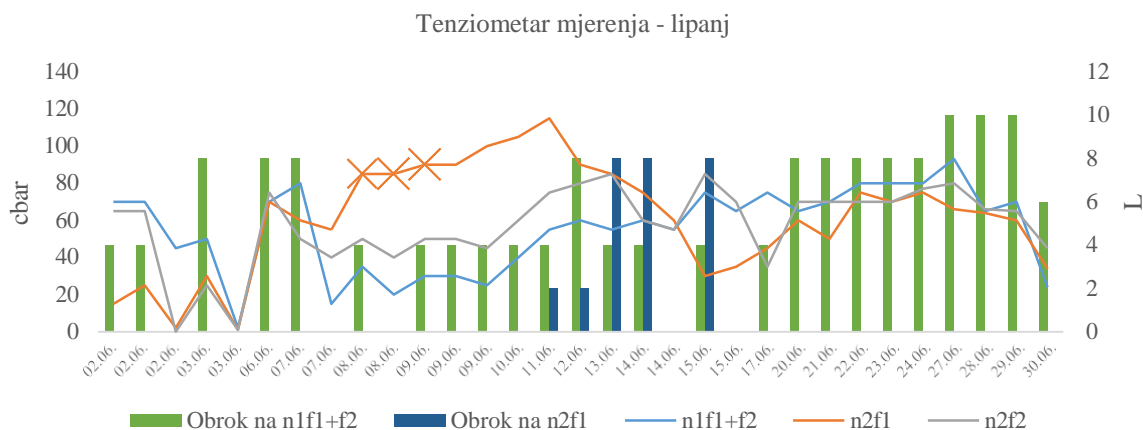
TRETMAN	MJESEC SVIBANJ				
	Broj mjerenja	Prosjek	Minimum	Maksimum	Std. Dev.
	Svibanj				
n1f1+f2	26	39,65	0,00	70,00	19,67
n2f1	26	40,73	0,00	68,00	18,57
n2f2	26	37,92	0,00	67,00	18,55
	Lipanj				
n1f1+f2	31	55,12	2,00	93,00	22,88
n2f1	31	61,35	1,00	115,00	29,23
n2f2	31	57,22	0,00	85,00	21,42
	Srpanj				
n1f1+f2	22	52,50	20,00	75,00	17,02
n2f1	22	49,54	20,00	70,00	14,46
n2f2	22	60,68	20,00	100,00	26,24

(n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv), n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijeivanja zrna, 50 % Rkv)

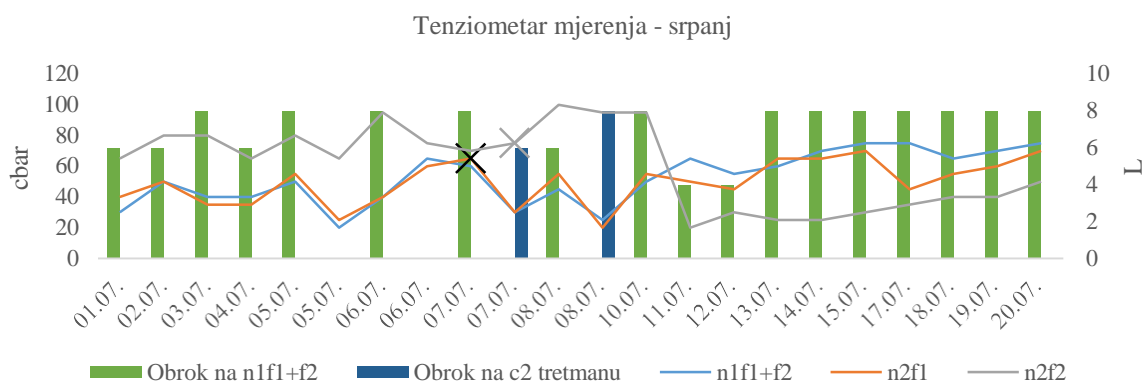
U prosjeku je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 37,92 cbar (n2f2) do 40,73 cbar (n2f1).
Na svim tretmanima istraživanja je izmjerena jednaka minimalna vrijednost (0 cbar).



a) mjesec svibanj



b) mjesec lipanj



c) mjesec srpanj

Grafikon 8. Dinamika vlažnosti tla i obroci navodnjavanja u mjesecu svibnju (a), lipnju (b) i srpnju (c) praćena tenziometrom (n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv), n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv)

Tijekom mjeseca lipnja je 31 put mjereno sadržaj vode u tlu. U prosjeku je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 51,84 cbar (n2f2) do 55,29 cbar (n2f1). Minimalne vrijednosti su bile u rasponu od 0 cbar (n2f2) do 2 cbar (n1f1+f2). Najveće maksimalne vrijednosti su izmjerene na n2f1 (115,00 cbar). Tijekom mjeseca srpnja je sadržaj vode u tlu mjereno 22 puta. U prosjeku je sadržaj vode u tlu bio u rasponu od 49,00 cbar (n2f1) do 60,68 cbar (n2f2). Minimalne vrijednosti su bile na n2f1 tretmanu (22 cbar), a maksimalne na n2f2 tretmanu (100 cbar).

4.4. Temperatura lista

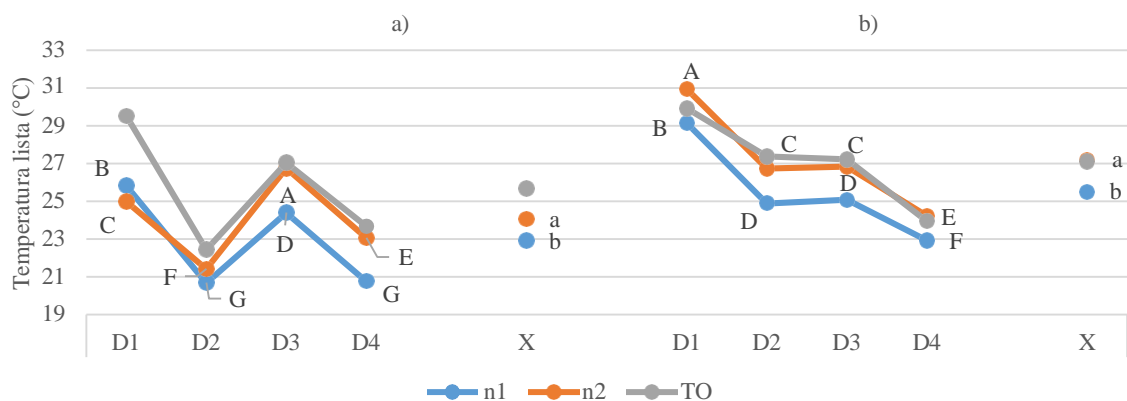
Analiza varijance za vrijednosti temperature lista pokazala je da su tretman (n) i dan mjerenja (d) bili statistički značajni ($P < 0,01$) izvori varijabilnosti u cvatnji i nalijevanju, dok je njihova interakcija (n x d) bila statistički značajna samo u cvatnji (tablica 8.).

Tablica 8. Analiza varijance za temperaturu lista.

IZVOR VARIJABILNOSTI	CVATNJA		NALIJEVANJE	
	df	MS	df	MS
TRETMAN (n)	1	114.69**	1	252.34**
DAN MJERENJA (d)	3	494.79**	4	652.72**
INTERAKCIJA (n x d)	3	51.65**	4	1.51 ^{NS}
POGREŠKA	352	0.39	440	0.78

** - značajno na razini $P < 0,01$; ^{NS} – nije značajno na razini $P < 0,01$; df - stupnjevi slobode, MS – sredina kvadrata

Temperatura lista je pratila oscilacije temperature okoline, pri čemu je temperatura lista biljaka u kontrolnom tretmanu (n1) bila niža od temperature lista biljaka u tretmanu zasušivanja (n2) počevši od drugog dana zasušivanja u cvatnji (grafikon 9a), te već od prvog dana zasušivanja u nalijevanju (grafikon 9b).



Grafikon 9. Temperatura lista mjerena tijekom četiri dana (D1 – D4) i aritmetičke sredine temperature lista (X) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) na biljkama u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2) te temperatura okolinskog zraka (TO) po danima (D1 – D4) i aritmetička sredina temperature okolinskog zraka (X). Vrijednosti označene različitim slovima abecede za mjerenja po danima (velika slova) i za aritmetičku sredinu po tretmanu (mala slova) statistički su značajno različite kod $P < 0,01$.

Aritmetička sredina tretmana za svojstvo temperatura lista bila je statistički značajno ($P > 0,01$) viša u tretmanu zasušivanja (n2) od temperature lista u kontrolnom tretmanu (n1), kako u cvatnji, tako i u nalijevanju. U cvatnji su aritmetičke sredine temperature lista za oba tretmana (grafikon 9a) bile niže od prosjeka temperature okolinskog zraka u vrijeme mjerenja, dok je u nalijevanju aritmetička sredina (grafikon 9b) temperature lista biljaka u tretmanu zasušivanja (n2) bila jednaka, a aritmetička sredina temperature lista biljaka u kontrolnom tretmanu (n1) niža od prosjeka temperatura okolinskog zraka u vrijeme mjerenja.

4.5. Relativni sadržaj klorofila

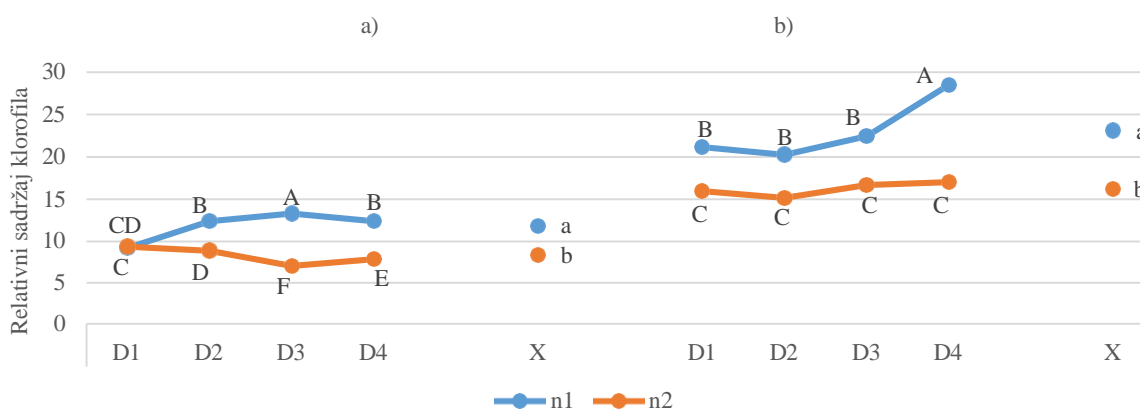
Analiza varijance za vrijednosti relativnog sadržaja klorofila u listu pokazala je da su tretman (n), dan mjerenja (d) i njihova interakcija (n x d) bili statistički značajni ($P < 0,01$) izvori varijabilnosti u cvatnji i nalijevanju (tablica 9.).

Tablica 9. Analiza varijance za relativni sadržaj klorofila u listu

IZVOR VARIJABILNOSTI	CVATNJA		NALIJEVANJE	
	df	MS	df	MS
TRETMAN (n)	1	1090,46**	1	4286,97**
DAN MJERENJA (d)	3	27,636**	3	438,82**
INTERAKCIJA (n x d)	3	161,686**	3	212,47**
POGREŠKA	352	1,436	352	20,28

** - značajno na razini $P < 0,01$; df - stupnjevi slobode, MS – sredina kvadrata

Aritmetičke sredine tretmana za svojstvo relativni sadržaj klorofila u listu bile su veće za oba tretmana u nalijevanju nego u cvatnji. U cvatnji (grafikon 10a), relativni sadržaj klorofila u listu biljaka se u kontrolnom tretmanu (n1) kretao od 9,26 (D1) do 13,33 (D3), a u tretmanu zasušivanja (n2) od 7,16 (D3) do 9,45 (D1). Aritmetička sredina relativnog sadržaja klorofila u listu je u n1 bila statistički značajno ($P < 0,01$) veća nego u n2. U nalijevanju (grafikon 10b), vrijednosti relativnog sadržaja klorofila u listu su se u n1 kretale od 20,29 (D2) do 28,52 (D4), a u n2 od 15,16 (D2) do 17,02 (D4). I u nalijevanju je aritmetička sredina relativnog sadržaja klorofila u listu bila statistički značajno veća u n1.



Grafikon 10. Relativni sadržaj klorofila (SPAD) mjereno tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine sadržaja klorofila (X) u cvatnji i nalijevanju za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2). Vrijednosti označene različitim slovima abecede za mjerenja po danima (velika slova) i za aritmetičku sredinu po tretmanu (mala slova) statistički su značajno različite kod $P < 0,01$.

U nalijevanju su se razlike između tretmana u relativnom sadržaju klorofila u listu povećavale s danima mjerenja (grafikon 10b), dok su u cvatnji najveće bile trećeg dana mjerenja (grafikon 10a).

4.6. Parametri fluorescencije klorofila a

4.6.1. Maksimalni kvantni prinos fotosustava II (TR₀/ABS)

Analiza varijance za vrijednosti maksimalnog kvantnog prinosa fotosustava II (TR₀/ABS) pokazala je da su tretman (n), dan mjerenja (d) i njihova interakcija (n x d) bili statistički značajni (P < 0,01) izvori varijabilnosti u nalijevanju, dok n i n x d nisu bili značajni u cvatnji (tablica 10.).

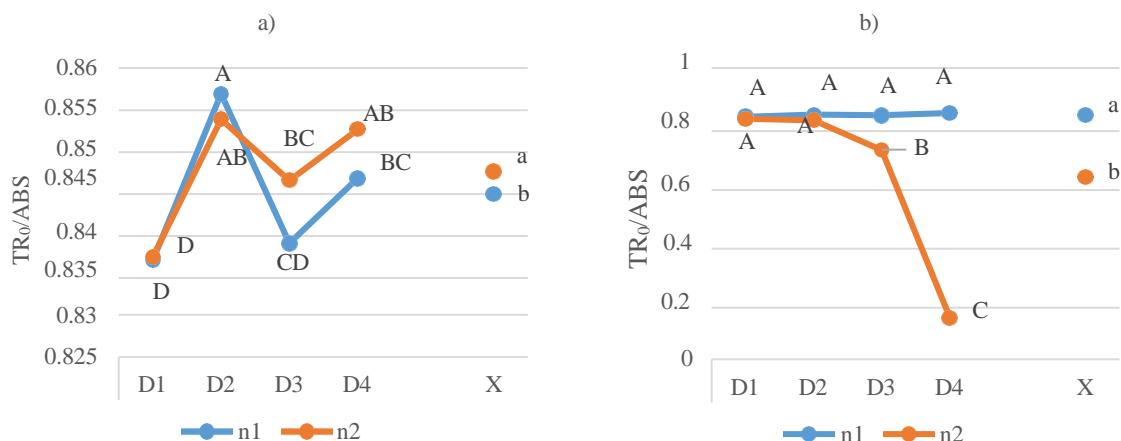
Tablica 10. Analiza varijance za maksimalni kvantni prinos fotosustava II (TR₀/ABS)

IZVOR VARIJABILNOSTI	CVATNJA		NALIJEVANJE	
	df	MS	df	MS
TRETMAN (n)	1	0.0002 ^{NS}	1	1.33**
DAN MJERENJA (d)	3	0.0019**	3	0.76**
INTERAKCIJA (n x d)	3	0.0002 ^{NS}	3	0.81**
POGREŠKA	112	6.66E-05	112	0.001

** - značajno na razini P < 0,01; ^{NS} – nije značajno na razini P < 0,01; df - stupnjevi slobode, MS – sredina kvadrata

Iako razlike između n1 i n2 TR₀/ABS vrijednosti po danima u cvatnji nisu bile statistički značajne, aritmetička sredina n2 tretmana bila je statistički značajna (P < 0,01) viša od aritmetičke sredina n1 tretmana (grafikon 11a). Također, utvrđene su i razlike TR₀/ABS vrijednosti između pojedinih dana mjerenja unutar tretmana (grafikon 11a). Tako je zabilježena statistički značajna razlika između prvog dana mjerenja za oba tretmana (n1D1 i n2D1) i ostalih dana, uz izuzetak n1D3 (grafikon 11a).

Aritmetička sredine n2 tretmana za svojstvo TR₀/ABS bila je i u nalijevanju statistički značajno (P < 0,01) viša od aritmetička sredine n1 tretmana (grafikon 11b). Za kontrolni tretman (n1), vrijednosti po danima nisu bile statistički međusobno značajno različite, a u tretmanu zasušivanja do statistički značajnog (P < 0,01) pada došlo je trećeg dana zasušivanja (n2D3, grafikon 11b).



Grafikon 11. Maksimalni kvantni prinos fotosustava II (TR_0/ABS) mjereno tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine TR_0/ABS (X) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2). Vrijednosti označene različitim slovima abecede za mjerenja po danima (velika slova) i za aritmetičku sredinu po tretmanu (mala slova) statistički su značajno različite kod $P < 0,01$.

4.6.2. Gustoća aktivnih reakcijskih središta (RC/CS_0)

Analiza varijance za vrijednosti gustoće aktivnih reakcijskih središta (RC/CS_0) pokazala je da su tretman (n) i dan mjerenja (d) bili statistički značajni ($P < 0,01$) izvori varijabilnosti u cvatnji i nalijevanju, dok je njihova interakcija (n x d) bila statistički značajna samo u nalijevanju (tablica 11.).

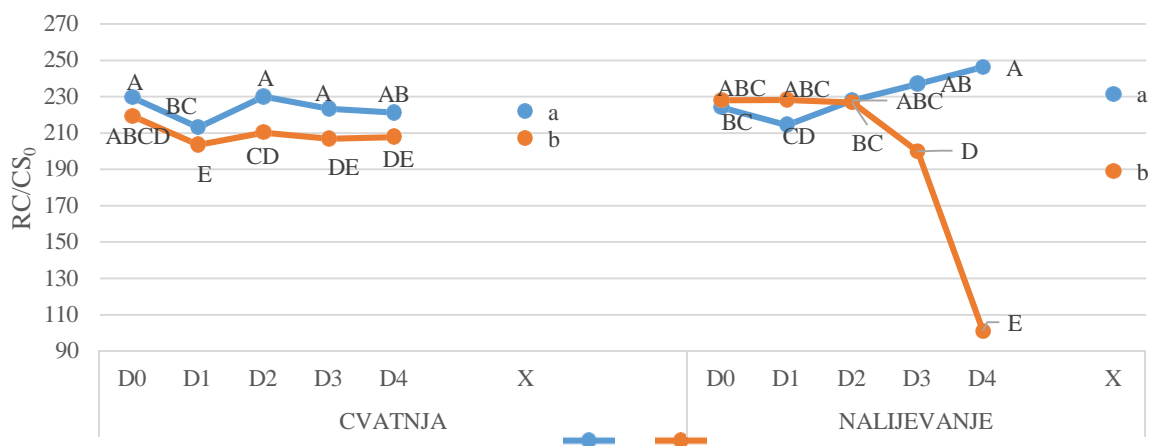
Tablica 11. Analiza varijance za gustoću aktivnih reakcijskih središta RC/CS_0

IZVOR VARIJABILNOSTI	CVATNJA		NALIJEVANJE	
	df	MS	df	MS
TRETMAN (n)	1	6642,24**	1	54058**
DAN MJERENJA (d)	3	698,67**	3	18271,44**
INTERAKCIJA (n x d)	3	137,77 ^{NS}	3	38658,87**
POGREŠKA	112	173,37	112	406,57

** - značajno na razini $P < 0,01$; ^{ns} – nije značajno na razini $P < 0,01$; df - stupnjevi slobode, MS – sredina kvadrata

Aritmetička sredina n2 tretmana za svojstvo RC/CS_0 bila je statistički značajno ($P < 0,01$) viša od aritmetičke sredine n1 tretmana u cvatnji (grafikon 12a), dok je u nalijevanju situacija bila obrnuta (grafikon 12b). U cvatnji su vrijednosti po danima bile veće u n1 nego u

n2, a u nalijevanju trend vrijednosti nije bio tako ujednačen. Prva dva dana (D1-D2) n2 vrijednosti su bile jednake ili nešto veće od n1, a nakon drugog dana je uslijedio drastičan pad (grafikon 12.).



Grafikon 12. Gustoća aktivnih reakcijskih središta (RC/CS₀) mjerena tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine RC/CS₀ (X) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2). Vrijednosti označene različitim slovima abecede za mjerenja po danima (velika slova) i za aritmetičku sredinu po tretmanu (mala slova) statistički su značajno različite kod P < 0,01.

4.6.3. Indeks fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS})

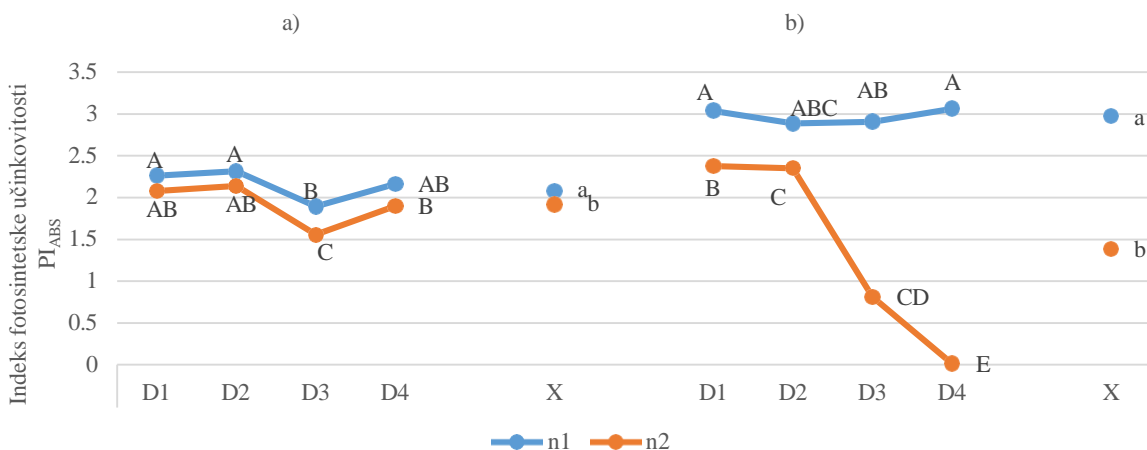
Analiza varijance za vrijednosti indeksa fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS}) pokazala je da su tretman (n) i dan mjerenja (d) bili statistički značajni (P < 0,01) izvori varijabilnosti u cvatnji i nalijevanju, dok je njihova interakcija (n x d) bila statistički značajna samo u nalijevanju (tablica 12.).

Tablica 12. Analiza varijance za indeks fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS})

IZVOR VARIJABILNOSTI	CVATNJA		NALIJEVANJE	
	df	MS	df	MS
TRETMAN (n)	1	1.72**	1	75.24**
DAN MJERENJA (d)	3	1.51**	3	9.844**
INTERAKCIJA (n x d)	3	0.04 ^{NS}	3	10.884**
POGREŠKA	112	0.09	112	0.334

** - značajno na razini P < 0,01; ^{ns} – nije značajno na razini P < 0,01; df - stupnjevi slobode, MS – sredina kvadrata

Aritmetičke sredine n_1 tretmana za svojstvo PI_{ABS} bile su statistički značajno ($P < 0,01$) više od aritmetičkih sredina n_2 tretmana u cvatnji i nalijevanju (grafikon 13.). Uz izuzetak trećeg dana mjerenja (D3), u cvatnji su PI_{ABS} vrijednosti tretmana po danima bile na statistički istoj razini (grafikon 13a). U nalijevanju su n_1 vrijednosti za svaki dan mjerenja bile statistički značajno veće nego n_2 vrijednosti, pri čemu se razlika povećava sukcesivno (grafikon 13b).



Grafikon 13. Indeks fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS}) mjeren tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine PI_{ABS} (X) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n_1) i tretmanu zasušivanja (n_2). Vrijednosti označene različitim slovima abecede za mjerenja po danima (velika slova) i za aritmetičku sredinu po tretmanu (mala slova) statistički su značajno različite kod $P < 0,01$.

4.6.4. Indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI (PI_{total})

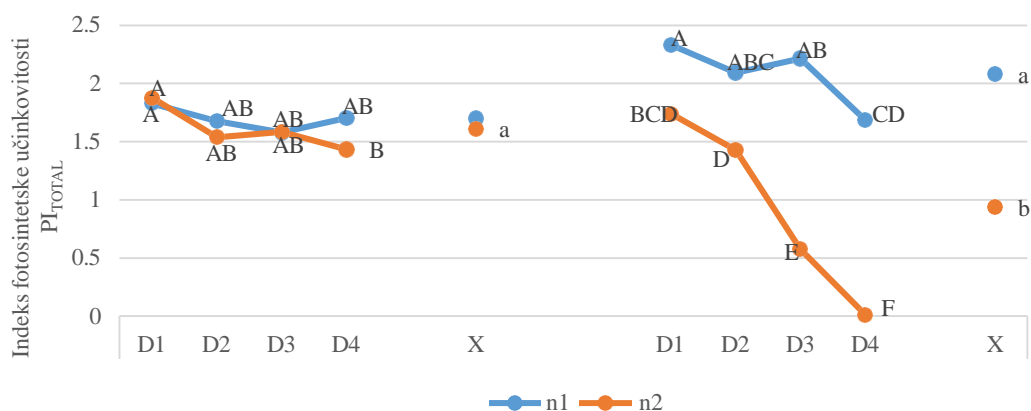
Analiza varijance za vrijednosti indeksa fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI (PI_{TOTAL}) pokazala je da je u cvatnji samo dan mjerenja (d) bio statistički značajan ($P < 0,01$) izvor varijabilnosti, dok su u nalijevanju svi izvori varijabilnosti bili statistički značajni ($P < 0,01$, tablica 13.).

Tablica 13. Analiza varijance za indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI (PI_{TOTAL})

IZVOR VARIJABILNOSTI	CVATNJA		NALIJEVANJE	
	df	MS	df	MS
TRETMAN (n)	1	0.24 ^{NS}	1	39.21**
DAN MJERENJA (d)	3	0.54**	3	7.92**
INTERAKCIJA (n x d)	3	0.16 ^{NS}	3	2.66**
POGREŠKA	112	0.13	112	0.29

** - značajno na razini $P < 0,01$; ^{NS} – nije značajno na razini $P < 0,01$; df - stupnjevi slobode, MS – sredina kvadrata

Iako u cvatnji nisu postojale statistički značajne razlike između n_1 i n_2 po danima, uočena je razlika između n_2 PI_{TOTAL} vrijednosti prvog (D1) i zadnjeg dana (D4) mjerenja uz opadajući trend (grafikon 14a). U nalijevanju su PI_{TOTAL} vrijednosti imale opadajući trend u oba tretmana, a razlike između n_1 i n_2 postojale od prvog dana mjerenja (D1) (grafikon 14b).



Grafikon 14. Indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI (PI_{TOTAL}) mjereno tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine PI_{TOTAL} (X) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n_1) i tretmanu zasušivanja (n_2). Vrijednosti označene različitim slovima abecede za mjerenja po danima (velika slova) i za aritmetičku sredinu po tretmanu (mala slova) statistički su značajno različite kod $P < 0,01$.

4.7. Primjena algoritama strojnog učenja za klasifikaciju vodnog stresa biljke

Nakon primjene sve četiri metode na skup podataka za učenje, uspoređivali smo njihove performanse u klasifikaciji. Izračunali smo točnost, preciznost, osjetljivost i specifičnost za svaki model kako bismo procijenili njihove performanse. U rezultatima prikazanim u Tablici 14. prikazane su performanse četiri različita modela strojnog učenja – kNN, SVM, neuronska mreža i logistička regresija – na skupu podataka koji se sastoji od 770 primjera podijeljenih u dvije klase – prisutan vodni stres i nema vodnog stresa. Performanse modela su evaluirane korištenjem mjera AUC (engl. Area Under Curve), Ca (engl. Classification Accuracy), F1, preciznost (engl. Precision) i osjetljivost (engl. Recall).

Tablica 14. Modeli strojnog učenja

<i>Model</i>	<i>AUC</i>	<i>CA</i>	<i>F1</i>	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>
<i>kNN</i>	0,9998	0,9922	0,9922	0,9923	0,9922
<i>SVM</i>	0,8435	0,6844	0,6618	0,7670	0,6844
<i>Neural Network</i>	0,9882	0,9376	0,9376	0,9381	0,9376
<i>Logistic Regression</i>	0,8730	0,8090	0,8089	0,8092	0,8090

Može se uočiti da su sva četiri modela dala vrlo visoke vrijednosti AUC mjere, što ukazuje na to da su modeli imali dobro odvajanje klasa. Modeli kNN i neuronska mreža su postigli najbolje vrijednosti AUC mjere (0,976 i 0,973), dok su modeli SVM i logistička regresija ostvarili nešto niže vrijednosti (0,869 i 0,867).

U pogledu CA mjere, najbolju vrijednost postigao je model kNN (0,921), dok su ostali modeli ostvarili niže vrijednosti (0,751 za SVM, 0,897 za neuronsku mrežu i 0,812 za logističku regresiju). CA mjerea predstavlja omjer ispravno klasificiranih primjera prema ukupnom broju primjera u skupu podataka.

Kada se radi o F1 mjeri, koja uzima u obzir i preciznost i osjetljivost, najbolju vrijednost je postigao model kNN (0,921), dok su ostali modeli imali nešto niže vrijednosti (0,745 za SVM, 0,897 za neuronsku mrežu i 0,812 za logističku regresiju).

Preciznost i osjetljivost su mjerne vrijednosti koje su iznimno važne kada se radi o klasifikaciji postojanja vodnog stresa i absencije nema stresa. Preciznost nam govori koliki je postotak stresnih primjera ispravno klasificiran, dok nam osjetljivost govori koliki je postotak stresnih primjera identificiran kao stresni. Modeli kNN i neuronska mreža su postigli najbolje

vrijednosti preciznosti (0,926 i 0,899) i osjetljivosti (0,921 za kNN i 0,897 za neuronsku mrežu), dok su modeli SVM i logistička regresija ostvarili nešto niže vrijednosti preciznosti (0,788 za SVM i 0,813 za logističku regresiju) i osjetljivosti (0,751 za SVM i 0,812 za logističku regresiju).

Sveukupno, modeli kNN i neuronska mreža su postigli najbolje performanse u ovom istraživanju, dok su modeli SVM i logistička regresija ostvarili nešto niže vrijednosti. S obzirom na dobivene rezultate, možemo zaključiti da je kNN model najuspješniji u klasifikaciji stresa i da je najpouzdaniji u predviđanju pozitivne klase (stres). Model kNN postigao je visoku vrijednost AUC-a od 0,976. Također, model je postigao visoku vrijednost CA (0,921), što ukazuje na to da je model vrlo precizan u klasifikaciji obje klase.

S druge strane, SVM model i logistička regresija su postigli nižu točnost (CA) i niži F1 rezultat u usporedbi s kNN modelom te nije bila toliko pouzdana u predviđanju stresa kao kNN model.

U konačnici, usporedbom modela i njihovih performansi, model kNN bi se mogao preporučiti kao najbolji za klasifikaciju stresa s obzirom na postignutu točnost i pouzdanost u predviđanju obje klase.

4.7.1. Rezultati na testnom skupu podataka

Na temelju dobivenih rezultata na testnom skupu podataka prikazanih u tablici 15., može se primijetiti da su performanse modela na testnom skupu podataka značajno varirale u odnosu na performanse na skupu podataka za učenje. Model kNN postigao je visoke performanse s AUC vrijednosti od 0,994 i preciznosti od 0,959 na testnom skupu podataka. S druge strane, model SVM postigao je slabije performanse u usporedbi s ostalim modelima, s AUC vrijednošću od 0,821 i preciznošću od 0,794.

Tablica 15. Rezultati na testnom skupu podataka

<i>Model</i>	<i>AUC</i>	<i>CA</i>	<i>F1</i>	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>
<i>kNN</i>	0,9940	0,9574	0,9574	0,9593	0,9574
<i>SVM</i>	0,8210	0,7021	0,6674	0,7940	0,7021
<i>Neutral Network</i>	0,9787	0,8966	0,8959	0,9007	0,8966
<i>Logistic Regression</i>	0,8377	0,8085	0,8081	0,8084	0,8085

5. RASPRAVA

Tijekom razdoblja istraživanja je izazvan vodni stres u najkritičnijim fazama razvoja soje, tj. u fazi cvatnje i nalijevanja zrna. U tretmanu zasušivanja u cvatnji (n2f1), izostavljanjem obroka navodnjavanja tlo je zasušeno 7. lipnja 2022. godine, a 50 % Rkv je postignuto 8. lipnja. Nakon što se tlo zasušilo, održavano je na 50 % Rkv izostavljanjem obroka navodnjavanja ili navodnjavanjem manjim obrokom u odnosu na kontrolni tretman tijekom iduća četiri dana. Tretman zasušivanja je u nalijevanju sjemena (f2) započeo 5. srpnja 2022. godine, a 50 % Rkv je postignuto 6. srpnja. Nakon što se tlo zasušilo, održavano je na 50 % Rkv izostavljanjem obroka navodnjavanja ili manjim obrokom u odnosu na kontrolni tretman tijekom iduća četiri dana.



Slika 17. Faza zasušivanja tretmana (fotografija: Spišić, M., 2022.)

Tijekom zasušivanja tretmana u cvatnji i nalijevanju zrna, preostali tretmani su navodnjavani obrokom navodnjavanja kojim je sadržaj vode u tlu održavan na razini 80 do 100 % Rkv. Senzori za mjerenje vlažnosti tla su zabilježili promjene, odnosno dinamiku vlažnosti tla na svim tretmanima. Najbrža reakcija senzora je zamijećena kod TDR300 i AT senzora koji mjere volumni sadržaj vode u tlu (%vol.). Tenziometar i Watermark su pokazali ujednačenije rezultate mjerenja u uvjetima povoljne vlažnosti, odnosno na n1 tretmanu. Yadav i sur. (2016.) navode bržu i ujednačeniju reakciju te manja odstupanja senzora koji rade na principu elektrometrije i reflektometrije. Kod tenziometra je zamijećena sporija reakcija na tretmanima koji su bili zasušeni, odnosno kod manjeg sadržaja vode u tlu. U usporedbi s metodom elektrometrije, tenziometri su pokazali sporiju reakciju na izmjene vlažnosti tla. Slično navodi Hanson i sur. (2000.). Autori su testirali učinkovitost različitih tipova senzora, gipsanih

blokova, Watermark senzora te tenziometra. U zaključku navode slične rezultate mjerenja kod Watermark senzora i tenziometra, te sporiju reakciju tenziometra u uvjetima suše. Za što točniju interpretaciju dobivenih mjerenja, važno je umjeriti senzor za tlo na kojem se koristi (Dong i sur., 2020., Silva i sur., 2022.), te pravilno postaviti senzor (vodoravno ili okomito) u tlo (Sharma i sur., 2021.). TDR300 i AT senzori koji su korišteni u ovom istraživanju ne zahtijevaju umjeravanje, ali su kod tih tipova senzora veća početna ulaganja što se može smatrati negativnom stranom. Također je važno istaknuti kako se senzori umjeravaju u kontroliranim laboratorijskim uvjetima što treba imati u vidu kod upotrebe senzora u poljskim uvjetima.

Na temperaturu lista utječu različiti okolinski čimbenici, ali prvenstveno temperatura okoline i sadržaj vode u tlu (Von Berkum, 2008.), što se jasno vidi i po tome da su oscilacije temperature lista u oba tretmana u našem istraživanju pratile oscilacije temperature okoline (grafikon 9). Zabilježeni porast temperature lista u uvjetima stresa suše u obje faze razvoja (grafikon 9), očekivan je jer nedostatak vode negativno utječe na transpiraciju i mogućnost hlađenja lista (Falkenberg i sur., 2007). Naime, biljke troše energiju kako bi molekule vode iz tekućeg oblika pretvorile paru i na taj način oslobađaju toplinu (Jones i sur., 2009.). Porast temperature lisne mase u sušnim uvjetima utvrdili su ranije Ma i sur. (2022.) na soji, Bheemanahalli i sur. (2022.) na kukuruzu i Anwar i sur. (2022.) na pamuku (*Gossypium hirsutum* L.). Iako su temperature lista zasušenih biljaka (n2) bile više od biljaka u kontrolnom tretmanu (n1), one u cvatnji nisu prelazile temperature okoline u vrijeme mjerenja (TO), dok su u nalijevanju bile više samo prvog dana mjerenja (D1). Prema Anwar i sur. (2022.) razlika između temperature lista i okoline u stresnim uvjetima može poslužiti kao selekcijski kriterij pri odabiru tolerantnijih genotipova, a negativne vrijednosti razlike nam govore da biljke ipak uspijevaju održati transpiraciju.

Negativan utjecaj suše na sadržaj klorofila u listu zabilježen u ovom istraživanju (grafikon 10), utvrđen je i u brojnim ranijim istraživanjima (Makbul i sur., 2011., Chowdhury i sur. 2017., Dong i sur. 2019., Iqbal i sur., 2019.). Smanjenje sadržaja klorofila u listu zasušenih biljaka posljedica je zatvaranja puči. Zatvaranje puči uslijed stresa suše, kako bi se umanjio gubitak vode iz biljke, onemogućava usvajanje ugljičnog dioksida nužnog za odvijanje fotosinteze što rezultira oksidativnim stresom i oštećenjem strukture kloroplasta, odnosno smanjenjem sadržaja klorofila (Kaiser i sur., 1981., Biareh i sur. 2022.). Posljedica navedenih procesa je smanjena fotosintetsku učinkovitost cijele biljke.

Maksimalni kvantni prinos fotosustava II (TR₀/ABS) kvantificira odnos svjetlosti apsorbirane od strane klorofila u fotosustavu II i svjetlosti koja je iskorištene u fotokemijskim

procesima (Strasser i sur., 2000.). TR_0/ABS je jedan od najčešće korištenih parametara fluorescencije klorofila a za utvrđivanje utjecaja okolišnih stresora na fotosintetsku aktivnost, odnosno za procjenu zdravstvenog stanja biljaka pod utjecajem stresa (Kalaji i sur., 2016.). Ipak brojna istraživanja pokazuju da je ovaj parametar nije osjetljiv na promjene u statusu puči i smanjenje relativnog sadržaja vode u listu, odnosno da nije dobar odabir za praćenje ranih simptoma utjecaja stresa izazvanog sušom (Oukarroum i sur., 2007., Razavi i sur., 2008., Woolery i sur., 2010., Markulj Kulundžić i sur., 2022.), što objašnjava činjenicu da je do statistički značajnih razlika između n_1 i n_2 došlo tek trećeg dana zasušivanja u nalijevanju (grafikon 3b). Iako PSII ima veliku otpornost na manjak vode (Lauriano i sur., 2006.), uzrok statistički značajnog pada TR_0/ABS u nalijevanju mogu biti i značajno više temperature okolinskog zraka u nalijevanju u odnosu na cvatnju (grafikon 11). Negativan utjecaj visokih temperatura zraka na fotosintezu, posebice u kombinaciji sa stresom suše dobro je poznat (Djanaguiraman i sur., 2011., Zhou i sur., 2017., Sehgal i sur., 2018., Sita i sur., 2018., Carrera i sur., 2021., Ergo i sur., 2021.). Relativna vrijednost parametra TR_0/ABS se za većinu biljnih vrsta u optimalnim uvjetima kreće oko 0,83 (Björkman i Demmig-Adams, 1995.), ali Bolhar-Nordenkamp i sur. (1989.) smatraju da je fotosintetski aparat biljaka učinkovit pri vrijednostima u rasponu od 0,75 do 0,85 relativnih jedinica. Pad TR_0/ABS vrijednosti ispod donje granice navedenog raspona do kojeg je u ovom istraživanju došlo tek trećeg i četvrtog dana zasušivanja u nalijevanju (grafikon 11b) potvrđuje sposobnost PSII da održava maksimalni kvantni prinos u početnim fazama stresa..

Gustoća aktivnih reakcijskih središta (RC/CS_0) opisuje koncentraciju aktivnih reakcijskih središta fotosustava II po ekscitiranoj površini (Strasser i sur., 2000). Niže vrijednosti RC/CS_0 u tretmanu zasušivanja (n_2) u odnosu na kontrolu (n_1) te smanjenje vrijednosti do kojeg je došlo nakon drugog dana zasušivanja u nalijevanju (grafikon 12) ukazuje na inaktivaciju dijela reakcijskih središta. Smanjenje RC/CS_0 uslijed djelovanja različitih abiotičkih stresora utvrdili su brojni autori, kao npr. Feng i sur. (2014.) na pšenici, Fghire i sur. (2015.) na kvinoji i Markulj Kulundžić i sur. na suncokretu (2021.) i na soji (2022.). Markulj Kulundžić i sur. (2022.) su iz istraživanja u kojem je soja bila podvrgnuta zasušivanju u fazi nalijevanja zrna zaključili da je RC/CS_0 bio u statistički značajnoj, pozitivnoj korelaciji sa sadržajem relativne vlage u listu. Prema tome, očekivano je da će se koncentracija aktivnih reakcijskih središta fotosustava II smanjivati s povećanjem stupnja dehidracije biljnog tkiva.

Indeks fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS}) se smatra najosjetljivijim i najobuhvatnijim parametrom fluorescencije klorofila a u istraživanjima utjecaja stresnih čimbenika na biljke.

PI_{ABS} daje kvantitativne informacije o općem stanju biljke i njenoj vitalnosti (Strasser i sur., 2004., Stirbet i Govindjee, 2011.). Niže vrijednosti PI_{ABS} u tretmanu zasušivanju (n_2) u odnosu na kontrolu (n_1) te značajno smanjenje vrijednosti PI_{ABS} do kojih je došlo trećeg dana zasušivanja u nalijevanju (grafikon 13) ukazuju na postojanje stresa u biljkama soje kao posljedica nedostatka vlage. Niže vrijednosti PI_{ABS} također ukazuju na smanjenje učinkovitosti fotosintetskog lanca prijenosa elektrona što je ujedno i indikator oštećenja strukture i aktivnosti fotosustava II, kao i fotoinhibicije fotosintetskog procesa (Oukarroum i sur., 2007., Oukarroum i sur., 2009., Meng i sur., 2016.). Sličan utjecaj stresa su potvrdili Oukarroum i sur. (2007) na ječmu, Živčák i sur. (2008.) na ozimoj pšenici, Umar i Siddiqui (2018.) na suncokretu te Markulj Kulundžić i sur. (2022.) na soji. Kao i u slučaju parametra RC/CS_0 , i za PI_{ABS} je ranije utvrđena značajna, pozitivna korelacija sa sadržajem relativne vlage u listu (Umar i Siddiqui, 2018., Markulj Kulundžić i sur., 2022.), što znači da se fotosintetska učinkovitost smanjuje s povećanjem stupnja dehidracije biljnog tkiva.

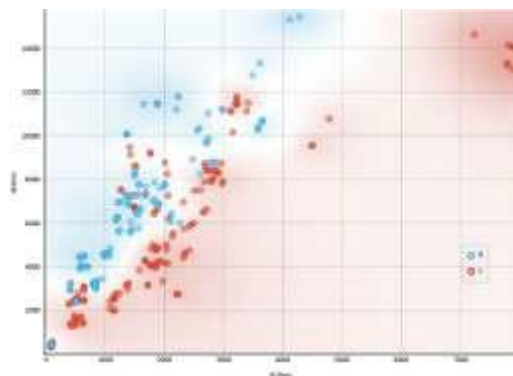
Indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na fotosustavu I (PI_{total}) opisuje prosječnu učinkovitost fotosintetskog aparata (Strasser i sur., 2004.) te se može koristiti za procjenu vitalnosti biljke, odnosno reakcije fotosintetskog aparata na stres (Oukarroum et al., 2007., Tsimilli-Michael i Strasser, 2008.). Abiotički stres najčešće uzrokuje smanjenje PI_{TOTAL} vrijednosti što ukazuje na inhibiciju aktivnosti fotosustava II, te strukturalna oštećenja i/ili oštećenja funkcije fotosustava I (Oukarroum i sur., 2007., Yusuf i sur., 2010., Pavlović i sur., 2019., Mihaljević i sur., 2021.). U istraživanju Matoša Kočar i sur. (2021.), PI_{TOTAL} je odabran kao najosjetljiviji parametar fluorescencije klorofila a u otkrivanju prosječnog učinka suše u pet razvojnih faza soje (V2, R1, R4, R5 i R6). Autori navode i da je parametar dovoljno informativan za isključenje materijala s najlošijim funkcioniranjem fotosintetskog aparata u oplemenjivanju na tolerantnost prema abiotičkom stresu, što povećava učinkovitost selekcijskog procesa kada je potrebno procijeniti veliki broj genotipova. U ovom istraživanju nedostatak razlika između PI_{TOTAL} vrijednosti u cvatnji (grafikon 14a) ukazuje na to da testirane biljke soje u navedenoj fazi razvoja mogu podnijeti nedostatak vlage, dok su u nalijevanju osjetljivije. Naime, u nalijevanju su PI_{TOTAL} vrijednosti zasušenih biljaka od početka bile statistički značajno niže od zalijevanih biljaka (grafikon 6b), a smanjivale su se i po danima trajanja zasušivanja što ukazuje na veću osjetljivost biljaka u odnosu na cvatnju. Značajnoj PI_{TOTAL} razlici između biljaka u n_1 i n_2 u nalijevanju vjerojatno su doprinijele i iznadprosječno visoke temperature koje su bile dodatan stresor. Negativan utjecaj visokih temperatura na funkcioniranje fotosintetskog aparata

različitih biljnih vrsta potvrdili su brojni autori, među kojima su Markulj Kulundžić i sur. (2021.), Mihaljević i sur. (2020.), Killi i sur. (2017.) te Djanagirman i sur. (2011.).

Neuronska mreža i logistička regresija su postigle slične performanse s AUC vrijednostima od 0,979 i 0,838 te preciznostima od 0,901 i 0,808, respektivno. S obzirom na to da su performanse modela na testnom skupu podataka prilično visoke, možemo zaključiti da su modeli koji su korišteni u ovom radu generalizirali dobro i mogu biti primijenjeni na nepoznate uzorke. Potrebno je napomenuti da bi dodatna evaluacija i usporedba modela bila potrebna na većem skupu podataka kako bi se u potpunosti ocijenila uspješnost svakog modela.

U ovom radu, model kNN postigao je najbolje performanse u odnosu na ostale modele na testnom skupu podataka (slika 18.). Razlog tome je što model kNN radi na način da za svaki uzorak u testnom skupu podataka pronalazi k najbližih susjeda iz skupa podataka za učenje i klasificira uzorak prema većinskoj klasi susjeda.

Kod ovog problema klasifikacije vodnog stresa, može se očekivati da će se uzorci koji pripadaju istoj klasi (sa ili bez stresa) biti skupljeni u bliskom prostoru, što odgovara klasterima. Model kNN, kao metoda koja traži k najbližih susjeda, dobro funkcionira u ovom slučaju jer će uzorke klasificirati u skladu s klasterima u prostoru i neće ovisiti o pretpostavkama o raspodjeli podataka. Stoga, u ovom konkretnom slučaju, kNN model je najbolje rješenje u odnosu na druge modele jer je skup podataka balansiran i kNN se pokazao kao model koji dobro radi na balansiranim skupovima podataka. Potrebno je napomenuti da bi performanse modela kNN mogle varirati na drugim skupovima podataka s drugačijom strukturom podataka, te da je potrebna dodatna evaluacija i usporedba na većem skupu podataka kako bi se utvrdila njegova uspješnost na drugim problemima klasifikacije.



Slika 18. Rezultat testnog skupa na najboljim valnim duljinama

6. ZAKLJUČAK

Precizna mjerenja vodnog stresa u tlu i reakcija biljaka na vodni stres su osnova u razumijevanju potrebe biljaka za vodom. Tijekom istraživanja senzori za mjerenje vlažnosti tla su zabilježili promjene, odnosno dinamiku vlažnosti tla na svim tretmanima istraživanja. Najbrža reakcija senzora je zamijećena kod TDR300 i AT senzora, odnosno kod senzora koji mjere volumni sadržaj vode u tlu (vol.%). Tenziometar i Watermark su pokazali ujednačene rezultate mjerenja u uvjetima povoljne vlažnosti, odnosno na n1 tretmanu (kontrola). U usporedbi s metodom elektrometrije, tenziometri su pokazali sporiju reakciju na izmjene vlažnosti tla. Razlike pokazatelja fiziološkog stanja biljaka u optimalnim uvjetima opskrbe vodom i biljaka u uvjetima zasušivanja ukazuju na postojanje stresa. Zasušene biljke reagirale su na nedostatak vode povišenjem temperature lista te sniženjem relativnog sadržaja klorofila u odnosu na biljke u optimalnim uvjetima opskrbe vodom. Nedostatak vode djelovao je i na fotosintetsku učinkovitost na što ukazuju niže vrijednosti testiranih parametara fluorescencije klorofila a (TR_0/ABS , RC/CS_0 , PI_{ABS} , PI_{TOTAL}) kod biljaka u uvjetima zasušivanja u odnosu na biljke u optimalnim uvjetima opskrbe vodom. Veće razlike između tretmana u navedenim parametarima u nalijevanju zrna u odnosu na cvatnju ukazuju na veću osjetljivost soje na nedostatak vlage u nalijevanju. Model najbližeg susjeda (kNN) najučinkovitija je metoda u usporedbi s drugim modelima u rješavanju problema klasifikacije vodnog stresa u smislu identificiranja najbližih susjeda u skupu podataka za učenje. Za detaljnije modele potrebno je više podatkovnih točaka kako bi se dobila bolja izvedba i točnost modela, što će omogućiti bolje razumijevanje i predviđanje vodnog stresa kod biljaka. Dobiveni eksperimentalni rezultati omogućuju nam dobar pregled stanja stresa kod biljaka, što je dobar podatak za daljnja istraživanja i razvoj preciznijih metoda detekcije i kontrole vodnog stresa.

7. LITERATURA

1. Alam, M., Rogers, D.H. (1997.): Tensiometer use in scheduling irrigation. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, Manhattan, Kansas.
2. Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D., Smith, M. (1998.): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy. Berhanu A. F., Beebe, S. E., Kunert K. J., BurrIDGE, J. D., Barlow, K. M., Lynch, J. P., Foyer, C.H. (2014.). Field Phenotyping of Soybean Roots for Drought Stress Tolerance. *Agronomy* 4(3), 418-435.
3. Bheemanahalli, R., Purushothaman, R., Poudel, S., Samiappan, S., Wijewardane, N., Reddy Raja, K. (2022): Effects of drought and heat stresses during reproductive stage on pollen germination, yield, and leaf reflectance properties in maize (*Zea mays* L.). *American Society of Plant Biologists* 6 (8): e434.
4. Biareh, V., Shekari, F., Sayfzadeh, S., Zakerin, H., Hadidi, E., Beltrão, J.G.T., Mastinu, A. (2022.): Physiological and Qualitative Response of *Cucurbita pepo* L. to Salicylic Acid under Controlled Water Stress Conditions. *Horticulturae* 2022, 8: 79.
5. Björkman, O., Demmig-Adams, B. (1995.): Regulation of photosynthetic light energy capture, conversion, and dissipation in leaves of higher plants. U: Schulze, E.D., Caldwell, M.M., (ur.). *Ecophysiology of photosynthesis*. Springer, Berlin, 17-47.
6. Black, C.A. (1965.): *Methods of Soil Analysis: Part I Physical and mineralogical properties*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
7. Bolhar-Nordenkamp, H.R., Long, S.P., Baker, N.R., Öquist, G., Schreiber, U., Lechner, E.G. (1989.): Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrumentation. *Funct. Ecol.*, 3: 497-514.
8. Chaves, M. M., Flexas, J., and Pinheiro, C. (2009.): Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Ann. Bot.* 103: 551–560.
9. Chowdhury, J.A., Karim, M.A., Khaliq, Q.A., Ahmed, A.U. (2017.): Effect of drought stress on bio-chemical change and cell membrane stability of soybean genotypes. *Bangladesh J. Agric. Res.*, 42: 475-485.
10. DeFelice M.S., Carter, P.R., Mitchell, S.B. (2006.): Influence of Tillage on Corn and Soybean Yield in the United States and Canada. *Crop Management Research*, 5(1): 1-17.

11. Djanaguiraman, M., Prasad, P. V. V., Boyle, D. L., Schapaugh, W. T. (2011.): High-Temperature Stress and Soybean Leaves: Leaf Anatomy and Photosynthesis. *Crop Sci.* 51:2125–2131
12. Dong, Y., Miller, S., Kelley, L. (2020.): "Performance Evaluation of Soil Moisture Sensors in Coarse- and Fine-Textured Michigan Agricultural Soils". *Agriculture*, 10(12): 598.
13. Dong, S., Jiang, Y., Dong, Y., Wang, L., Wang, W., Ma, Z., et al. (2019.): A study on soybean responses to drought stress and rehydration. *Saudi J. Biol. Sci.* 26, 2006–2017. doi: 10.1016/J.SJBS.2019.08.005
14. Falkenberg, N.R., Piccinni, G., Cothren, J.T., Leskovar, D.I., Rush, C.M. (2007.): Remote sensing of biotic and abiotic stress for irrigation management of cotton. *Agric Water Manag.*, 87: 23-31.
15. FAO, Food and agricultural organisation (2023): Soybean. Dostupno na: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/soybean/en/> (22. 05. 2023.)
16. Fehr, W.R. and Caviness, C.E. (1977.): Stages of soybean development. Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Iowa Cooperative External Series, Iowa State University, Ames.
17. Feng, B., Liu, P., G. Li, G., Dong, S. T., Wang, F. H., Kong, L. A., Zhang, J. W. (2014.): Effect of Heat Stress on the Photosynthetic Characteristics in Flag Leaves at the GrainFilling Stage of Different Heat-Resistant Winter Wheat Varieties. *J Agro Crop Sci*, 200: 143–155.
18. Feng, L., Raza, M. A., Li, Z., Chen, Y., Khalid, M., Du, J., Liu, W., Wu, X., Song, C., Yu, L., Zhang, Z., Yuan, S., Yang, W., & Yang, F. (2019.): The Influence of Light Intensity and Leaf Movement on Photosynthesis Characteristics and Carbon Balance of Soybean. *Frontiers in plant science*, 9: 1952.
19. Fghire, R., Anaya, F., Ali, O.I., Benlhabib, O., Ragab, R., Wahbi, S. (2016.): Physiological and photosynthetic response of quinoa to drought stress. *Chilean JAR.* 75: 174-183.
20. Hanson, B., Peters, D., Orloff, S. (2000.): Effectiveness of tensiometers and electrical resistance sensors varies with soil conditions. *California Agriculture*, 54(3): 47-50.
21. Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P. (2021.): A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* 32, 1–6.

22. Mihaljević, I., Lepeduš, H., Šimić, D., Viljevac Vuletić, M., Tomaš, V., Vuković, D., Dugalić, K., Teklić, T., Skendrović Babojelić, M., Zdunić, Z. (2020.): Photochemical efficiency of photosystem II in two apple cultivars affected by elevated temperature and excess light *in vivo*. *South African Journal of Botany*, 130: 316-326
23. Intrigliolo, D., Castel, J.R. (2004.): Feasibility of using LVDT and Watermark sensor for irrigation scheduling in plum. *Acta Horticulturae*, 664: 317-323.
24. Irmak, S., Haman, D.Z. (2001.): Performance of the Watermark granular matrix sensors in sandy soils. *App. Eng. In Agric.*, 17: 787–795.
25. Iqbal N., Hussain S., Raza MA, Yang C-Q, Safdar ME, Brestic M, Aziz A, Hayyat MS, Asghar MA, Wang XC, Zhang J, Yang W and Liu J (2019.): Drought Tolerance of Soybean (*Glycine max* L. Merr.) by Improved Photosynthetic Characteristics and an Efficient Antioxidant Enzyme Activities Under a Split-Root System. *Front. Physiol.*
26. Jabro, J., Stevensen, J.B., Iversen, W.M., Allen, B.L. (2020.): Irrigation Scheduling Based on Wireless Sensors Output and Soil-Water Characteristic Curve in Two Soils. *Sensors*, 20(5): 1336.
27. Jones, H.G.; R. Serraj; B. R. Loveys, L. Xiong, A. Wheaton, A. H. Price (2009.): Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Funct. Plant Biol.*, 36: 978-989.
28. Kalaji, H.M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I.A., Cetner, M.D., Łukasik, I., Goltsev, V., Ladle, R.J. (2016.): Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiol. Plant.*, 38: 102.
29. Killi, D.; Bussotti, F.; Raschi, A.; Haworth, M. (2017.): Adaptation to high temperature mitigates the impact of water deficit during combined heat and drought stress in C3 sunflower and C4 maize varieties with contrasting drought tolerance. *Physiologia Plantarum*, 159: 130–147.
30. Sita, K.; Sehgal, A.; Bhandari, K.; Kumar, J.; Kumar, S.; Singh, S.; HM Siddiquee, K.; Nayyar, H. (2018.): Impact of heat stress during seed filling on seed quality and seed yield in lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes. *J Sci Food Agric*; 98: 5134–5141.
31. Lauriano, J.A., Ramalho, J.C., Lidon, F.C., Ceumatos, M. (2006.): Mechanisms of energy dissipation in peanut under water stress. *Photosynthetica* 44: 404-410.
32. Licht, M., Wright, D., Lensen, A. (2013.): Soybean Response to Drought. Iowa State University of Science and Technology, 1 – 3.

33. Lisar, S.Y.S., Motafakkerzad, R., Mossharaf, M.H., Rahman, I.M.M. (2012.): Water Stress in Plants: Causes, Effects and Responses. Water stress. IntechOpen.
34. Leib, B.G., Jabro, J.D., Matthews, G.R. (2013.): Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. Soil Sci., 168. 396–408.
35. Lopez, F.B, Barclay, G.F. (2017.): Pharmacognosy. Fundamentals, Applications and Strategies. 45-60.
36. Makbul, S., Saruhan Guler, N., Durmus, N., Guven, S. (2011.): Changes in anatomical and physiological parameters of soybena under drought stress. Turk. J. Bot., 35: 369-377.
37. Marković, M. (2013.): Utjecaj navodnjavanja i gnojidbe dušikom na prinos i kakvoću zrna hibrida kukuruza (*Zea Mays* L.). Doktorska disertacija. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera Osijek, Poljoprivredni fakultet u Osijeku.
38. Marković, M., Šoštarić, J., Josipović, M., Petošić, D., Šimunić, I., Zebec, V. (2014.): Implementation of irrigation scheduling based on monitoring of soil moisture content in extreme weather conditions. Proceedings of 6th International Scientific and Expert Conference TEAM 2014. Technique, Education, Agriculture & Management November10-11, 2014., Kecskemét, Hungary.
39. Marković, M., Filipović, V., Legović, T., Josipović, M., Tadić, V. (2015.): Evaluation of Different Soil Water Potential by Field Capacity Threshold in Combination with a Triggered Irrigation Module. Soil and Water Research, 10(3): 164-171.
40. Marković, M., Josipović, M., Šoštarić, J., Zebec, V., Rapčan, I. (2016.): Effectiveness of granular matrix sensors in different irrigation treatments and installation depths. Journal of Agricultural Sciences, 61(3): 257-269.
41. Marković M., Krizmanić G., Brkić A., Japundžić-Palenkić, B., Petrović, D., Barač, Ž. (2021.): Sustainable Management of Water Resources in Supplementary Irrigation Management. Applied science, 11: 2451.
42. Markulj Kulundžić, A., Viljevac Vuletić, M., Matoša Kočar, M., Mijić, A., Varga, I., Sudarić, A., Cesar, V., Lepeduš, H. (2021.): The Combination of Increased Temperatures and High Irradiation Causes Changes in Photosynthetic Efficiency. Plants, 10: 2076.
43. Markulj Kulundžić, A., Josipović, A., Matoša Kočar, M., Viljevac Vuletić, M., Antunović Dunić, J., Varga, I., Cesar, V., Sudarić, A., Lepeduš, H. (2022.): Physiological insights on soybean response to drought. Agricultural Water Management, 268.

44. Meng, L.L., Song, J.F., Wen, J., Zhang, J., Wei, J.H. (2016.): Effects of drought stress on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Plectranthus scutellarioides*. *Photosynthetica*, 54: 414-421.
45. Mihaljević, I., Viljevac Vuletić, M., Šimić, D., Tomaš, V., Horvat, D., Josipović, M., Zdunić, Z., Dugalić, K., Vuković, D. (2021.): Comparative study of drought stress effects on traditional and modern apple cultivars. *Plants*, 10(3): 561.
46. Anwar, M., Asif Saleem, M., Dan, M., Malik, W.; Ul-Allah, S., Qadir Ahmad, M., Qayyum, A., Waqas Amjid, M., Ullah Zia, Z., Afzal, H., Asif, M., Ur Rahman, M., Zhangli Hu (2022.): Morphological, physiological and molecular assessment of cotton for drought tolerance under field conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29: 444-452.
47. Muñoz-Carpena, R. (2004.): Field Devices For Monitoring Soil Water Content. Fact Sheet ABE 343 of the Department of Agricultural and Biological Engineering, Florida.
48. Ohashi, Y., Nobuhiro Nakayama, N., Saneoka, H., Mohapatra, P., Fujita, K. (2008.): Differences in the responses of stem diameter and pod thickness to drought stress during the grain filling stage in soybean plants. *Acta Physiol Plant*, 31: 271–277.
49. Ohyama, T., Tewari, K., Ishikawa, S., Tanaka, K., Kamiyama, S., Ono, Y., Hatano, S., Ohtake, N., Kuni Sueyoshi, K., Hasegawa, H., Sato, T., Tanabata, S., Nagumo, Y., Fujita, Y., & Takahashi, Y. (2017.): Role of Nitrogen on Growth and Seed Yield of Soybean and a New Fertilization Technique to Promote Nitrogen Fixation and Seed Yield. In (Ed.), *Soybean - The Basis of Yield, Biomass and Productivity*. IntechOpen.
50. Oukarroum, A., Madidi, S.E., Schansker, G., Strasser, R.J. (2007.): Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* (L.)) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and rewatering. *Environ. Exp. Bot.*, 60: 438-446.
51. Oukarroum, A., Schansker, G., Strasser, R.J. (2009.): Drought stress effects on photosystem I content and photosystem II thermotolerance analyzed using Chl a fluorescence kinetics in barley varieties differing in their drought tolerance. *Physiol. Plantarum*, 137: 188-199.
52. Oukarroum, A., Madidi, S.E., Schansker, G., Strasser, R.J. (2007) Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* (L.)) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and rewatering. *Environ. Exp. Bot.*, 60: 438-446.
53. Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., Tran, L.S.P. (2014.): Response of plants to water stress. *Front. Plant Sci.*, 5: 86.

54. Osakabe, K., Osakabe, Y. (2012.): "Plant light stress," in *Encyclopaedia of Life Sciences*, ed. S. A. Robinson (London: Nature Publishing Group).
55. Pavlović, I., Mlinarić, S., Tarkowska D, Oklestkova, J., Novak, O., Lepeduš, H., Vujčić Bok, V., Radić Brkanac, S., Strnad M., SalopekSondi B. (2019.): Early Brassica crops responses to salinity stress: A comparative analysis between Chinese cabbage, white cabbage, and kale. *Frontiers in Plant Science*, 10: 450.
56. Pedersen, P., Lauer, J.G. (2004.): Response of Soybean Yield Components to Management System and Planting Date. *Agronomy journal*, 96(5): 1372-1381.
57. Rahman, M., Hossain, M., Bell, R.W. (2011.): Plant density effects on growth, yield and yield components of two soybean varieties under equidistant planting arrangement. *Asian Journal of Plant Sciences*, 10(5): 278-286.
58. Rai, R.K., Singh, V.P., Upadhyay, J. (2017.): Planning and Evaluation of Irrigation Projects Methods and Implementation, 505 - 523.
59. Razavi, F., Pollet, B., Steppe, K., Van Labeke, M.C. (2008.): Chlorophyll fluorescence as a tool for evaluation of drought stress in strawberry. *Photosynthetica*, 46, 631-633.
60. Risinger, M. (1987.): Tensiometer. USDA-NRCS and Ken Carver, High Plains Underground Water Conservation District No. 1. (10. 07. 2022., 11:17).
61. Sehgal A, Sita K, Siddique KHM, Kumar R, Bhogireddy S, Varshney RK, HanumanthaRao B, Nair RM, Prasad PVV and Nayyar H (2018.): Drought or/and Heat-Stress Effects on Seed Filling in Food Crops: Impacts on Functional Biochemistry, Seed Yields, and Nutritional Quality. *Front. Plant Sci.*, 9: 1705.
62. Sharma, K., Irmak, S., Kukal, M.S., Vuran, M.C., Jhala, A., Qiao, X. (2021.): Evaluation of soil moisture sensing technologies in silt loam and loamy sand soils: assessment of performance, temperature sensitivity, and site- and sensor-specific calibration functions. *ASAB*, 64(4): 1123-1139.
63. Shukla, P.S., Shotton, K., Norman, E., Neily, W., Critchley, A.T., Prithivira, B. (2018.): Seaweed extract improve drought tolerance of soybean by regulating stress-response genes. *AoB PLANTS*, 10(1).
64. Silva, B.P.C., Tassinari, D., Silva, M.L.N., Silva, B.M., Curi, N., da Rocha, H.R. (2022.): Nonlinear models for soil moisture sensor calibration in tropical mountainous soils. *Soils and Plant Nutrition, Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, 79 (4): e20200253.
65. Stirbet, A., Govindjee (2011.): On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and Photosystem II: basics and applications of the OJIP fluorescence transient. *J. Photochem. Photobiol.*, 104: 236-257.

66. Strasser, R. J., Srivastava, A., Govindjee, G. (1995.): Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. *Photochemistry and Photobiology*, 61, 32-42.
67. Strasser, R.J., Srivastava, A., Tsimilli-Michael, M. (2004.): Analysis of chlorophyll a fluorescence transient. U: Chlorophyll a fluorescence a signature of photosynthesis: Advances in photosynthesis and respiration 19. Papageorgiou, G.C., Govindjee (ur.). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 321-362.
68. Strasser, R. J., Srivastava, A., Tsimilli-Michael, M. (2000.): The fluorescent transient as a tool to characterise and screen photosynthetic samples. U: Yunus, M., Pathre, U., Mohanty, P. (ur.). Probing photosynthesis: Mechanisms, regulation and adaptation. Taylor and Francis, London, 445-483.
69. Strasser, R. J., Srivastava, A., Tsimilli-Michael, M. (2004.): Analysis of chlorophyll a fluorescence transient. In: Papageorgiou, G.C., Govindjee, G., eds. Chlorophyll fluorescence: A signature of photosynthesis. Advances in photosynthesis and respiration series. Dordrecht: Springer, 321-362.
70. Škorić, A. (1982.): Priručnik za pedološka istraživanja. Fakultet poljoprivrednih znanosti Sveučilišta u Zagrebu.
71. Tsimilli-Michael M. and Strasser, R.J. (2008.): In vivo assessment of stress impact on plants' vitality: Applications in detecting and evaluating the beneficial role of mycorrhization on host plants. In: Varma, A., ed. Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology.
72. Umar, M., Siddiqui, Z.S. (2018.): Physiological performance of sunflower genotypes under combined salt and drought stress environment. *Acta Bot. Croat.*, 77: 36-44.
73. Von Berkum, E. (2008): Leaf temperature and the speed of growth. Dostupno na: <http://blog.maripositas.org/horticulture/leaf-temperature-and-the-speed-of-growth> (19. 05. 2023.)
74. Vrtarić, M., Sudarić, A. (2008.): Soja *Glycine max* (L.) Merr. Poljoprivredni institut Osijek.
75. Vukadinović, V., Jug, I., Đurđević, B. (2012.): Ekofiziologija bilja. Miklavčić, D. (ur.), Neformalna savjetodavna služba.
76. Wanderlinden, K., Giráldez, J.V. (2011.): Field Water Capacity. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (eds) Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht.

77. Werner, M. Kaiser, G., Kaiser, S., Neimanis, S. (1981.): Photosynthesis under osmotic stress: Differential recovery of photosynthetic activities of stroma enzymes, intact chloroplasts, protoplasts, and leaf slices after exposure to high solute concentrations. *Planta*, 153(5): 430-435.
78. Westgate, M.E., Peterson, C.M. (1993.): Flower and pod development in water deficient soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Journal Experimental Botany*, 44: 109-117.
79. Woolery, P.O., Schmal, J.L., Davis, A.S. (2010.): Evaluation of chlorophyll fluorescence as an indicator of dehydration stress in American chestnut seedlings. *Native Plants Journal*, 11: 27-32.
80. Yadav, P.K., Swanson, C., Penning, T., Wallace, J. (2016.): Study of Moisture Sensors' Response to Drying Cycles of Soil. In: *Proceedings of Irrigation Show Technical Program*. Las Vegas, NV.
81. Yusuf, M.A., Kumar, D., Rajwanshi, R., Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., Govindjee, S., Sarin, N.B. (2010.): Overexpression of g-tocopherol methyl transferase gene in transgenic Brassica juncea plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. *Biochimica et Biophysica Acta* 1797, 1428–1438.
82. Zhou, R., Yu, X., Ottosen, C.; Rosenqvist, E., Zhao, L., Wang, Y., Yu, W., Zhao, T., Wu, Z. (2017.): Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. *BMC Plant Biology* volume 17, Article number: 24.
83. Živčák, M., Brestič, M., Olšovská, K., Slamka, P. (2008.): Performance index as a sensitive indicator of water stress in *Triticum aestivum* (L.). *Plant Soil Environ.*, 54: 133-139.

8. SAŽETAK

Istraživanje je provedeno na Poljoprivrednom institutu Osijek. Pokus je postavljen u vegetacijskim posudama u plasteniku s jednom sortom soje (OS Nevena). Sjetva je bila 25. travnja 2022. godine. Biljke su podijeljene na dva tretmana – jedan u optimalnim uvjetima vlažnosti tla (n1, 100 %, retencijskog kapaciteta za vodu, Rkv), a druge su bile izložene stresu izazvanom nedostatkom vode (n2, 50 % Rkv) u fazi cvatnje (f1) i nalijevanju zrna (f2). Obroci navodnjavanja su prilagođeni stanju vlažnosti tla, odnosno tretmanu navodnjavanja te su bili u rasponu od 2 do 8 L tijekom mjeseca svibnja, od 0 do 10 L tijekom mjeseca lipnja te od 0 do 8 L tijekom mjeseca srpnja. Norma navodnjavanja je tijekom mjeseca svibnja bila 76 L (n1f1+f2) te 68 L (n2f1 i n2f2). Tijekom mjeseca lipnja je norma navodnjavanja bila 154 L (n1f1+f2 i n2f2) i 126 L (n2f1) te 128 L (n1af1+f2), 120 L (n2f1) i 98 L (n2f2) tijekom mjeseca srpnja. Senzori za mjerenje vlažnosti tla su zabilježili promjene vlažnosti tla, odnosno dinamiku vlažnosti tla na svim tretmanima navodnjavanja. Najbrža reakcija senzora je zamijećena kod TDR300 i AT senzora koji mjere volumni sadržaj vode u tlu (% vol.). Tenzijometar i Watermark su pokazali ujednačenije rezultate mjerenja u uvjetima povoljne vlažnosti, odnosno na n1 (kontrolnom) tretmanu. Oscilacije temperature lista u oba tretmana su pratile oscilacije temperature okoline. Također, zabilježen je negativan utjecaj suše na sadržaj klorofila u listu. Osim toga, stres izazvan sušom je utjecao na maksimalni kvantni prinos fotosustava II ovisno o fazi razvoja. Indeks fotosintetske aktivnosti (PIABS) je pokazao niže vrijednosti u tretmanu zasušivanja (n2) u odnosu na kontrolu (n1) te smanjenje vrijednosti PIABS do kojih je došlo trećeg dana zasušivanja u nalijevanju. Sveukupno, modeli kNN i neuronska mreža su postigli najbolje performanse u ovom istraživanju, dok su modeli SVM i logistička regresija ostvarili nešto niže vrijednosti. Zaključuje se da je kNN model najuspješniji u klasifikaciji stresa i da je najpouzdaniji u predviđanju pozitivne klase (stres). Model kNN postigao je visoku vrijednost AUC-a od 0,976. Također, model je postigao visoku vrijednost CA (0,921), što ukazuje na to da je model vrlo precizan u klasifikaciji obje klase.

Ključne riječi: soja, vodni stres, senzori

9. SUMMARY

The research was conducted at the Agricultural Institute Osijek. The experiment was set up in growing pots in a greenhouse with one soybean variety (OS Nevena). Soybean sowing was on April 25, 2022. The plants were divided into two treatments - one in optimal soil moisture conditions (n1, 100% Water holding capacity, WHC), and the other were exposed to stress caused by a lack of water (n2, 50% WHC) in the phase of flowering (b1) and grain filling (b2). Irrigation rates were adapted to the state of soil moisture, that is, to the irrigation treatment, and ranged from 2 to 8 L during the month of May, from 0 to 10 L during the month of June, and from 0 to 8 L during the month of July. The irrigation rate during the month of May was 76 L (n1f1+f2) and 68 L (n2f1 and n2f2). During the month of June, the irrigation rate was 154 L (n1f1+f2 and n2f2) and 126 L (n2f1), and 128 L (n1af1+f2), 120 L (n2f1) and 98 L (n2f2) during the month of July. Sensors for measuring soil moisture recorded changes in soil moisture, i.e. soil moisture change in all irrigation treatments. The fastest sensor response was observed with the TDR300 and AT sensors that measure the volume content of water in the soil (% vol.). Tensiometer and Watermark showed more uniform measurement results in conditions of favorable humidity, i.e. in the n1 (control) treatment. Leaf temperature oscillations in both treatments followed ambient temperature oscillations. Also, a negative impact of drought on the content of chlorophyll in the leaf was recorded. In addition, drought stress affect the maximum quantum yield of photosystem II depending on the growth stage. The photosynthetic activity index (PIABS) showed lower values in the drying treatment (n2) compared to the control (n1) and a decrease in PIABS values that occurred on the third day of drying in the pouring. Overall, the kNN and neural network models achieved the best performance in this study, while the SVM and logistic regression models achieved slightly lower values. It is concluded that the kNN model is the most successful in stress classification and is the most reliable in predicting the positive class (stress). The kNN model achieved a high AUC value of 0.976. Also, the model achieved a high CA value (0.921), which indicates that the model is very accurate in the classification of both classes.

Keywords: soybean, water stress, sensors

10. POPIS TABLICA

- Tablica 1. Požnjevene površine i proizvodnja soje od 2015. do 2021. u Hrvatskoj, str. 3
- Tablica 2. Požnjevene površine i prinos soje od 2015. do 2021. u svijetu, str. 4
- Tablica 3. Izmjereni parametri fluorescencije klorofila a i izračunati parametri OJIP testa, str. 19
- Tablica 4. Rezultati fizikalne i kemijske analize tla korištenog u pokusu s posudama, str. 26
- Tablica 5. Vrijednosti vlažnosti tla (% vol.) izmjerene AT senzorom, str. 28
- Tablica 6. Vrijednosti vlažnosti tla (cbar) izmjerene Watermark senzorom, str. 29
- Tablica 7. Vrijednosti vlažnosti tla (cbar) izmjerene tenziometrom, str. 31
- Tablica 8. Analiza varijance za temperaturu lista, str. 33
- Tablica 9. Analiza varijance za relativni sadržaj klorofila u listu, str. 34
- Tablica 10. Analiza varijance za maksimalni kvantni prinos fotosustava II (TR_0/ABS), str. 36
- Tablica 11. Analiza varijance za gustoću aktivnih reakcijskih središta RC/CS_0 str. 37
- Tablica 12. Analiza varijance za indeks fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS}), str. 38
- Tablica 13. Analiza varijance za indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI (PI_{total}), str. 40
- Tablica 14. Modeli strojnog učenja, str. 41
- Tablica 15. Rezultati na testnom skupu podataka, str. 42

11. POPIS SLIKA

Slika 1. Watermark senzor, str. 10

Slika 2. Tenziometar, str. 11

Slika 3. Mjerenje volumnog sadržaja vode u tlu (%), str. 12

Slika 4. i 5. Time Domain Reflectometry (TDR), str. 12

Slika 6. Prosijavanje tla, str. 14

Slika 7. Sjetva soje, str. 15

Slika 8. i 9. Postavljanje Watermark senzora, str. 16

Slika 10. Postavljeni senzori, str. 16

Slika 11. i 12. Senzor Handy Plant Efficiency Analyser, str. 17

Slika 13. Senzor Dual Focus Infrared Thermometer, str. 19

Slika 14. Senzor Chlorophyll content meter CL-01, str. 19

Slika 15. Spektralni senzor, str. 20

Slika 16. Prikaz skupa za učenje, str. 21

Slika 17. Faza zasušivanja tretmana, str. 42

Slika 18. Rezultat testnog skupa na najboljim valnim duljinama, str. 46

12. POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Dnevne vrijednosti temperature ($^{\circ}\text{C}$) i relativne vlage (%) zraka tijekom mjeseca svibnja, str. 24

Grafikon 2. Dnevne vrijednosti temperature ($^{\circ}\text{C}$) i relativne vlage (%) zraka tijekom mjeseca lipnja, str. 24

Grafikon 3. Dnevne vrijednosti temperature ($^{\circ}\text{C}$) i relativne vlage (%) zraka tijekom mjeseca srpnja, str. 25

Grafikon 4. Krivulja umjeravanja, str. 26

Grafikon 5. Vrijednosti vlažnosti tla (%vol.) mjerene TDR300 senzorom, str. 27

Grafikon 6. Vrijednosti vlažnosti tla (%vol.) mjerene AT senzorom (n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv), n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv), str. 28

Grafikon 7. Dinamika vlažnosti tla i obroci navodnjavanja u mjesecu svibnju (a), lipnju (b) i srpnju (c) praćena Watermark senzorom (n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv, n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv), str. 30

Grafikon 8. Dinamika vlažnosti tla i obroci navodnjavanja u mjesecu svibnju (a), lipnju (b) i srpnju (c) praćena tenziometrom (n1f1+f2 = kontrolni tretman, 80 do 100 % Rkv), n2f1 = zasušivanje u fazi cvatnje, 50 % Rkv, n2f2 = zasušivanje u fazi nalijevanja zrna, 50 % Rkv), str. 32

Grafikon 9. Temperatura lista mjerena tijekom četiri dana (D1 – D4) i aritmetičke sredine temperature lista (X) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) na biljkama u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2) te temperatura okolinskog zraka (TO) po danima (D1 – D4) i aritmetička sredina temperature okolinskog zraka (X). Vrijednosti označene različitim slovima, str. 34

Grafikon 10. Relativni sadržaj klorofila (SPAD) mjereno tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine sadržaja klorofila (X) u cvatnji i nalijevanju za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2). Vrijednosti označene različitim slovima abecede za mjerenja po danima (velika slova) i za aritmetičku sredinu po tretmanu (mala slova) statistički su značajno različite kod $P < 0,01$, str. 35

Grafikon 11. Maksimalni kvantni prinos fotosustava II (TR_0/ABS) mjereno tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine TR_0/ABS (X) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2), str. 37

Grafikon 12. Gustoća aktivnih reakcijskih središta (RC/CS_0) mjerena tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine RC/CS_0 (\bar{X}) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2), str. 38

Grafikon 13. Indeks fotosintetske učinkovitosti (PI_{ABS}) mjereno tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine PI_{ABS} (\bar{X}) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2), str. 39

Grafikon 14. Indeks fotosintetske učinkovitosti pretvorbe energije od ekscitona do redukcije krajnjeg akceptora elektrona na PSI (PI_{TOTAL}) mjereno tijekom četiri dana (D1 – D4) te aritmetičke sredine PI_{TOTAL} (\bar{X}) u cvatnji (a) i nalijevanju (b) za biljke u kontrolnom tretmanu (n1) i tretmanu zasušivanja (n2), str. 40

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Sveučilišni diplomski studij Bilnogojstva, smjer Biljna proizvodnja

Diplomski rad

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA PRAĆENJA VODNOG STRESA KOD SOJE

(*Glycine max* (L.) Merr.)

Marija Spišić

Sažetak: Istraživanje je provedeno na Poljoprivrednom institutu Osijek. Pokus je postavljen u vegetacijskim posudama u plasteniku s jednom sortom soje (OS Nevena). Pokus je posijan 25. travnja 2022. godine. Biljke su podijeljene u dva tretmana navodnjavanja – jedan u optimalnim uvjetima vlažnosti tla (n1, 100 % retencijskog kapaciteta za vodu, Rkv), a druge su bile izložene stresu izazvanom nedostatkom vode (n2, 50 % Rkv) u fazi cvatnje (f1) i nalijevanju zrna (f2). Obroci navodnjavanja su prilagođeni stanju vlažnosti tla, odnosno tretmanu navodnjavanja te su bili u rasponu od 2 do 8 L tijekom mjeseca svibnja, od 0 do 10 L tijekom mjeseca lipnja te od 0 do 8 L tijekom mjeseca srpnja. Norma navodnjavanja je tijekom mjeseca svibnja bila 76 L (n1f1+f2) te 68 L (n2f1 i n2f2). Tijekom mjeseca lipnja je norma navodnjavanja bila 154 L (n1f1+f2 i n2f2) i 126 L (n2f1) te 128 L (n1af1+f2), 120 L (n2f1) i 98 L (n2f2) tijekom mjeseca srpnja. Senzori za mjerenje vlažnosti tla su zabilježili promjene vlažnosti tla, odnosno dinamiku vlažnosti tla na svim tretmanima navodnjavanja. Najbrža reakcija senzora je zamijećena kod TDR300 i AT senzora koji mjere volumni sadržaj vode u tlu (% vol.). Tenziometar i Watermark su pokazali ujednačenije rezultate mjerenja u uvjetima povoljne vlažnosti, odnosno na n1 (kontrolnom) tretmanu. Oscilacije temperature lista u oba tretmana su pratile oscilacije temperature okoline. Također, zabilježen je negativan utjecaj suše na sadržaj klorofila u listu. Osim toga, stres izazvan sušom nije previše utjecao na maksimalni kvantni prinos fotosustava II. Indeks fotosintetske aktivnosti (PIABS) je pokazao niže vrijednosti u tretmanu zasušivanja (n2) u odnosu na kontrolu (n1) te smanjenje vrijednosti PIABS do kojih je došlo trećeg dana zasušivanja u nalijevanju. Sveukupno, modeli kNN i neuronska mreža su postigli najbolje performanse u ovom istraživanju, dok su modeli SVM i logistička regresija ostvarili nešto niže vrijednosti. Zaključuje se da je kNN model najuspješniji u klasifikaciji stresa i da je najpouzdaniji u predviđanju pozitivne klase (stres). Model kNN postigao je visoku vrijednost AUC-a od 0,976. Također, model je postigao visoku vrijednost CA (0,921), što ukazuje na to da je model vrlo precizan u klasifikaciji obje klase.

Rad je izrađen pri: Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Mentor: doc. dr. sc. Monika Marković

Broj stranica: 64

Broj grafikona i slika: 14 i 18

Broj tablica: 15

Broj literaturnih navoda: 83

Broj priloga:

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: soja, vodni stres, senzori

Datum obrane:

Stručno povjerenstvo za obranu:

1. prof. dr. sc. Irena Rapčan, predsjednik
2. doc. dr. sc. Monika Marković, mentor
3. dr. sc. Maja Matoša Kočar, član

Rad je pohranjen u: Knjižnica Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilištu u Osijeku, Vladimira Preloga 1

BASIC DOCUMENTATION CARD

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Agrobiotechnical science Osijek
University Graduate Studies, course Plant production

Graduate thesis

COMPARISON OF DIFFERENT METHODS OF MONITORING WATER STRESS IN SOYBEAN (*Glycine max* (L.) Merr.)
Marija Spišić

Abstract: The research was conducted at the Agricultural Institute Osijek. The experiment was set up in vegetation pots in a greenhouse with one soybean variety (OS Nevena). The sowing date was April 25, 2022. The plants were divided into two treatments - one in optimal soil moisture conditions (n1, 80% Water holding capacity, WHC), and the other were exposed to stress caused by a lack of water (50% WHC), in the flowering (f1) and grain filling (f2) phase. Irrigation rations ranged from 2l at the beginning of the research to 8l at the end of May. On average, the soil water content ranged from 49.00 cbar (n2f1) to 60.68 cbar (n2f2). Sensors for measuring soil moisture registered changes, i.e. the dynamics of soil moisture in all treatments. The fastest sensor response was observed with the TDR300 and AT sensors that measure the volume content of water in the soil (% vol.). Tensiometer and Watermark showed more uniform measurement results in conditions of favorable humidity, i.e. in the n1 treatment. Leaf temperature oscillations in both treatments followed ambient temperature oscillations. Also, a negative impact of drought on the content of chlorophyll in the leaf was recorded. In addition, drought stress does not have too much influence on the maximum quantum yield of photosystem II. The index of photosynthetic activity (PIABS) shows lower values in the drying treatment (n2) compared to the control (n1) and a decrease in PIABS values that occurred on the third day of drying in pouring. Overall, the kNN and neural network models achieved the best performance in this study, while the SVM and logistic regression models achieved slightly lower values. We conclude that the kNN model is the most successful in stress classification and is the most reliable in predicting the positive class (stress). The kNN model achieved a high AUC value of 0.976. Also, the model achieved a high CA value (0.921), which indicates that the model is very accurate in the classification of both classes.

Thesis performed at: Faculty of Agrobiotechnical science Osijek

Mentor: Monika Marković, Assistant professor

Number of pages: 64

Number of figures and pictures: 14 i 18

Number of tables: 15

Number of references: 83

Number of appendices:

Original in: Croatian

Key words: soybean, water stress, sensors

Thesis defended on date:

Reviewers:

1. Professor Irena Rapčan, president of the Commission
2. Assistant professor Monika Marković, mentor
3. PhD Maja Matoša Kočar, member of the Commission

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