

# Kvantifikacija toksičnog učinka aluminija kod kukuruza primjenom multispektralnih analiza

---

**Strugar, Mirna**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:193755>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-18**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET

**KVANTIFIKACIJA TOKSIČNOG UČINKA ALUMINIJA KOD  
KUKURUZA PRIMJENOM MULTISPEKTRALNIH ANALIZA**

DIPLOMSKI RAD

Mirna Strugar

Zagreb, rujan, 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET**

Diplomski studij:

Agroekologija-Mikrobna biotehnologija u poljoprivredi

**KVANTIFIKACIJA TOKSIČNOG UČINKA ALUMINIJA KOD  
KUKURUZA PRIMJENOM MULTISPEKTRALNIH ANALIZA**

DIPLOMSKI RAD

Mirna Strugar

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Boris Lazarević

Zagreb, rujan, 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET**

**IZJAVA STUDENTA  
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Mirna Strugar**, JMBAG 0178089897, rođena 16.09.1992. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

**KVANTIFIKACIJA TOKSIČNOG UČINKA ALUMINIJA KOD KUKURUZA PRIMJENOM  
MULTISPEKTRALNIH ANALIZA**

Svojim potpisom jamčim:

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

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studentice*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studentice **Mirne Strugar**, JMBAG,0178089897, naslova

**KVANTIFIKACIJA TOKSIČNOG UČINKA ALUMINIJA KOD KUKURUZA PRIMJENOM  
MULTISPEKTRALNIH ANALIZA**

obranjen je i ocijenjen ocjenom \_\_\_\_\_, dana \_\_\_\_\_.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. izv. prof. dr. sc. Boris Lazarević mentor

\_\_\_\_\_

2. izv. prof. dr. sc. Hrvoje Kutnjak član

\_\_\_\_\_

3. izv. prof. dr. sc. Vedran Rubinić član

\_\_\_\_\_

## Zahvala

Zahvaljujem se prvenstveno mentoru izv. prof. dr. sc. Borisu Lazareviću na svim savjetima, konstruktivnim kritikama, nesebičnoj pomoći i dragocjenom vremenu koje je utrošio na mene i ovaj diplomski rad. Također se zahvaljujem kolegama sa Zavoda za ishranu bilja koji su mi pomogli kod izvedbe istraživanja

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji, osobito svojim divnim roditeljima na podršci i razumijevanju koje su mi pružali kroz cijelo moje školovanje, osobito za vrijeme studiranja.

## Sadržaj

1.	Uvod .....	1
1.1.	Cilj rada.....	4
2.	Pregled literature .....	5
2.1.	Toksičnost aluminija .....	5
2.2.	Simptomi toksičnosti aluminija na korijenov sustav .....	6
2.3.	Utjecaj aluminija na kukuruz (Zea mays L.) .....	7
2.4.	Multipektralne analize .....	9
3.	Vegetacijski indeksi .....	12
4.	Materijali i metode.....	15
4.1.	Postavljanje pokusa .....	15
4.2.	Multispektralna mjerenja .....	16
4.3.	Statistička obrada podataka.....	18
5.	Rezultati .....	19
5.1.	Rezultati multispektralnih analiza.....	19
5.2.	Refleksija u crvenom dijelu spektra ( $R_{Red}$ ) .....	20
5.3.	Refleksija u zelenom dijelu spektra ( $R_{Green}$ ) .....	21
5.4.	Refleksija u plavom dijelu spektra ( $R_{Blue}$ ) .....	22
5.5.	Refleksija u specifično zelenom dijelu spektra ( $R_{SpcGrn}$ ).....	23
5.6.	Refleksija dugovalnog crvenog dijela spektra ( $R_{FarRed}$ ) .....	24
5.7.	Indeks klorofila (CHI).....	25
5.8.	Indeks antocijana (ARI).....	26
5.9.	Normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI).....	27
5.10.	Ton boje (HUE) .....	28
5.11.	Svjetlina boje (VAL).....	29
5.12.	Saturacija (SAT) .....	30
6.	Rasprava .....	31
7.	Zaključak .....	33
8.	Popis literature.....	34

## Sažetak

Diplomskog rada studentice **Mirne Strugar**, naslova

### **KVANTIFIKACIJA TOKSIČNOG UČINKA ALUMINIJA KOD KUKURUZA PRIMJENOM MULTISPEKTRALNIH ANALIZA**

Aluminij (Al) je treći najzastupljeniji element u Zemljinoj kori, te se njegovo otapanje povećava pri kiselom pH. Kisela tla zauzimaju veliki dio svjetskih obradivih tala, a pri  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  nižem od 5,5 aluminij postaje toksičan za biljke. Uzgoj kukuruza (*Zea mays* L.) na kiselom tlu može biti uzrok smanjenja prinosa za više od 50 %. Toksičnost  $\text{Al}^{3+}$  očituje se inhibicijom rasta korijenovog sustava, ali se simptomi mogu uočiti i na nadzemnim organima. Cilj rada bio je utvrditi fiziološke promjene nadzemnih organa kukuruza uzgajanog u uvjetima toksičnih koncentracija aluminija korištenjem nedestruktivnih metoda multispektralnih analiza. Istraživanje je provedeno u kontroliranim uvjetima komora rasta, na ukupno 50 biljaka uzgajanih u hranjivim otopinama s različitim koncentracijama aluminija (0, 50, 100, 200 i 400  $\mu\text{M dm}^{-3}$   $\text{AlCl}_3$ ). Multispektralno snimanje svake biljke je provedeno nakon 13 dana uzgoja u tretmanima, pomoću uređaja CropReporter® (PhenoVation, Wageningen, the Netherlands). U tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od 100  $\mu\text{M dm}^{-3}$ , 200  $\mu\text{M dm}^{-3}$  i 400  $\mu\text{M dm}^{-3}$  vidljiv je pad vegetacijskih indeksa koji ukazuju na izravni ili neizravni toksični učinak aluminija na fotosintetske pigmente. Pad sadržaja fotosintetskih pigmenata kao posljedicu ima smanjenu apsorpciju svjetlosti. S porastom koncentracije aluminija rasla je i refleksija u  $R_{\text{Red}}$ ,  $R_{\text{Green}}$ ,  $R_{\text{Blue}}$ ,  $R_{\text{SpcGrn}}$ , te  $R_{\text{FarRed}}$  spektrima, što ukazuje da u uvjetima toksičnosti aluminija dolazi do smanjenja usvajanja svjetlosne energije, što će posljedično dovesti do smanjenja fotosintetske aktivnosti. Ovaj diplomski rad ukazuje na mogućnosti korištenja multispektralnih analiza u svrhu kvantifikacije fenotipskih promjena nadzemnih organa kukuruza u uvjetima toksičnosti aluminija.

**Ključne riječi:** aluminij, kukuruz, multispektralne analize, vegetacijski indeksi



## Summary

Of the master's thesis - student **Mirna Strugar**, entitled

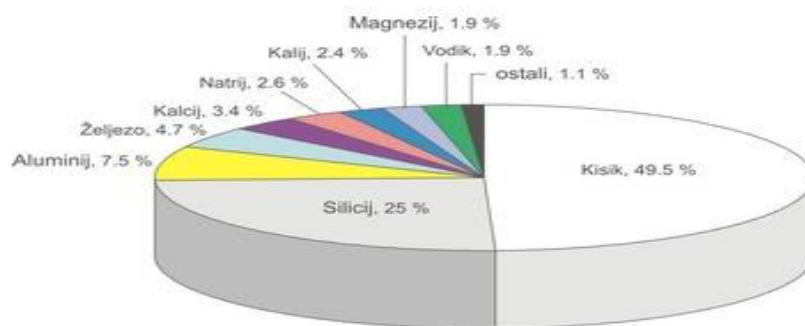
### QUANTIFICATION OF THE ALUMINUM TOXICITY IN MAIZE USING MULTISPECTRAL ANALYSIS

Aluminum (Al) is the third most abundant element in the Earth's crust, and its dissolution increases at acidic pH. Acidic soils occupy a large part of the world's arable soils, and aluminum toxicity occurs at a  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  lower than 5,5. Growing corn (*Zea mays L.*) on acidic soil can cause yield reductions of more than 50%. The toxicity of  $\text{Al}^{3+}$  is manifested by the inhibition of the growth of the root system, but the symptoms can also be observed on the above-ground organs. The aim of the work was to determine the physiological changes in the above-ground organs of corn grown under conditions of toxic concentrations of aluminum using non-destructive methods of multispectral analysis. The research was conducted in controlled conditions of growth chambers, on a total of 50 plants grown in nutrient solutions with different concentrations of aluminum (0, 50, 100, 200 and 400  $\mu\text{M dm}^{-3} \text{AlCl}_3$ ). Multispectral imaging of each plant was performed after 13 days of cultivation in the treatments, using the CropReporter® device (PhenoVation, Wageningen, the Netherlands). Treatments with aluminum in concentrations of 100  $\mu\text{M dm}^{-3}$ , 200  $\mu\text{M dm}^{-3}$  and 400  $\mu\text{M dm}^{-3}$ , caused reduction of vegetation indices is visible, which indicates direct or indirect toxic effects of Al on the photosynthetic pigments. With the increase in aluminum concentration, the reflection in the  $R_{\text{Red}}$ ,  $R_{\text{Green}}$ ,  $R_{\text{Blue}}$ ,  $R_{\text{SpcGrn}}$  and  $R_{\text{FarRed}}$  spectra also increased, which indicates that in conditions of aluminum toxicity there is a decrease in the absorption of light energy, which will consequently lead to a decrease in photosynthetic activity. This work show the usefulness multispectral analysis for the purpose of quantifying the phenotypic changes of above-ground organs of corn under conditions of aluminum toxicity.

**Keywords:** aluminum, corn, multispectral analysis, vegetation indices

## 1. Uvod

Aluminij (Al) kao najzastupljeniji metal u Zemljinoj kori čini 7,5% njene mase, te zauzima treće mjesto po zastupljenosti elemenata nakon kisika i silicija (Slika 1.1.) (Generalić, 2022). Zbog izražene kemijske aktivnosti prema kisiku, aluminij u prirodi nalazimo pretežno u vezanom obliku kao mineral. Približno 250 različitih minerala sadrži aluminij, a najveći dio čine aluminosilikati sa oko 40 % (Dolić, 2015). Otapanje minerala koji sadrže aluminij se povećava zakiseljavanjem tla (Bolan i sur., 1991).



Slika 1.1. Elementarni sastav litosfere

Izvor: <https://glossary.periodni.com/rjecnik.php?hr=Zemljina+kora> , pristup: 15.03.2022.

Zakiseljavanje tla je spor prirodni proces, koji uključuje geogene i pedogene procese, izazvane karakterom matičnog supstrata i intenzitetom ispiranja baza oborinskom vodom, te antropogenim djelovanjem (kisele kiše, gnojidba, plodored) (Franjević, 2014). Uz navedeno, na zakiseljavanje tla utječu i aktivnost korijena, razgradnja organske tvari kao i biološka aktivnost u tlu (Panda i sur., 2017).

Zakiseljavanje je posebno izraženo i ubrzano na obradivim tlima uslijed intenzivne gnojidbe dušičnim gnojivima u amonijskom obliku (Franjević, 2014). Kiselost tla jedan je od ograničavajućih čimbenika prinosa (Monaghan i sur., 1998; Ates i Tekeli, 2005) i po globalnim efektima, odmah iza erozije, najjači je čimbenik degradacije tala (Vukadinović, 2016). Kisela tla s  $pH_{H_2O}$  nižim od 5,5 široko su rasprostranjena u Hrvatskoj i pokrivaju otprilike 50 % obradivih površina (Kovačević i sur., 1993).

Za određivanje pH vrijednosti u Hrvatskoj se uglavnom koriste vrijednosti  $pH_{H_2O}$  i  $pH_{KCl}$ . Pri tome  $pH_{H_2O}$  nazivamo aktualna ili trenutna kiselost tla jer mjeri pH vrijednost vodene faze tla, a  $pH_{KCl}$  je izmjenjiva ili supstitucijska kiselost jer mjeri pH vrijednost nakon zamjene kationa s adsorpcijskog kompleksa tla (kolidi sekundarnih minerala gline i humusnih tvari) (Lončarić i sur., 2015). Neke od, za biljnu proizvodnju važnijih, posljedica kiselosti tla su toksičnost aluminija, mangana i željeza (Zhang i sur., 2007), smanjena pristupačnost fosfora (Bouton i Sumner, 1983), deficit molibdena (Cregan, 1980; McBride i Cherney, 2004), smanjena nodulacija kod leguminoza (Brauer i sur., 2002) kao i nedostatak kalcija i magnezija (Graham, 1992).

Na takvim tlima otežan je uspješan uzgoj mnogih poljoprivrednih kultura, tako i kukuruza. Vuksanović (2021) navodi da je kod žitarica uočen različit stupanj tolerancije prema aluminiju. Mnoga istraživanja su pokazala da je kukuruz (*Zea mays* L.) tolerantniji prema niskoj pH vrijednosti tla u odnosu na druge ratarske kulture. Ipak, usprkos činjenici da ima visok stupanj tolerancije prema toksičnom djelovanju Al, uzgoj na kiselom tlu može biti uzrok redukcije prinosa preko 50 % (Vuksanović, 2021). Poljoprivredne površine sa  $pH_{H_2O}$  vrijednosti ispod 5, bez prethodnih mjera popravka tla (kalcizacija, humizacija, fosfatizacija, primjena mikroelemenata) se smatraju nepovoljnim za uzgoj kukuruza (Vukadinović. i sur., 2016). Prisutnost toksičnog Al primarno uzrokuje inhibiciju rasta korijenovog sustava, no vidljiva je i na nadzemnim dijelovima biljke gdje uzrokuje pojavu ljubičaste boje stabljike te zakržljalog lista, list je manji i kasnije sazrijeva, te dolazi do žućenja i odumiranja vrhova lišća (Foy i Fleming, 1982). Za uspješan uzgoj kultura na određenom području u današnje vrijeme imamo pristup modernim tehnologijama koje koriste senzore za prepoznavanje različitih stresova kod biljaka, te nam omogućuju pravovremenu i točnu reakciju na uočeni problem. Multispektralne analize, koje kao alat koriste senzore za određivanje refleksija valnih dužina, često se koriste za evaluaciju zdravstvenog stanja biljaka, jer nam pružaju točan uvid u nedostatke hranjivih tvari, te omogućuju identifikaciju štete od štetnika, kao i optimizaciju gnojidbe (PrecisionHawk, 2022).

Zbog toga se sve više radi na poboljšanju multispektralnih senzora, tome doprinosi relativno visoka razina ulaganja u istraživanje i razvoj takvih tehnologija. Uzimajući u obzir da je cijena koštanja takvih senzora postala pristupačnija, u kombinaciji sa poboljšanom kvalitetom obrade podataka, te pojednostavljenim načinom uporabe, ne iznenađuje podatak velikog porasta uporabe ove tehnologije u poljoprivredi (Van derMerwea i sur., 2020.).

Multispektralne analize primjenom snimanja u bliskom infracrvenom području (NIR) omogućuju ranu detekciju biljnog stresa koji može biti izazvan abiotskim i/ili biotskim čimbenicima (Herrick, 2017).

Zdravstveno stanje vegetacije najlakše je predstaviti vegetacijskim indeksima koje dobivamo stavljanjem u odnos različitih reflektiranih valnih dužina svjetlosti (Peñuela i Filella, 1998.). Vegetacijski indeksi nam omogućuju ranu detekciju stresa kod biljke, jer nam daju uvid u trenutno stanje vegetacije, potrebu biljke za vodom i različitim hranjivim tvarima, te nam pomažu da utvrdimo prisutnost bolesti ili insekata na biljci (Bannari, 1995).

Multispektralne tehnologije postaju sve bitniji alat u proučavanju okoliša. Omogućuju prikupljanje podataka o krčenju šuma, degradaciji ekosustava, recikliranju ugljika i daju informaciju o sve nestalnijim vremenskim prilikama. Istraživači koriste prikupljene informacije za izradu prediktivnih modela globalne ekologije, koja pokreće mnoge ekološke inicijative usmjerene na borbu protiv negativnih učinaka klimatskih promjena i ljudskog utjecaja na prirodu (Unninayar i Olsen, 2008).

## **1.1. Cilj rada**

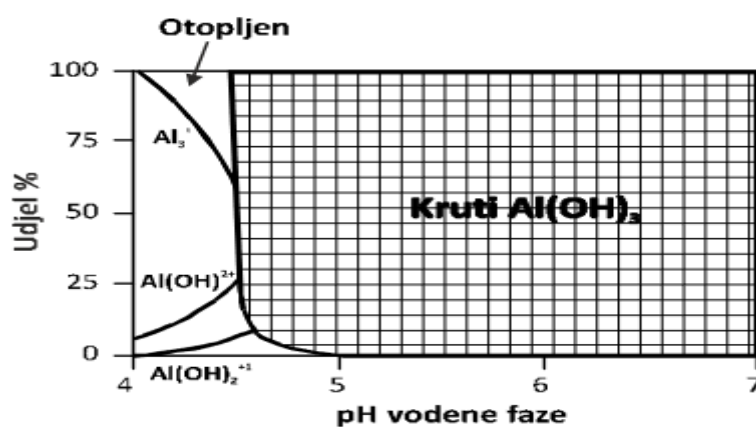
Cilj ovog diplomskog rada je kvantificirati fenotipske promjene nadzemnih organa kukuruza u uvjetima toksičnosti aluminija primjenom multispektralnih analiza.

## 2. Pregled literature

### 2.1. Toksičnost aluminija

Toksičnost aluminija (Al) smatra se glavnim ograničavajućim čimbenikom poljoprivredne proizvodnje na kiselim tlima (Foy, 1988). Reakcija tla (pH) prvenstveno ovisi o količini  $H^+$  i  $OH^-$  iona u otopini tla. Kiselost tla uzrokuju  $H^+$  ioni. Ako su ti ioni prisutni (otopljeni) u vodi tla, tada govorimo o aktivnom aciditetu ili aktualnoj kiselosti (koju mjerimo pH metrom u suspenziji tla s vodom) (Gluhić, 2022). S druge strane, zamjenjivi  $H^+$  ioni vezani na adsorpcijski kompleks tla zajedno sa zamjenjivim  $Al^{3+}$  ionima, predstavljaju potencijalni aciditet ili pasivnu kiselost (Vukadinović, 2021). Razlikuju se dva oblika potencijalnog aciditeta tla, supstitucijski aciditet (izmjenjiva kiselost tla) i hidrolitički aciditet (ukupna kiselost tla). Izmjenjiva kiselost tla nastaje zamjenom slabije vezanih  $H^+$  iona adsorpcijskog kompleksa tla i dijelom na njega vezanih  $Al^{3+}$  i  $Fe^{3+}$  iona s kationima neutralnih soli. Kao rezultat ove supstitucije nastaje HCl, koja povećava kiselost otopine tla (najčešće se mjeri pH metrom u suspenziji tla s 1M otopinom KCl) (Vukadinović, 2021).

Dugo vremena se smatralo da su  $H^+$  ioni uzrok slabijeg rasta i razvoja biljaka na kiselim tlima, ali su brojna istraživanja u otopinama tla i vodenim otopinama iste pH vrijednosti pokazala, da je glavni uzrok ipak povišena koncentracija  $Al^{3+}$  iona. Pri smanjenju pH vrijednosti s 5,0 na 3,5 sadržaj mobilnog aluminija raste i on postaje toksičan (Marschner, 1995) (Slika2.1.1.).



Slika2.1.1 Pristupačnost  $Al^{3+}$  u ovisnosti o pH Izvor:[http://pedologija.com.hr/Literatura/Ishrana\\_bilja\\_III.pdf](http://pedologija.com.hr/Literatura/Ishrana_bilja_III.pdf) .  
Pristup:17.03.2022.

Aluminij u tlu nalazimo u kristalnim rešetkama primarnih i sekundarnih minerala. Niska pH vrijednost tla dovodi do destabilizacije i raspadanja sekundarnih minerala. Također, oslobađaju se Al ioni iz kristalnih rešetki u otopinu tla, gdje dolazi do vezanja na adsorpcijski kompleks i uspostavlja se dinamička ravnoteža sa Al ionima iz otopine tla (Maček, 1992). Prisutnost  $Al^{3+}$  iona, uz debazifikaciju i naknadnu acidifikaciju predstavlja glavni uzrok kiselosti velikog broja tala. Ukupni sadržaj aluminija u tlu varira od 2-8 %, a najveći dio je ugrađen u kristalnu rešetku alumosilikata ili je vezan u seskvioksidima i nema većeg utjecaja na kemizam tla, za razliku od u vodi topivih formi aluminija koji negativno utječu na plodnost tla (Gračanin, 1950). Zbog odnosa naboja i radijusa atoma, upravo aluminij ima najjače polarizirajuće djelovanje od svih često prisutnih elemenata u tlu (Huheey, 1978). Uslijed velikog polarizirajućeg djelovanja dolazi do neprestanih procesa hidrolize pri čemu nastaje aluminijev hidroksid i slobodni  $H^+$  ioni koji povećavaju kiselost (Pavičić, 1990). Vodikovi ioni nastali hidrolizom aluminija istiskuju iz adsorpcijskog kompleksa druge Al ione koji se dalje hidroliziraju i na taj se način pH otopine tla konstantno snižava, dok koncentracija  $Al^{3+}$  iona raste. Povećane koncentracije  $Al^{3+}$  iona u otopini tla (koje dosežu vrijednost do 0,5 mM) uzrokuju brojne anatomske, morfološke i fiziološke promjene kod biljaka, što za posljedicu ima negativan odraz na rast, razvoj i visinu prinosa poljoprivrednih kultura (Maček, 1992). Kukuruz ima visok stupanj tolerancije prema toksičnom djelovanju Al, no ipak uzgojem na kiselom tlu može doći do redukcije visine prinosa za čak 50% (Vuksanović, 2021).

## **2.2. Simptomi toksičnosti aluminija na korijenov sustav**

Toksični efekti  $Al^{3+}$  iona primarno se iskazuju kroz inhibiciju rasta korijena, korijen postaje zadebljao, kratak i lomljiv, te izgledom podsjeća na koralj (Samac i Tesfaye, 2003). Korijenov vrh akumulira više aluminija od ostalih dijelova korijena. Aluminij spriječava diobu stanica u apikalnom meristemu korijena (Kochian, 1995). Površina korijena prekrivena je pukotinama radi štetnog djelovanja  $Al^{3+}$  iona na stanice epiderme i kore korijena. Smanjena je efikasnost primanja hranjiva i vode jer ovakav korijen ima smanjenu površinu, što na kraju dovodi do znatnog smanjenja rasta nadzemnih organa.

Kod biljaka uzgojenih u hranjivim otopinama oštećenja korijena izazivaju slabije usvajanje vode zbog smanjenja osmotskog potencijala stanica korijena, što dovodi do venuća. Rast biljaka uz prisustvo aluminija uzrokuje snižene koncentracije dvovalentnih kationa u korijenu i stabljici, a koncentracija kalija ovisi o biljnoj vrsti i uvjetima uzgoja (Pavičić, 1990). Niske koncentracije hranjiva u biljci mogu biti kao posljedica znatne redukcije korijenovog sustava ili zbog direktnog inhibitornog djelovanja  $Al^{3+}$  iona na primanje hranjiva (Maček, 1992). Rengel i sur. (1989) ukazuju da  $Al^{3+}$  direktno inhibira usvajanje kalcija i magnezija, kao i usvajanje mangana, cinka i željeza. Nasuprot tome, pod utjecajem  $Al^{3+}$  usvajanje  $NH_4^+$  je stimulirano, a  $NO_3^-$  je inhibirano. Toksičan efekt aluminija se očituje i u diobi stanica, jer 6-24 h nakon izlaganja korijena aluminiju dolazi do inhibicije diobe stanica, dok inhibicija rasta korjena nastupa brže, nekoliko minuta do nekoliko sati nakon izlaganja (Čimparová, 2002). Bennet i sur. (1985) navode kako je potrebno oko 12 sati da aluminij stigne do stanica koje se aktivno dijele, što ukazuje da  $Al^{3+}$  ioni mogu djelovati toksično i prije samog ulaska u stanicu. U tom slučaju toksični efekti aluminija proizlaze iz vezivanja  $Al^{3+}$  iona na membranske fosfolipide pri čemu se smanjuje propusnost plazmaleme, tj. smanjuje se vezanje Al iona na membranske proteine koji imaju enzimatsku funkciju ili funkciju ionskih transportera kroz plazmalemu (Rengel i Robinson, 1989). Također,  $Al^{3+}$  ioni izvan stanice već nakon 30 minuta inhibiraju Mg-transportni sustav koji je smješten u plazmalemi (Rengel i Robinson, 1989). Intenzitet odvijanja respiracijskih procesa u stanici je smanjen, što je vjerojatno posljedica smanjenih energetskih potreba stanica zbog reducirane metaboličke aktivnosti pod utjecajem aluminija. Pod utjecajem aluminija inhibirana je sinteza proteina i smanjena je fotosinteza te transport asimilata, također radi oštećenja korijena pod utjecajem aluminija inhibirano je stvaranje citokinina koji se sintetizira u stanicama vrška korijena (Maček, 1992).

### **2.3. Utjecaj aluminija na kukuruz (*Zea mays L.*)**

Po zasijanim površinama kukuruz je treća svjetska kultura, nakon pšenice i riže (Bradarić, 2015). Viljanac (2020) navodi da je u Hrvatskoj kukuruz vodeća kultura po površini zasijanosti koja iznosi oko 500 000 ha, sa prosječnim prinosom od 4,5 t/ha. Zahtjev kukuruza prema pH reakciji tla je u rasponu od 6 do 7,2 (mjereno u vodi).

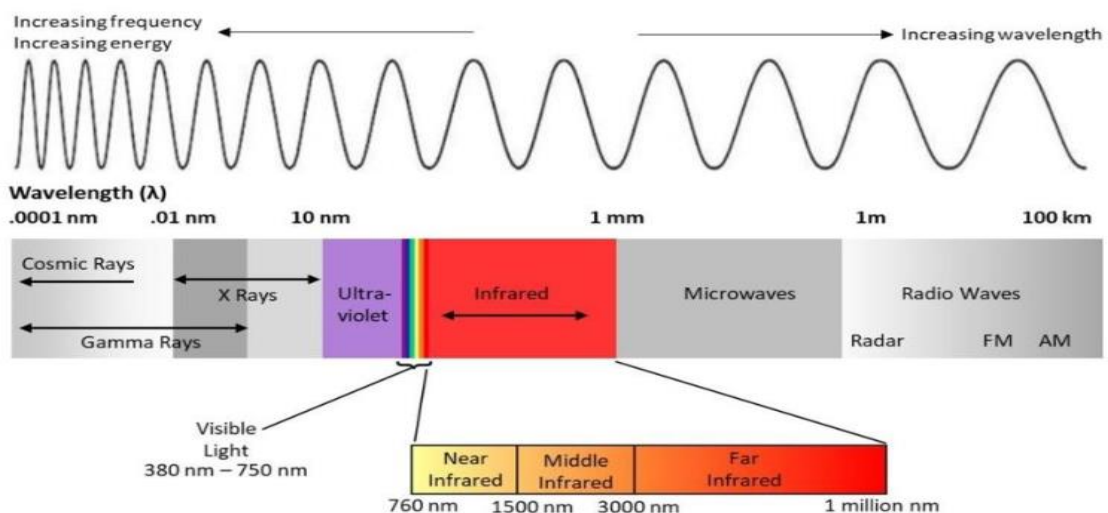


Kukuruz slabo uspijeva u tlu niske ( $<5$ )  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  vrijednosti, jer dolazi do pojave toksičnosti aluminija koji potom reducira razvoj korijena (Mesarović, 2014). Raste broj istraživanja o učincima aluminija na rast i razvoj kukuruza. Primjerice, Ryan i sur. (1993) navode da je u pokusu sa klijancima kukuruza koji je izlagan toksičnim koncentracijama aluminija došlo do inhibicije rasta korijena i to u situaciji kad je aluminij bio primijenjen na vršni dio korijena (2-3 mm). Nasuprot tome, primjena aluminija na druge dijelove nije pokazala utjecaj na rast korijena. Ovo istraživanje ukazuje da je korijenov vrh najosjetljivije mjesto na toksično djelovanje aluminija. Nadalje, Kollmeier i sur. (2000) primjećuju inhibiciju elongacija stanica kod kukuruza osjetljivog na aluminij jer je aluminij inhibirao transport auksina u stanice distalnog dijela elongacijske zone korijena. Nakon 1 h izlaganja korijena Al-osjetljivog hibrida kukuruza aluminiju izazvano je raspadanje mikrotubula i staničnog citoskeleta u distalnoj elongacijskoj zoni vanjskog sloja stanice kore korijena. Istovremeno ne dolazi do nikakvih promjena u strukturi mikrotubula stanica zone rasta korijena, iako dolazi do značajne inhibicije rasta korijena (Lazarević, 2013). Aluminij izaziva i sintezu kaloze kod kukuruza koja se dovodi u vezu sa inhibicijom rasta korijena. Kaloza (polisaharid građen od 1,3  $\beta$ -glukana koji se sintetizira u stanicama tijekom razvoja stanične stijenke ili nastaje kao reakcija na ozljeđivanje stanice) se javlja kao rani simptom toksičnog djelovanja aluminija na korijen kukuruza. Nakon 1h izlaganja Al-osjetljivog hibrida kukuruza koncentraciji od  $90 \mu\text{mol Al L}^{-1}$  dolazi do sinteze i nakupljanja kaloze uzduž cijelog korijenovog vrha, no najviše u vanjskim slojevima kore distalne elongacijske zone korijena. Jedan od simptoma dugotrajnog toksičnog djelovanja aluminija na biljku je inhibicija procesa fotosinteze, tj. aluminij toksično djeluje na pojedinim razinama procesa fotosinteze (Lazarević, 2013). Lindon i sur. (1999) navode da prisutnost aluminija inhibira asimilaciju  $\text{CO}_2$  kod kukuruza. Na tretmanima s više od  $9 \text{ mg Al dm}^{-3}$  dolazi do smanjenja fotosintetskog kapaciteta, transporta elektrona kroz fotosustav I (PSI) i koncentracije citokroma f i b563, dok fotosustav II (PSII) ostaje neoštećen. U listu Al-osjetljive linije kukuruza (B-73) utvrđena je inhibicija enzima delta aminolevulinske kiselinske dehidrataze ( $\delta$ -ALA), smanjenje koncentracije klorofila u listu, te smanjenje koncentracije Fe i Mg (Mihailović i sur., 2008). S obzirom da je aluminij reduktivno neaktivan ne može izravno izazvati oksidaciju lipida ili proteina, no kod Al osjetljivih genotipova kukuruza nakon 24h izlaganja aluminiju izazvana je povećana aktivnost enzima superoksid dismutase (SOD) i glutation peroksidaze (GPX), te je povećana oksidacija proteina (Boscolo i sur., 2003).

Rheinheimer i sur. (1994) navode da u uvjetima toksičnost Al, niska koncentracija fosfora (P) u izdanku biljke smanjuje stopu fotosinteze, što uzrokuje manje nakupljanje ugljikohidrata, što uzrokuje pojavu svjetlijeg lišća s manjom proizvodnjom suhe tvari.

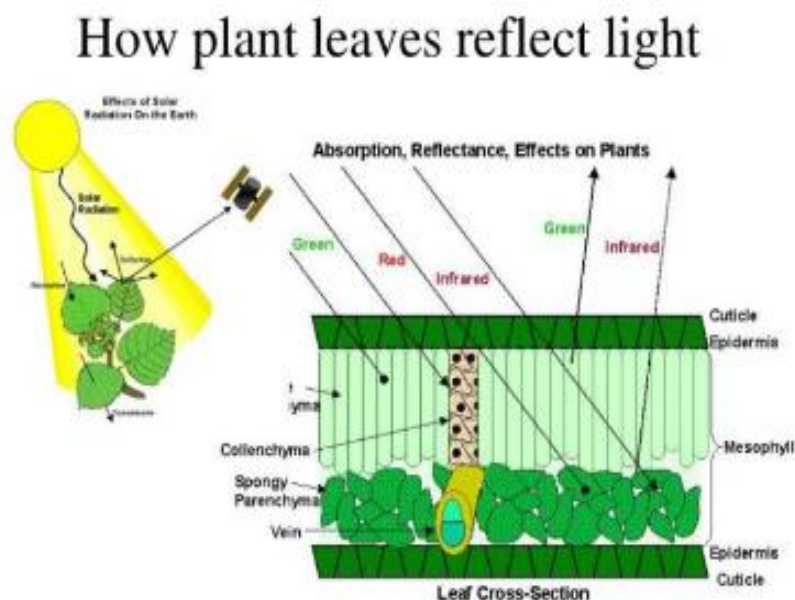
## 2.4. Multipektralne analize

Multispektralne analize su vrlo efikasno sredstvo za procjenu produktivnosti tla i analizu zdravstvenog stanja biljaka (Tomic, 2023). Promatranje zdravlja tla, zdravlja biljke te usjeva golim okom je vrlo ograničeno, zato nam multispektralne analize omogućavaju da vidimo ono što se golim okom ne može primijetiti (Kos i sur., 2021). Multispektralne kamere snimaju ljudskom oku vidljiv dio elektromagnetskog spektra (VIS; 400-700 nm) i nevidljivi, odnosno bliski infracrveni dio spektra (NIR; 700-1.300 nm) (Bernašek i sur., 2014) (Slika 2.4.1.).



Slika 2.4.1.: Prikaz raspona elektromagnetskog spektra koji se koristi za multispektralna istraživanja (<https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1666> ).Pristup: 20.04.2023.

Cilj multispektralnih snimanja biljaka je kvantitativno mjerenje njihovih morfoloških, biokemijskih i fizioloških svojstava, putem interakcije između biljaka i reflektiranih, apsorbiranih ili propuštenih fotona. Svaka komponenta biljnih stanica i tkiva ima specifičnu valnu duljinu apsorpcije, refleksije i propusnosti (Slika 2.4.2.). Li i sur. (2019) navode kako klorofil apsorbira uglavnom fotone u crvenom i plavom spektru vidljive svjetlosti, dok celuloza apsorbira fotone u širokom spektru od 2200 i 2500 nm. Snimanje pri različitim valnim duljinama koristi se za različite aspekte fenotipizacije biljaka. Slike nastale refleksijom u vidljivom dijelu spektra prvenstveno se koriste za mjerenje arhitekture biljke kao što je mjerenje; biomase, površine lišća, boje, dinamike rasta, prinosa i raspodjele plodova, morfologije korijena te procjene bolesti lišća ili odgovor biljke na stres (Li i sur., 2019).



Slika 2.4.2. Primjer refleksije svjetlosti (<https://www.slideserve.com/zanna/hyperspectral-remote-sensing>).Pristup: 20.04.2023.

U današnje vrijeme u poljoprivredi postoje brojni senzori sposobni za mjerenje spektralnih parametara, najčešće multispektralne analize pripadaju sustavima za daljinska istraživanja. Razlikujemo nekoliko vrsta daljinskih senzorskih sustava koji se koriste u poljoprivredi. Najčešći je pasivni sustav, koji detektira elektromagnetsku energiju reflektiranu od biljaka, te koristi Sunce kao najčešći izvor energije. Prednost takvih senzora je u mogućnosti da se mogu montirati na satelite, letjelice ili izravno na poljoprivrednu opremu (Skendžić, 2022).

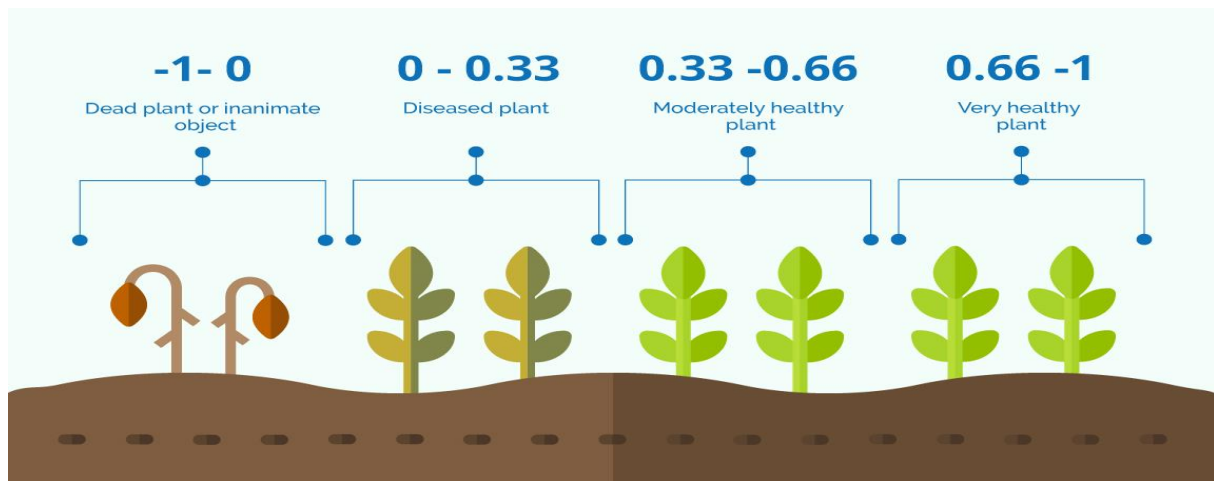
Daljinski senzori razlikuju se po svojoj osjetljivosti na različite valne duljine i veličine objekata koji se mogu "vidjeti". Te se razlike nazivaju spektralna i prostorna razlučivost, i one su ono što karakterizira različite sustave daljinskog istraživanja. Spektralna razlučivost je osjetljivost senzora na različite valne duljine elektromagnetskog spektra, odnosno broj i širinu valnih duljina koje je senzor detektirao. Razlikujemo multispektralne, hiperspektralne i RGB senzore. Senzori pružaju bolju diskriminaciju kako se povećava broj i širina zahvaćenih valnih duljina, pa tako multispektralni koriste do 10 širokih valnih duljina, a hiperspektralni do 100 uskih valnih duljina unutar vidljivog (VIS), bliskog infracrvenog (NIR) i kratkovalnog infracrvenog (SWIR) dijela elektromagnetskog spektra (Haden i Kudenov, 2013.; Zhu i sur., 2018.). U daljinskim istraživanjima s tla koriste se ručni instrumenti koji su korisni za operativno praćenje stresa usjeva abiotičkog i biotičkog podrijetla na manjim površinama. Takva tehnologija ima bolju spektralnu i prostornu razlučivost od zračnih i satelitskih senzora, ali ograničavajući je čimbenik učinkovitost i dugo vrijeme potrebno za analizu velikih površina u usporedbi sa zračnim i satelitskim sensorima koji mogu dati informacije za znatno veće površine odjednom (Wójtowicz i sur., 2016.).

Multispektralni senzori omogućuju i izračun vegetacijskih indeksa. Vegetacijski indeksi mogu opisati zdravstveno stanje poljoprivrednih kultura, a svaki pojedini indeks koristi omjere i razlike između različitih dijelova elektromagnetskog spektra (Jelinek i sur., 2020).

### 3. Vegetacijski indeksi

Vegetacijski indeksi su bezdimenzionalne veličine dobivene na osnovu apsorbirane odnosno reflektirane svjetlosti te su korisni za pregled zdravstvenog stanja biljke. Važni su jer nam daju uvid u trenutno stanje vegetacije te prisutnost stresa kod biljke kao što je; potreba biljke za vodom i različitim hranjivim tvarima, utvrđivanje i prisutnost bolesti i insekata na biljci i dr. (Bugarin, 2022). Vegetacijski indeksi se dobivaju snimanjem spektralnim kamerama, gdje je svaki indeks unaprijed definiran i određen valnim duljinama tj., vrlo su specifični te funkcioniraju samo sa skupovima podataka za koje su dizajnirani. Postoji mnogo različitih vegetacijskih indeksa i svaki koristi različite kombinacije valnih duljina za opisivanje nekog fiziološkog svojstva (Lowe i sur., 2017). Za opće zdravstveno stanje usjeva koristimo normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI), koji je ujedno i jedan od najpoznatijih i najrasprostranjenijih indeksa (Rouse, 1972, Lasaponara i Masini, 2007).

Klorofil u biljkama najviše apsorbira crveni i plavi dio spektra, a reflektira zeleni, te su iz tog razloga zdrave biljke zelene. Osim zelenog dijela spektra, biljke reflektiraju i blisko infracrveni (NIR) dio od 780 nm do 2500 nm. NDVI indeks definiramo kao omjer između blisko infracrvenog (NIR) i vidljivog crvenog (RED) dijela spektra koje biljke reflektiraju. Formula za izračun glasi:  $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$  (Rouse, 1972). Njegov se rezultat kreće između -1 do +1 te što je viša vrijednost to su biljke zdravije, jačeg vigora i bujnosti (Slika 3.1.). Što je biljka zdravija, time će razlika između refleksije ove dvije spektralne vrpce biti veća, u korist blisko infracrvenog dijela, te će za rezultat NDVI indeks pokazivati više vrijednosti. Kod biljke koja pati od stresa prouzrokovanog od strane biotskih ili abiotskih čimbenika povećat će se postotak refleksije crvenog dijela spektra, a smanjiti refleksija NIR-a te će vrijednost NDVI indeksa biti niža (Antognelli, 2018).



Slika 3.1.: NDVI vrijednosti koje prikazuju zdravstveno stanje

biljke(<https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>). Pristup: 01.07.2023.

Visoka ili niska temperatura, salinitet, suša ili poplava, nedostatak hranjivih tvari ili toksičnost metala samo su neki od glavnih abiotičkih stresnih uvjeta s kojima se biljka svakodnevno suočava tijekom svog životnog ciklusa. Za dokazivanje prisutnosti navedenih stresnih uvjeta koristimo točno određene indekse koji nam unutar predviđenih valnih duljina ukazuju na nedostatak ili višak istog (Imran i sur. 2021).

Primjerice, za procjenu stresa suše koristimo nekoliko spektralnih raspona. Na temelju vegetacijskih indeksa izračunatih u omjerima i razlikama između refleksije biljnog materijala na vidljivom (VIS), bliskom infracrvenom (NIR) i kratkovalnom infracrvenom (SWIR) dijelu elektromagnetskog spektra mogu se predvidjeti različita agronomska biljna svojstva povezana sa sušom (El-Hendawy i sur., 2017.). Do sada su dizajnirani brojni indeksi koji se koriste kao indikatori sušnog stresa u usjevima. Za tu su svrhu u literaturi najčešće korišteni indeksi NDVI (eng. Normalized difference vegetation indeks), SR (eng. Simple ratio), PRI (eng. Photochemical reflectance index), WI (eng. Water index), NDWI (eng. Normalized difference water index), WBI (eng. Water band index) i BPI (eng. Brown pigment index) (Sun i sur., 2019.; Wang i sur., 2015).

Nadalje, za detekciju nedostatka dušika koristi se RECI indeks (eng. Red-Edge Chlorophyll Vegetation Index) koji ukazuje na sadržaj klorofila u listovima koji je direktno povezan s količinom dušika u biljkama.

Kako su sadržaj klorofila i dušika povezani, moguće je pomoću njega detektirati nedostatak dušika, jer su takve biljke najčešće blijedo zelene, žute ili bez listova. Raj i sur. (2021) u istraživanjima prikazuju korelaciju između indeksa koji se temelje na spektralnom području crvenog ruba (Red Edge) i sadržaja dušika u usjevu. DCNI (eng. Double peak canopy nitrogen index) je primjer indeksa koji se temelji na dio spektra crvenog ruba gdje su korištene valne duljine od 720, 700 i 670 nm (Raj i sur, 2021.). Osim indeksa DCNI, u literaturi se za ovu svrhu najčešće primjenjuju indeksi: NDVI (eng. Normalized difference vegetation index), CCI (eng. Chlorophyll content index), GNDVI (eng. Green normalized difference vegetation index), SAVI (eng. Soil adjusted vegetation index), OSAVI (eng. Optimized soil adjusted vegetation index) i RVI (eng. Ratio vegetation index) (Yao i sur., 2014., Denis i sur., 2020).

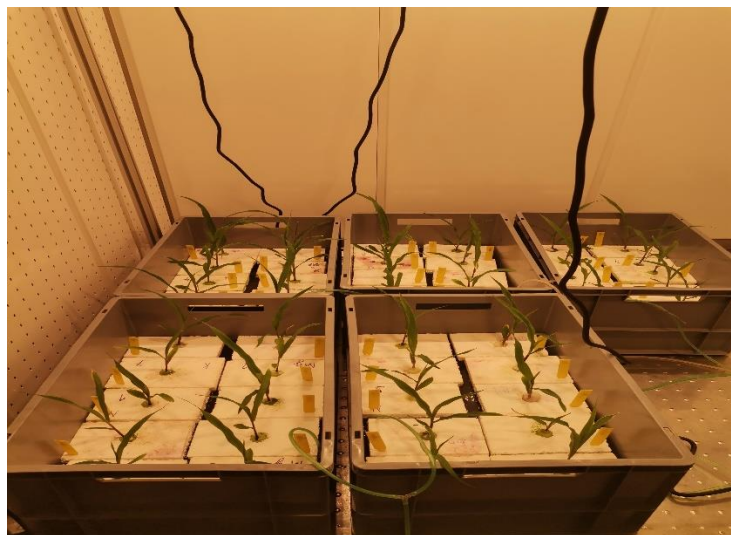
Još jedan široko korišteni indeks je ACI (eng. Anthocyanin content index) koji se koristi u detekciji raznih vrsta stresa kod biljaka. Posebno je koristan kao pH indikator jer ovisno o pH vrijednosti okoline molekule antocijana mijenjaju svoju boju. Antocijanin postaje crvenoružičast u kiselinama (pH 1-6), crvenkasto-ljubičast u neutralnim otopinama (pH 7) i zelen u alkalnim ili bazičnim otopinama (pH 8-14) (Fossen i sur., 1998). Antocijanini su stabilniji pri niskom pH (kiselim uvjetima) što daje crveni pigment, dok viša pH vrijednost antocijanina uzrokuje blijedenje plave boje. Refleksija antocijana najveća je oko 550 nm. Međutim, iste valne duljine reflektira i klorofil. Kako bi se izolirali antocijanini, oduzima se spektralni pojas od 700 nm, koji odražava samo klorofil, a ne antocijanine (<https://yareta.unige.ch/home/detail/bd39d8a6-a88a-4987-b107-86ac01f1e0cc>).

Indeks refleksije antocijana (ARI) koristi refleksije u spektru zelenog i dugovalno crvenog dijela spektra, dok modificirani indeks refleksije antocijana koristi i NIR pojas (Gitelson i sur., 2009). Računamo ga prema formuli:  $ARI = (R_{550})^{-1} - (R_{700})^{-1}$ , gdje ARI predstavlja indeks refleksije antocijana, a R refleksiju (Gitelson i sur., 2001).

## 4. Materijali i metode

### 4.1. Postavljanje pokusa

Presadnice kukuruza (*Zea mays* cv. Armagnac) proizvedene su klijanjem sjemena na konstantno vlaženim klijališnim papirima (Anchor Paper Co., St. Paul MN, USA). Podjednako razvijene biljke su potom izabrane za pokus i presađene u pet plastičnih kada ispunjenih s 30 L hranjive otopine pH 4.0 pripremljene prema recepturi Magnavaca et al. (1987). Biljke su tijekom četiri dana uzgajane u pripremljenim otopinama kako bi se oporavile od stresa presađivanja. Nakon tog perioda dodana je nova hranjiva otopina te su primijenjeni tretmani aluminijske (Al tretmani). Al tretmani pripremljeni su dodavanjem  $\text{AlCl}_3$  u koncentracijama od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$  (kontrola),  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . U svakom tretmanu uzgajano je 10 biljaka kukuruza. Eksperiment je proveden u komori rasta pri uvjetima: temperature od  $25/22^\circ\text{C}$ , 16/8 h fotoperiodu, relativnoj vlazi zraka 65 % i  $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  svjetlosti fotosintetske gustoće toka fotona (PPFD) pružene pomoću NS12 LED lampe (Valoya Oy, Helsinki, Finland) (Slika 4.1.1.). Otopine su mijenjane svaka 3 dana, a pH je umjeravan svakog dana na 4 pomoću klorovodične kiseline (HCl).



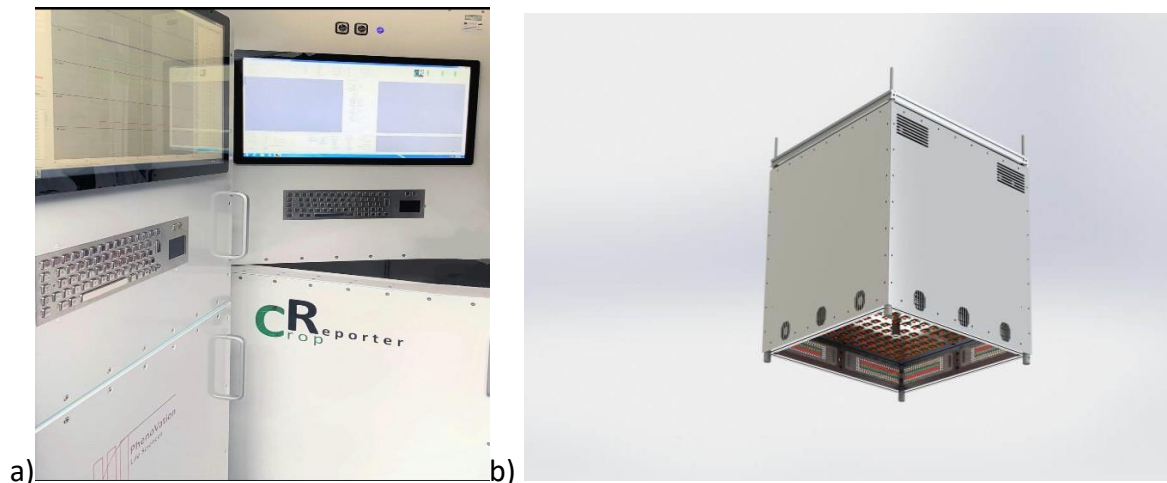
Slika 4.1.1. Al tretmani primijenjeni na biljkama kukuruza (Izvor: M.Strugar)

Pokus je trajao dva tjedna pri čemu je provedeno četiri mjerenja (četvrti, šesti, jedanaesti i trinaesti dan nakon primjene Al tretmana). Za potrebe ovog diplomskog rada prikazat će se vrijednosti posljednjeg mjerenja (13 dana nakon početka tretmana).



## 4.2. Multispektralna mjerenja

Slike spektralne refleksije snimljene su pomoću CropReporter-a (PhenVation, Wageningen, The Netherlands) koristeći aktinično svjetlo intenziteta  $250 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Slika 4.2.1.). Slike su snimljene u spektru refleksije crvene valne duljine ( $R_{\text{Red}}=640 \text{ nm}$ ), zelene valne duljine ( $R_{\text{Green}}=550 \text{ nm}$ ), plave valne duljine ( $R_{\text{Blue}}=475 \text{ nm}$ ), specifično zelene valne duljine ( $R_{\text{SpcGrn}}=510\text{--}590 \text{ nm}$ ), valne duljine koje odgovaraju klorofilu ( $R_{\text{Chl}}=730 \text{ nm}$ ), infracrvene valne duljine ( $R_{\text{NIR}}=769 \text{ nm}$ ) i dugovalne crvene valne duljine ( $R_{\text{FarRed}}=710 \text{ nm}$ ). Također su izračunati različiti vegetacijski indeksi kao što su indeks klorofila, indeks antocijana, normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI), parametara (atributa) boje, ton HUE ( $0\text{--}360^\circ$ ), saturacija ili zasićenost (SAT), i vrijednost tj. svjetlina boje (VAL). Izmjereni multispektralni parametri i vegetacijski indeks prikazani su u tablici 1.



Slika 4.2.1. : CropReporter (Izvor:

a) <https://www.agr.unizg.hr/en/group/355/Department+of+General+Agronomy/>, b)

<https://www.npec.nl/tool/imaging-with-cropreporter/>

Tablica 1: Izmjereni multispektralni parametri s kraticama, valnim duljinama ili jednadžbom za izračun.

R <sub>Red</sub>	Refleksija u crvenom spektru svjetlosti	640 nm
R <sub>Green</sub>	Refleksija u zelenom spektru svjetlosti	550 nm
R <sub>Blue</sub>	Refleksija u plavom spektru svjetlosti	475 nm
R <sub>FarRed</sub>	Refleksija u dalekovalnoj crvenoj svjetlosti	710 nm
R <sub>NIR</sub>	Refleksija u infracrvenoj svjetlosti	769 nm
R <sub>SpcGrn</sub>	Refleksija u specifičnom zelenom spektru svjetlosti	510-590 nm
R <sub>Chl</sub>	Refleksija klorofila	730 nm
HUE	Atribut boje, ton	$HUE = 60 \times [0 + (R_{Green} - R_{Blue}) / (max - min)]$ , if max = R <sub>Red</sub> ; $HUE = 60 \times [2 + (R_{Blue} - R_{Red}) / (max - min)]$ , if max = R <sub>Green</sub> ; $HUE = 60 \times [4 + (R_{Red} - R_{Green}) / (max - min)]$ , if max = R <sub>Blue</sub> . 360 je dodan u slučaju HUE < 0
SAT	Saturacija ili zasićenost	$SAT = (max - min) / (max + min)$ if VAL > 0.5, or $SAT = (max - min) / (2.0 - max - min)$ if VAL < 0.5, pri čemu su min i max izabrani iz R <sub>Red</sub> , R <sub>Green</sub> , R <sub>Blue</sub> .
VAL	Vrijednost/Svjetlina boje	$VAL = (max + min) / 2$ ; pri čemu su min i max izabrani iz R <sub>Red</sub> , R <sub>Green</sub> , R <sub>Blue</sub>
		Vegetacijski indeksi
CHI	Indeks klorofila	$CHI = (R_{Chl}) - 1 - (R_{NIR}) - 1$ (Gitelson et al., 2003)
ARI	Indeks antocijana	$ARI = (R_{Anth}) - 1 - (R_{FarRed}) - 1$ (Gitelson et al., 2001)
NDVI	Normalized difference vegetation index	$NDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})$

### 4.3. Statistička obrada podataka

Statistička analiza provedena je u programu JMP® Pro 16 (SAS Institute. Inc., Cary, NC). Analiza varijance (ANOVA) je provedena prema generalnom linearnom modelu (GLM) pri čemu su tretmani različitih koncentracija aluminija predstavljali fiksne faktore dok su pojedinačne biljke u modelu tretirane kao slučajni faktor. U slučaju statistički značajnog učinka ( $p < 0.05$ ) fiksnih faktora na mjerena svojstva, srednje vrijednosti su uspoređivane Tukey's HSD testom. Rezultati će biti prikazani u obliku tablica analiza varijance (ANOVA) s  $p$  vrijednostima, te grafikonima koji će prikazivati srednje vrijednosti i standardne greške srednjih vrijednosti. Na grafikonima (slikama) statistički značajne razlike između srednjih vrijednosti biti će označene različitim slovima (prema Tukey's HSD testu).

## 5. Rezultati

### 5.1. Rezultati multispektralnih analiza

Tablicom 5.1.1. prikazani su rezultati analize varijance (ANOVA) mjerenih multispektralnih svojstava biljaka kukuruza uzgajanih u tretmanima aluminijske koncentracije od 0  $\mu\text{M dm}^{-3}$  (kontrola), 50  $\mu\text{M dm}^{-3}$ , 100  $\mu\text{M dm}^{-3}$ , 200  $\mu\text{M dm}^{-3}$  i 400  $\mu\text{M dm}^{-3}$ .

Tablica 5.1.1. Tablica analize varijance (ANOVA) za multispektralna svojstva mjerena na biljkama kukuruza uzgajanih u tretmanima aluminijske koncentracije od 0  $\mu\text{M dm}^{-3}$  (kontrola), 50  $\mu\text{M dm}^{-3}$ , 100  $\mu\text{M dm}^{-3}$ , 200  $\mu\text{M dm}^{-3}$  i 400  $\mu\text{M dm}^{-3}$ .

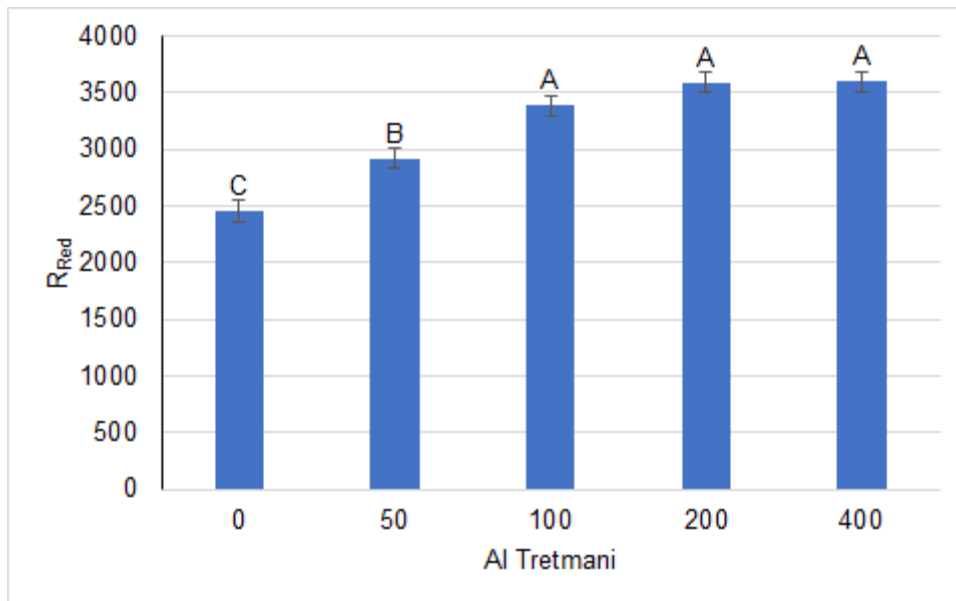
Izvori varijabilnosti	df	Svojstva											
		RRed	RGreen	RBlue	RSpcGrn	RNIR	RFarRed	CHI	ARI	NDVI	HUE	VAL	SAT
Tretman	5	***	***	***	***	n.s.	***	***	***	***	***	***	***

df: broj stupnjeva slobode; p: vjerojatnost prihvaćanja nulte hipoteze da izvor varijabilnosti nema utjecaja na analiziranu vrijednost; Razina signifikantnosti:  $p \leq 0,05 = *$ ,  $p \leq 0,01 = **$ ,  $p \leq 0,001 = ***$ , nije signifikantno = n.s.

Iz tablice ANOVA-e je vidljivo da su se tretmani aluminijske koncentracije statistički značajno razlikovali u svim mjerenim svojstvima, osim u  $R_{\text{NIR}}$ . U sljedećim grafikonima stupcima su prikazane srednje vrijednosti i usporedbe srednjih vrijednosti mjerenih multispektralnih svojstava.

## 5.2. Refleksija u crvenom dijelu spektra ( $R_{Red}$ )

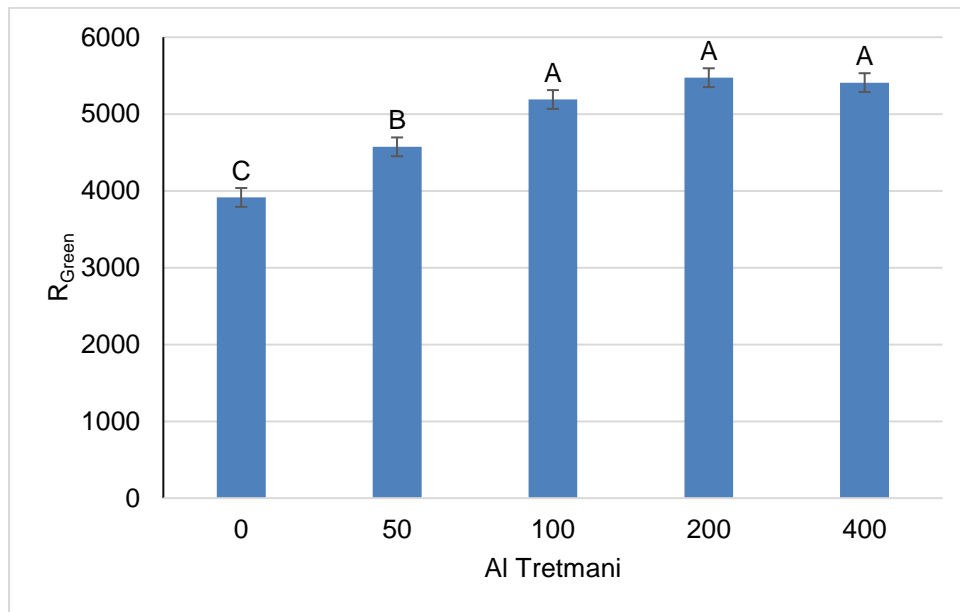
Grafikonom (5.2.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na refleksiju u crvenom dijelu spektra ( $R_{Red}$ ). Iz grafikona je vidljivo da Al tretmani povećavaju refleksiju crvenog dijela spektra, te su se značajno veće vrijednosti  $R_{Red}$  utvrđene kod tretmana 400, 200 i 100 u odnosu na tretmane 50 i 0 (kontrola) te u tretmanu 50 u odnosu na kontrolu. .



Grafikon 5.2.1. Refleksija u crvenom dijelu spektra ( $R_{Red}$ ) s površine lista biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

### 5.3. Refleksija u zelenom dijelu spektra ( $R_{\text{Green}}$ )

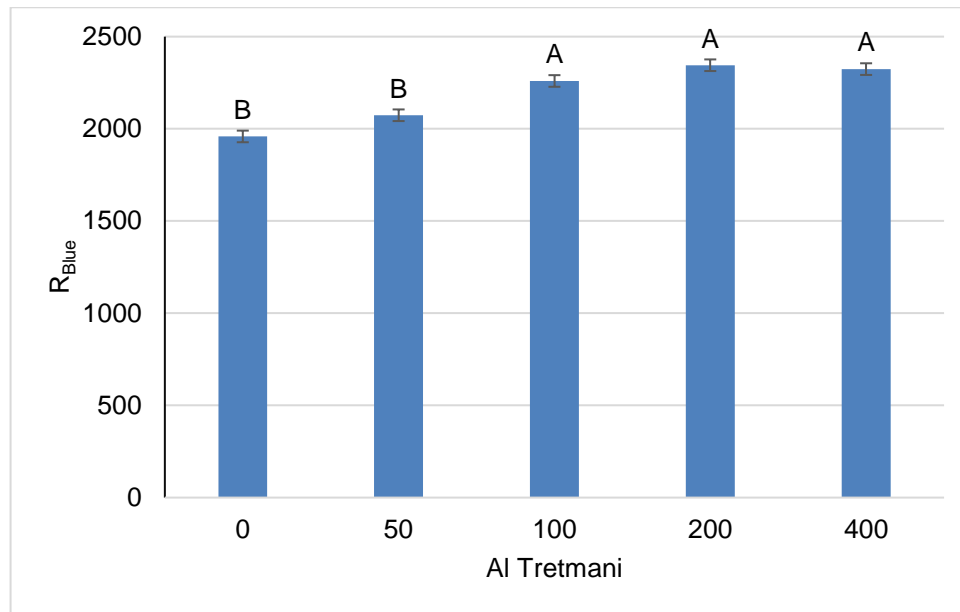
Grafikonom (5.3.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na refleksiju u zelenom dijelu spektra ( $R_{\text{Green}}$ ). Iz grafikona je vidljivo da su se značajno veće vrijednosti  $R_{\text{Green}}$  utvrđene kod tretmana 400, 200 i 100 u odnosu na tretmane 50 i 0 (kontrola) te u tretmanu 50 u odnosu na kontrolu.



Grafikon 5.3.1. Refleksija u zelenom dijelu spektra ( $R_{\text{Green}}$ ) s površine lista biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima s aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 5.4. Refleksija u plavom dijelu spektra ( $R_{Blue}$ )

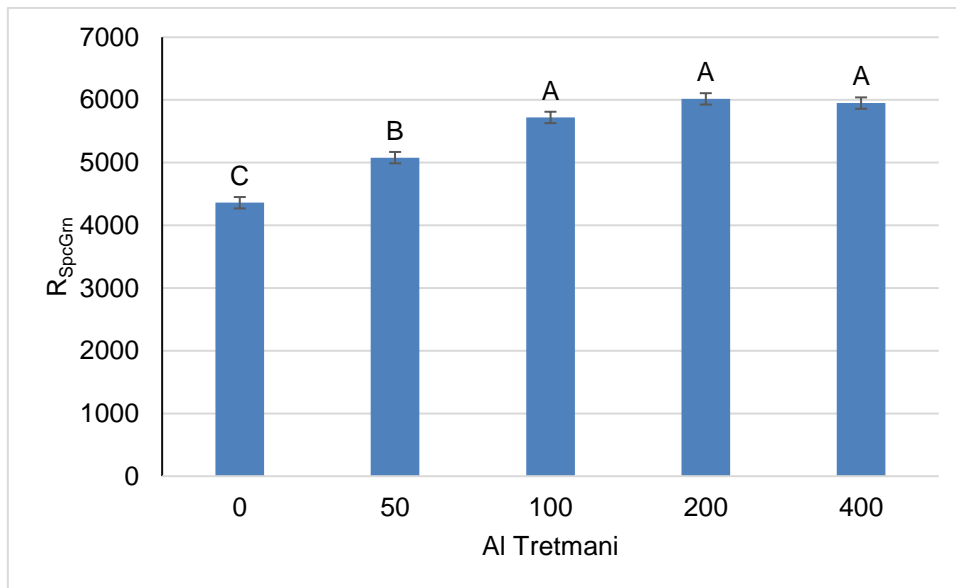
Grafikonom (5.4.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na refleksiju u plavom dijelu spektra ( $R_{Blue}$ ). Iz grafikona je vidljivo da su se značajno veće vrijednosti  $R_{Blue}$  utvrđene kod tretmana 400, 200 i 100 u odnosu na tretmane 50 i 0 (kontrola).



Grafikon 5.4.1. Refleksija u plavom dijelu spektra ( $R_{Blue}$ ) sa površine lista biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 5.5. Refleksija u specifično zelenom dijelu spektra ( $R_{\text{SpcGrn}}$ )

Grafikonom (5.5.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na refleksiju u specifično zelenom dijelu spektra ( $R_{\text{SpcGrn}}$ ). Iz grafikona je vidljivo da su se značajno veće vrijednosti  $R_{\text{SpcGrn}}$  utvrđene kod tretmana 400, 200 i 100 u odnosu na tretmane 50 i 0 (kontrola) te u tretmanu 50 u odnosu na kontrolu.

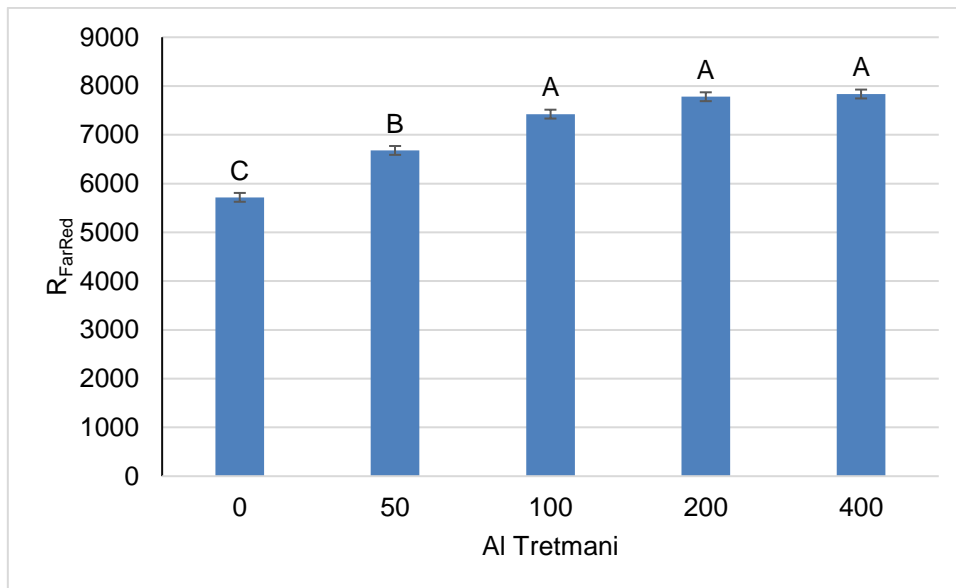


Grafikon 5.5.1. Refleksija u specifično zelenom dijelu spektra ( $R_{\text{SpcGrn}}$ ) sa površine lista biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) ,te u tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.



## 5.6. Refleksija dugovalnog crvenog dijela spektra ( $R_{\text{FarRed}}$ )

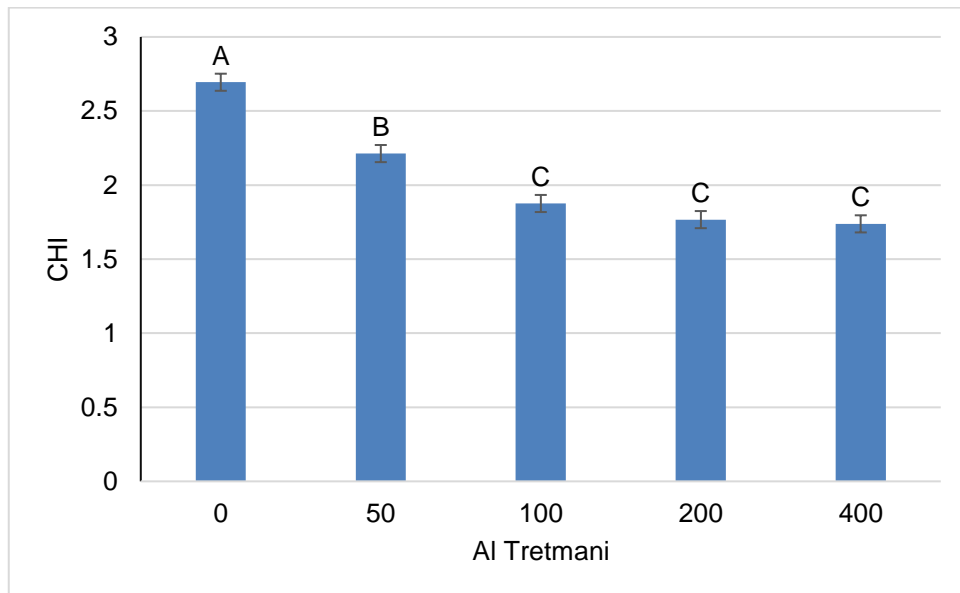
Grafikonom (5.6.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na refleksiju dugovalnog crvenog dijela spektra ( $R_{\text{FarRed}}$ ). Iz grafikona je vidljivo da su se značajno veće vrijednosti  $R_{\text{FarRed}}$  utvrđene kod tretmana 400, 200 i 100 u odnosu na tretmane 50 i 0 (kontrola) te u tretmanu 50 u odnosu na kontrolu.



Grafikon 5.6.1. Refleksija u dugovalno crvenom dijelu spektra ( $R_{\text{FarRed}}$ ) sa površine lista biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) ,te u tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 5.7. Indeks klorofila (CHI)

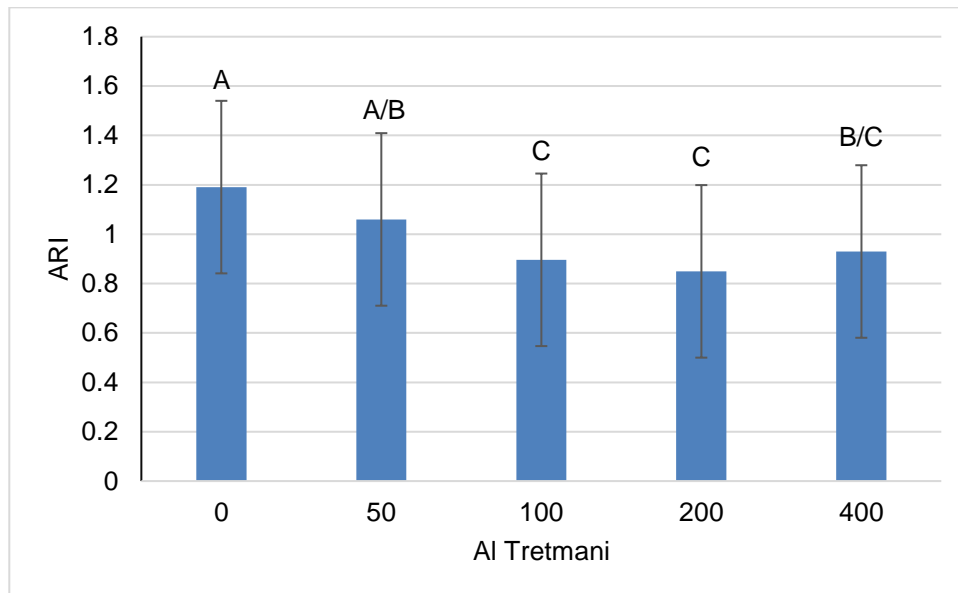
Grafikonom (5.7.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na indeks klorofila (CHI). Iz grafikona je vidljivo da su je tretman kontrole imao najvišu CHI vrijednost, nakon čega ga slijedi tretman 50, dok se tretmani 100, 200 i 400 međusobno ne razlikuju.



Grafikon 5.7.1. Indeks klorofila (CHI) kod biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) ,te u tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 5.8. Indeks antocijana (ARI)

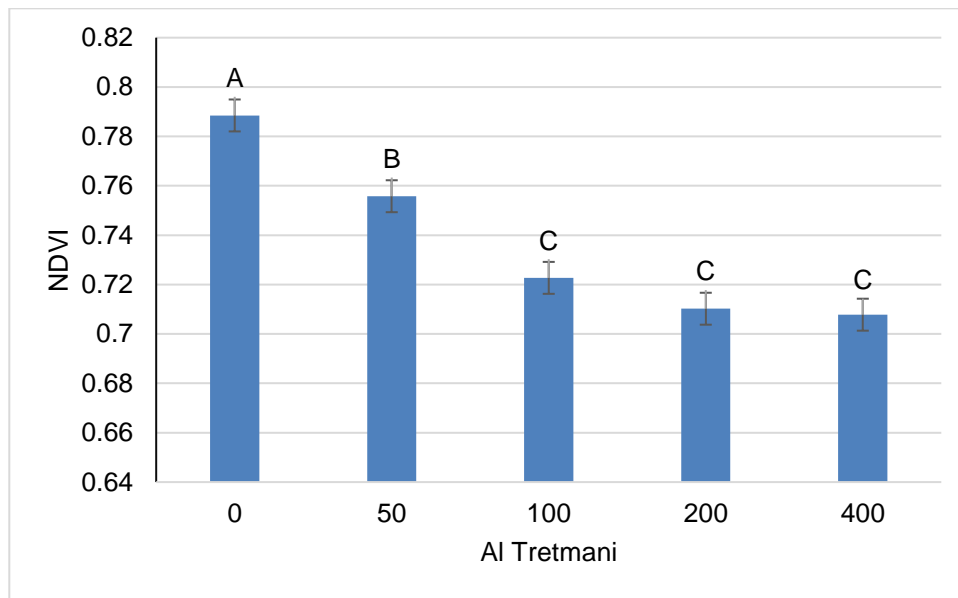
Grafikonom (5.8.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na indeks antocijana (ARI). Iz grafikona je vidljivo da postoji značajna razlika između tretmana kontrole odnosno na tretmane 100, 200 i 400, te između tretmana 50 u odnosu na 100 i 200.



Grafikon 5.8.1. Indeks antocijana (ARI) kod biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima s aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogreška prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 5.9. Normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI)

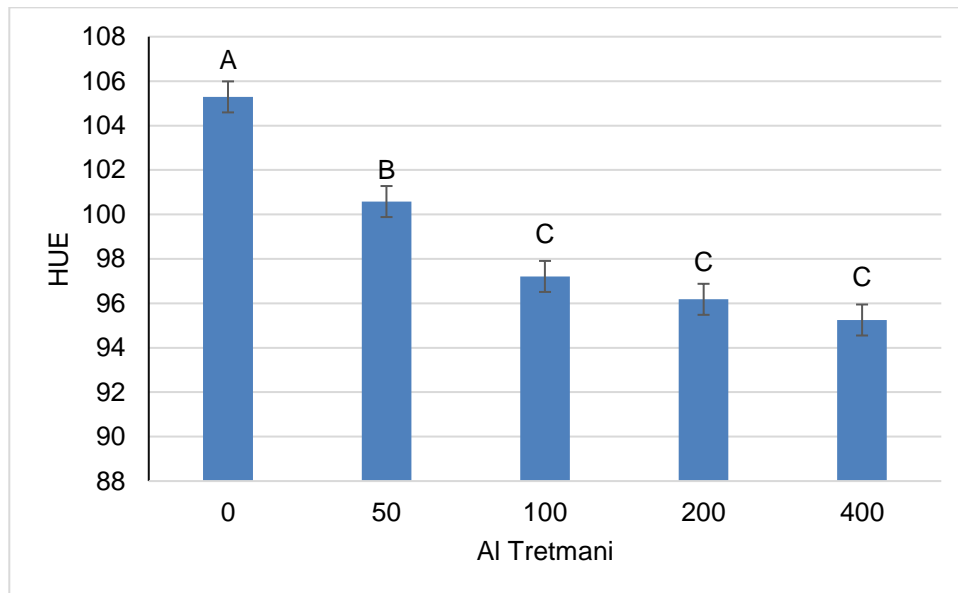
Grafikonom (5.9.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI). Iz grafikona je vidljivo da je tretman kontrole imao najviši NDVI, nakon čega ga slijedi tretman 50, dok se tretmani 100, 200 i 400 međusobno ne razlikuju.



Grafikon 5.9.1. Normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI) kod biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 5.10. Ton boje (HUE)

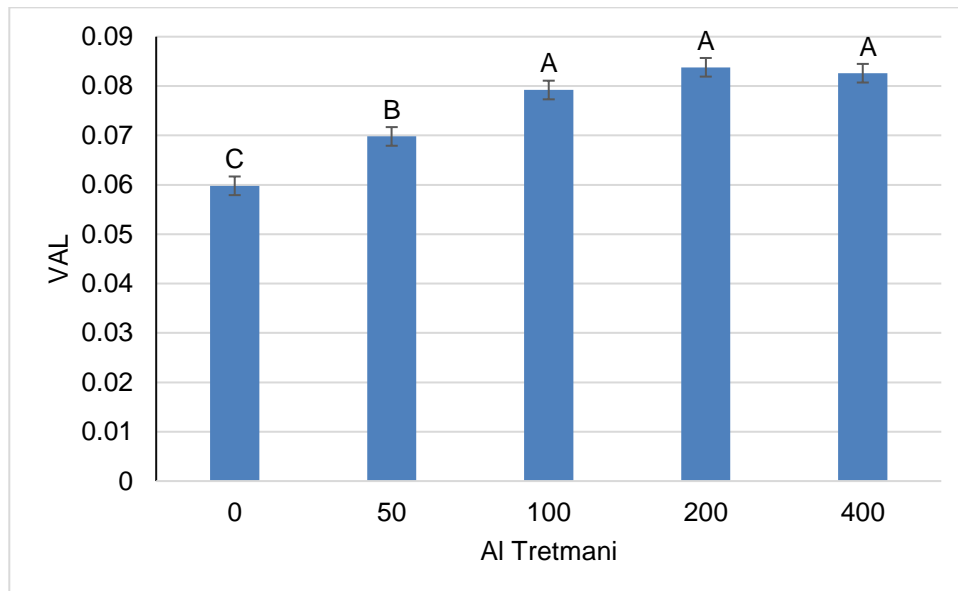
Grafikonom (5.10.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na HUE. Iz grafikona je vidljivo da je tretman kontrole imao najvišu HUE vrijednost, nakon čega ga slijedi tretman 50, dok se tretmani 100, 200 i 400 međusobno ne razlikuju.



Grafikon 5.10.1. Ton boje (HUE) kod biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima s aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

### 5.11. Svjetlina boje (VAL)

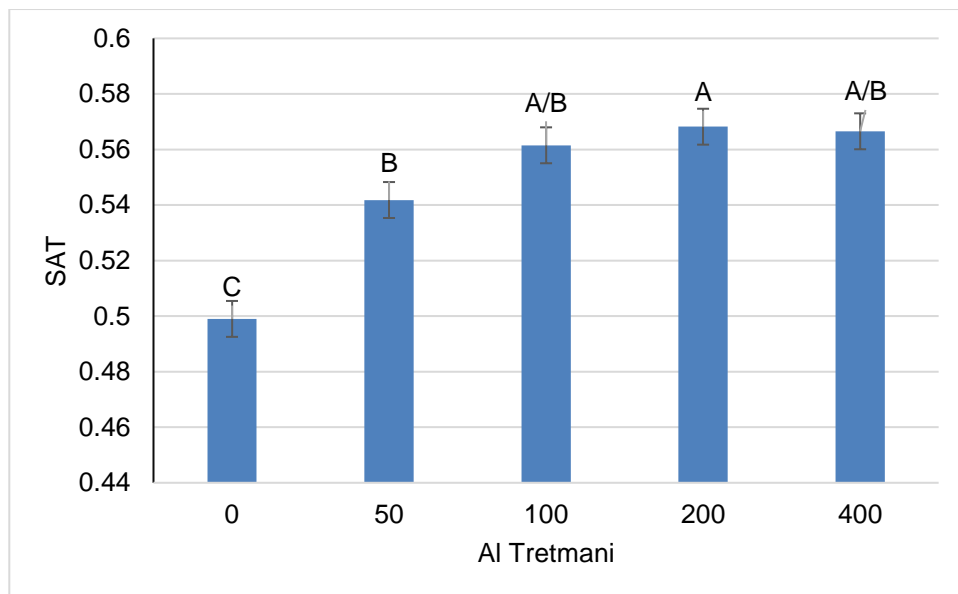
Grafikonom (5.11.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na VAL vrijednost. Iz grafikona je vidljivo da su značajno veće VAL vrijednosti utvrđene kod tretmana 400, 200 i 100 u odnosu na tretmane 50 i 0 (kontrola) te kod tretmana 50 u odnosu na kontrolu.



Grafikon 5.11.1. Svjetlina boje (VAL) kod biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) ,te u tretmanima s aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 5.12. Saturacija (SAT)

Grafikonom (5.12.1.) je prikazan utjecaj tretmana aluminija na saturaciju (SAT). Iz grafikona je vidljivo da tretmani aluminija povećavaju SAT te postoji značajna razlika između tretmana kontrole u odnosu na tretmane 50, 100, 200 i 400. Između tretmana 50, 100 i 400 ne postoji značajna razlika, kao ni između tretmana 100, 200 i 400.



Grafikon 5.12.1. Saturacija (SAT) kod biljaka kukuruza uzgajanih u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima s aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ . Stupcima su prikazane srednje vrijednosti, a trakama pogrešaka prikazane su standardne greške srednjih vrijednosti. Različita slova ukazuju na statistički značajne razlike između biljaka pojedinih tretmana, ista slova ukazuju da nema statistički značajnih razlika.

## 6. Rasprava

Ovaj pokus proveden je s ciljem kvantifikacije fenotipskih promjena nadzemnih organa kukuruza u uvjetima toksičnosti aluminija (Al). Pomoću multispektralnih analiza mjerena su svojstva biljaka kukuruza koje su uzgajane u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) te u tretmanima sa aluminijem u koncentracijama od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ .

Rezultati pokusa pokazuju da su se tretmani Al značajno razlikovali kod svih mjerenih svojstava osim kod  $R_{\text{NIR}}$  gdje se nisu statistički značajno razlikovali. Vidljivo je da u odnosu tretmana kontrole ( $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) i tretmana od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ , kod biljaka uzgajanih u tretmanima od  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ , dolazi do značajnog povećanja refleksije u crvenom ( $R_{\text{Red}}$ ), zelenom ( $R_{\text{Green}}$ ), plavom ( $R_{\text{Blue}}$ ), specifično zelenom ( $R_{\text{SpGreen}}$ ) te u dugovalno crvenom ( $R_{\text{FarRed}}$ ) spektru. Kod vegetacijskih indeksa SAT i VAL primjećujemo uvećane vrijednosti kod tretmana  $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$  u odnosu na tretman kontrole ( $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) i tretman od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ .

Nadalje biljke koje su uzgajane u kontroli (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) i tretmanu od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ , imaju značajno više vrijednosti vegetacijskih indeksa CHI, NDVI, ARI te HUE.

Najmanje reflektirane svjetlosti su imale biljke kontrole i biljke tretmana od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ , što ukazuje na to da su te biljke bile najefikasnije u primanju svjetlosne energije, tj., imale su najveću apsorpciju svjetlosti (Mee i sur., 2017). Manje usvojene valne duljine u  $R_{\text{Blue}}$  spektru negativno utječu na rast i razvoj lista. Ograničava se proizvodnja antioksidansa, smanjena je regulacija otvaranja puči što može dovesti do nekontroliranog gubitaka vode i poremećaja u usvajanju ugljičnog dioksida. Također, kod nekih kultura je moguća pojava mjehurića na lišću, stabiljci i peteljka (Runkle, 2017). Shuyang i Bugbee (2020) navode da su uz  $R_{\text{Blue}}$  spektar za uspješnu fotosintezu i rast biomase jednako važni  $R_{\text{Red}}$  i  $R_{\text{FarRed}}$  spektri.  $R_{\text{Red}}$  spektar pozitivno utječe na poticanje pupanja i cvjetanja biljke, dok  $R_{\text{FarRed}}$  povećava biljnu masu i poboljšava stopu fotosinteze. U svom istraživanju prikazuju povećanje stope fotosinteze u rasponu od 20-30% kod biljaka kukuruza koje su bile izložene  $R_{\text{FarRed}}$  spektru, te utvrđuju pozitivan utjecaj na veličinu lista, duljinu stabljike i konačno na visinu i ukupnu veličinu biljke.



Kod indeksa klorofila (CHI) uslijed djelovanja aluminija u tretmanima sa većom koncentracijom primjećujemo pad sadržaja fotosintetskih pigmenata, što za posljedicu ima smanjenje apsorpcije svjetlosti, odnosno porast refleksije svjetlosti. Aluminijem izazvano smanjenje koncentracije klorofila utvrđeno je kod brojnih biljnih vrsta, primjerice citrusa (Chen i sur., 2005), soje (Milivojević i sur., 2000) sirka (Ohki, 1986; Peixoto i sur., 2002), pšenice (Ohki, 1986), ječma (*Hordeum vulgare* L.) (Abdalla, 2008). Pereira i sur. (2006) navode da do smanjenja koncentracije klorofila dolazi zbog toga što Al inhibira aktivnost enzima delta-aminolevulinske kiselinske dehidrataze ( $\delta$ -ALA), odgovorne za sintezu monopirol porfobilinogena, koji ulazi u strukturu klorofila i citokroma. Mihailović i sur. (2008) utvrđuju inhibiciju  $\delta$ -ALA, smanjenje koncentracije Fe i Mg te smanjenje koncentracije klorofila u listu Al-osjetljive linije kukuruza (B-73). Sličnu situaciju vidimo i kod ostalih mjerenih vegetacijskih indeksa (NDVI, ARI, HUE) gdje su tretmani kontrole i tretman od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$  pokazali više vrijednosti. Prema Bugarinu (2022) veća NDVI vrijednost ukazuje da je razlika između crvenog i infracrvenog spektra veća, što je povezano s jakom fotosintetskom aktivnosti i boljim općim zdravljem biljke. Suprotno tome, kod tretmana sa većim koncentracijama aluminija NDVI vrijednost je bila manja što ukazuje na toksično djelovanje aluminija koji smanjuje fotosintetsku aktivnost. Indeks antocijana (ARI) je bio niži pri tretmanima sa većim sadržajem aluminija. Porast sadržaja antocijana često je povezivan s odgovorom biljke na stres, što ovdje nije bio slučaj. Karačić (2021) slične rezultate smanjenja vrijednosti ARI pri stresu visokih temperatura kod krumpira objašnjava kao posljedicu manjka energije biljaka izloženih stresu.

## 7. Zaključak

Biljke kukuruza koje su uzgajane u tretmanima aluminijem sa višim koncentracijama ( $100 \mu\text{M dm}^{-3}$ ,  $200 \mu\text{M dm}^{-3}$  i  $400 \mu\text{M dm}^{-3}$ ) pokazale su toksično djelovanje što je vidljivo u povećanju refleksije u crvenom ( $R_{\text{Red}}$ ), zelenom ( $R_{\text{Green}}$ ), plavom ( $R_{\text{Blue}}$ ), specifično zelenom ( $R_{\text{SpcGreen}}$ ), te u dugovalno crvenom ( $R_{\text{FarRed}}$ ) spektru. S druge strane, vegetacijski indeksi, indeks sadržaja klorofila (CHI), indeks sadržaja antocijana (ARI), normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI) te HUE pokazali su više vrijednosti u tretmanima sa nižom koncentracijom aluminija, u tretmanu kontrole (od  $0 \mu\text{M dm}^{-3}$ ), te u tretmanima sa aluminijem u koncentraciji od  $50 \mu\text{M dm}^{-3}$ .

U tretmanima sa većim koncentracijama aluminija vidljiv je pad vegetacijskih indeksa, koji je uzrokovan izravnim ili neizravnim (izazvanim oštećenjem korijena te smanjenim primanjem hranjiva i vode) toksičnim učincima aluminija. Pad sadržaja fotosintetskih pigmenata kao posljedicu ima smanjenu apsorpciju svjetlosti. Sa porastom koncentracije aluminija rasla je i refleksija u navedenim spektrima što ukazuje da u uvjetima toksičnosti aluminija dolazi do smanjenja usvajanja svjetlosne energije što će posljedično dovesti do smanjenja fotosintetske aktivnosti. Osim toga smanjenje apsorpcije svjetlosne energije negativno utječe na rast i razvoj lista, ograničena je proizvodnja antioksidansa, smanjena je regulacija otvaranja i zatvaranja puči i javlja se poremećaj kod usvajanja ugljikovog dioksida. Možemo zaključiti da je istraživanje pokazalo toksično djelovanje u tretmanima sa većim koncentracijama aluminija, koje se odrazilo na loše opće zdravlje biljaka.

## 8. Popis literature

1. Abdalla M.M. (2008). Physiological aspects of aluminium toxicity on some metabolic and hormonal contents of *Hordeum vulgare* seedlings. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 2: 549-560.
2. Antognelli S. (2018). NDVI and NDMI vegetation indices: instructions for use. <<https://www.agricolus.com/en/vegetation-indices-ndvi-ndmi/>>.Pristupljeno: 05.07.2023.
3. Ates E., Tekeli A. S. (2005). Forage quality and tetany potential of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) and white clover (*Trifolium repens* L.) mixures. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 39 (1): 97-102.
4. Bannari A. (1995). A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*.
5. Baronti A., Casini F., Lotti S. (1998). Multispectral imaging system for the mapping of pigments in works of art by use of principal-component analysis, *Applied Optics* Vol. 37, Issue 8, pp. 1299–1309.
6. Bennet R.J., Breen C.M., Fey M.V. (1985). The effects of aluminium on root cap function and root development in *Zea mays* L.
7. Bernašek A., Žiljak Vujić J., Uglješić V. (2014). Vizualni i infracrveni spektar za bojila digitalnog tiska. *Polytechnic and design*, 2(2), 163-168.
8. Bolan N. S., Hedley M. J., White R. E. (1991). Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. *Plant and Soil* 134, 53-63.
9. Boscolo P.R.S., Menossi M., Jorge R.A. (2003). Aluminum-induced oxidative stress in maize. *Phytochemistry* 62:181–1.
10. Bouton J.H., Sumner M.E. (1983). Alfaalf, *Medicago sativa* L., in high weathered, acid soils. *Plant and Soil* 74, pp. 431-436.
11. Bradarić I. (2015). Diplomski rad: Razlike između gnojidbe pojedinačnim i kompleksnim gnojivima s ciljem racionalizacije proizvodnje kukuruza, Poljoprivredni fakultet u Osijeku.

12. Bugarin N. (2022). Daljinska istraživanja i računalni vid u analizi slika voćnjaka prikupljenih bespilotnom letjelicom. Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu.
13. Bugarin N. (2022). Kvalifikacijski ispit: Daljinska istraživanja i računalni vid u analizi slika voćnjaka prikupljenih bespilotnom letjelicom. Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu.
14. Chen L.S., Qi Y.P., Jiang H.X., Yang L.T., Yang G.H. (2010). Photosynthesis and photoprotective systems of plants in response to aluminum toxicity. *African Journal of Biotechnology* 9: 9237-9247.
15. Chen L.S., Qi Y.P., Liu X.H. (2005). Effects of aluminum on light energy utilization and photoprotective systems in citrus leaves. *Annals of Botany* 96: 35-41.
16. Čiamporová M. (2002). Morphological and structural responses of plant roots to aluminium at organ, tissue and cellular levels. *Biologia Plantarum* 45: 161–171.
17. Denis A., Desclee B., Migdall S., Hansen H., Bach H., Ott P., Tychon B. (2020). Multispectral remote sensing as a tool to support organic crop certification: assessment of the discrimination level between organic and conventional maize. *Remote Sensing*, 13(1), 117.
18. Dolić N. (2015). Metalurgija aluminijske, Metalurški fakultet, Sisak.
19. El-Hendawy S. E., Hassan W. M., Al-Suhaibani N. A., Schmidhalter U. (2017). Spectral assessment of drought tolerance indices and grain yield in advanced spring wheat lines grown under full and limited water irrigation. *Agricultural Water Management*, 182, 1-12.
20. EOS Data Analytics: CROP monitoring, Chlorophyll Index In Agriculture, CI Overview.< <https://eos.com/make-an-analysis/chlorophyll-index/> >. Pristupljeno: 05.07.2023.
21. Fossen T., Cabrita L., Andersen E. M. (1998). Colour and stability of pure anthocyanins influenced by pH including the alkaline region. Department of Chemistry, University of Bergen, Norway.
22. Foy C. D. (1988). Plant Adaptation to Acid, Aluminium-toxic Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19: 959-987.
23. Foy C. D., Fleming A. L. (1982). Aluminum tolerances of two wheat genotypes related to nitrate reductase activities. *Journal of Plant Nutrition*, 1313-1333.

24. Franjević T. (2014). Diplomski rad: Zakiseljavanje tla uzroci i posljedice (Soil acidification causes and consequences). Agronomski fakultet u Zagrebu.
25. Generalić E. (2022). Rasprostranjenost elemenata, internetska stranica <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=rasprostranjenost+elemenata>  
Pristupljeno:13.03.2023.
26. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* 160.271- 282.
27. Gitelson A.A., Merzlyak M.N, Chivkunova O.B. (2001). Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 74(1): 38–45.
28. Gluhic D. (2022). Važnost pH tla u poljoprivrednoj proizvodnji.< <https://gospodarski.hr/casopis/izdanja-2022/broj-5-od-15-03-2022/vaznost-ph-tla-u-poljoprivrednoj-proizvodnji/>>. Pristupljeno: 21.09.2023.
29. Gračanin M. (1950). Tipological investigations of Vegetation and Soil as a Basis for Land Classification and Evaluation. *Trans., Intern. Congres of Soil Science 1 I: 1-3*, Amsterdam.
30. Hagen N.A., Kudenov M.W. (2013.). Review of snapshot spectral imaging technologies. *Optical Engineering*, 52(9), 090901.
31. Herrick S. (2017). NDVI vs. False NDVI: What's better for analyzing crop health. Pristupljeno: 05.07.2023.
32. Huheey J.E. (1978). *Inorganic Chemistry: Principles of Structure and Reactivity*.
33. Imran Q.M., Falak N., Hussain A. (2021). Abiotic Stress in Plants; Stress Perception to Molecular Response and Role of Biotechnological Tools in Stress Resistance. Department of Agriculture, Pakistan.
34. Jackson S.B., Pinter R.D., Reginato P.J., Hatfield J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.*, 24:45-55.
35. Jelínek Z., Starý K., Kumhálová J., Lukáš J., Maček J. (2020.). Winter wheat, winter rape and poppy crop growth evaluation with the help of remote and proximal sensing measurements.
36. Karačić M. (2021). Diplomski rad: Multispektralne analize krumpira u uvjetima povišenih temperature, Agronomski fakultet u Zagrebu.

37. Kochian L.V. (1995). Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. *Annu. Rev. in plant Physiol. and Mol. Biol.* 46: 237-260.
38. Kollmeier M., Felle H., Horst W.J. (2000). Genotypical differences in aluminum resistance of maize are expressed in the distal part of the transition zone: is reduced basipetal auxin flow involved in inhibition of root elongation by aluminum? *Plant Physiology* 122: 945–956.
39. Kos T., Šikić Z., Zdrilić A., Marcelić Š., Gašparović Pinto A., Zorica M., Franin K., Kolega Š. (2021). Pregledni članak: Tehnike analize vizualnih podataka za rano otkrivanje i klasifikaciju štetnih organizama i biljnog stresa. Odjel za ekologiju, agronomiju i akvakulturu, Sveučilište u Zadru.
40. Kovačević V., Bertić B., Grgić D. (1993). Response of Maize, Barley, Wheat and Soybean to Liming on Acid Soils. *Rostlinna Vyroba* 39 (1),41-52.
41. Lasaponara R., Masini N. (2007). Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery. *Journal of archaeological science.* 34(2);214-221.
42. Lazarević B. (2013). Doktorski rad: Fiziološki mehanizmi otpornosti kultivara krumpira (*Solanum tuberosum* L.) na toksični aluminij, Agronomski fakultet u Zagrebu.
43. Li H., Zhang Y., Lei Y., Antoniuk V., Hu C. (2019). Evaluating different non-destructive estimation methods for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) nitrogen status based on canopy spectrum. *Remote Sensing*, 12(1), 95.
44. Lindon F.C., Barreiro M.J., Ramalho J.C., Lauriano J.A. (1999). Effects of aluminum toxicity on nutrient accumulation in maize shoots: implications on photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition.*, 22: 397-416.
45. Lončarić Z., Rastija D., Karalić K., Popović B., Ivezić V., Lončarić R., (2015). Kalcizacija tala u pograničnome području. U Osijeku.
46. Maček J. (1992). Diplomski rad: Utvrđivanje razlika otpornosti na aluminij kod različitih kultivara *Triticum durum* pšenice, Agronomski fakultet u Zagrebu.
47. Marschner H. (1995). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press Limited, San Diego, USA.
48. McBride M. B., Cherney J. (2004). Molybdenum, sulfur, and other trace elements in farm soils and forages after sewage sludge application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35 (3-4): 517-535.

49. Mee C. Y., Balasundram S. K., Hanif A. H. (2017). Detecting and monitoring plant nutrient stress using remote sensing approaches. *Asian Journal of Plant Sciences*. 16 (1), 1-8.
50. Mesarović S. (2014). Kako povećati prinos silažnog kukuruza, < <https://www.yara.hr/ishrana-biljaka/kukuruz/kako-poveati-prinos-silanog-kukuruz/> >. Pristupljeno:23.03.2023.
51. Mihailović D. T., Lalić B. (2008). Znanstveni rad: Climate change, vulnerability, and adaptation in agriculture the situation in Serbia. Poljoprivredni fakultet , Novi Sad.
52. Mihailović N., Dražić G., Vučinić Z. (2008). Effects of aluminium on photosynthetic performance in Al-sensitive and Al-tolerant maize inbred lines. *Photosynthetica* 46: 476-480.
53. Milivojević D.B., Stojanović D.D., Drinić S.D. (2000). Effects of aluminium on pigments and pigment-protein complexes of soybean. *Biologia Plantarum* 43: 595-597.
54. Monaghan R. M., Morrison J. D., Sinclair A. G. (1998). Soil acidification through carbon cycling in legumes-a pot experiment examining the contributions from white clover, lotus, Caucasian clover, and lucerne. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 41(2): 243-250.
55. Ohki K. (1986). Photosynthesis, chlorophyll and transpiration responses in aluminium stressed wheat and sorghum. *Crop Science* 26: 572–575.
56. Panda A., Pramod J., Kumar A., Bajpai R. (2017). Impact of organic residues application as a soil amendment on response in soil acidity. *International Journal of Chemical Studies*; 5(1): 105-109.
57. Pavičić I. (1990). Diplomski rad: Reakcija kukuruza na mobilni aluminij, Fakultet poljoprivrednih znanosti Sveučilišta u Zagrebu.
58. Peixoto P.H., Da Matta F.M., Cambraia J. (2002). Responses of the photosynthetic apparatus to aluminum stress in two sorghum cultivars. *Journal of Plant Nutrition* 25: 821-832.
59. Peñuelas J, Filella I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status, *Trends in Plant Science*, 3, stranice 151-156.
60. Pereira L.B., Tabaldi L.A., Goncalves J.F., Juckeoski G.O., Pauletto M.M., Weis S.N., Nicoloso F.T., Bocher D., Rocha J.B.T., Schetinger M.R.C. (2006). Effect of

- aluminum on  $\delta$ -aminolevulinic acid dehydratase (ALA-D) and the development of cucumber (*Cucumis sativus*). *Environmental and Experimental Botany* 57: 106-115.
61. Precision Hawk (2022). Beyond the edge –Multispectral sensors <<https://www.precisionhawk.com/sensors/advanced-sensors-and-data-collection/multispectral>>.Pristupljeno: 02.05.2023.
62. Qin J., Chao C., Kim M., Lu R., Burks T. (2013). Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *J. Food Eng*, Vol. 18, 2:157-171.
63. Rengel Z., Robinson D.L. (1989). Aluminium and plant age effects on adsorption of cations in the Donnan free space of ryegrass roots. *Plant and Soil* 116: 223–227.
64. Rengel Z., Robinson D.L. (1989). Aluminum Effects on growth and macronutrient uptake by annual ryegrass.
65. Rheinheimer D.S., Ernani P.R., Santos S.P., Kaminski J. (1994). Znanstveni članak: Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation.
66. Rouse Jr J.W. (1972). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md,371.
67. Runkle E. (2017). Effects of Blue Light on Plants. <<https://gpnmag.com/article/effects-of-blue-light-on-plants/>>. Pristupljeno :06.09.2023.
68. Ryan P.R., Ditomaso J.M., Kochian L.V. (1993). Aluminum toxicity in roots: An investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. *Journal of Experimental Botany* 44:437–446.
69. Samac D.A., Tesfaye M. (2003). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* volume 75, pages 189–207 Plant improvement for tolerance to aluminium in acid soils.
70. Skendžić S. (2022). Vegetacijski indeksi: Alati za procjenu stranja usjeva pšenice, Agronomski fakultet u Zagrebu.
71. Solie W.R., Johnson J.B., Stone G.V., Lukina M.L., Thomason E.W., Schepers J. S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93(1), 131-138.



72. Sun H., Feng M., Xiao L., Yang W., Wang C., Jia X., Li D. (2019.). Assessment of plant water status in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) based on canopy spectral indices. *PLoS One*, 14(6), e0216890.
73. Tomac M. (2023). Završni rad: Konstruiranje i prototipiranje mehanizma bespilotne letjelice za sijanje sjemena. University of Applied Science.
74. Unninayar S., Olsen L. (2008.). Monitoring, Observations, and Remote Sensing – Global Dimensions. *Encyclopedia of Ecology*, pp. 2425–2446.
75. Van der Merwea D., Burchfieldb D. R., Wittb T. D, Pricec K. P., Shardad A. (2020). Drones in agriculture.
76. Viljanac V. (2020). Diplomski rad: Reakcija ozime pšenice i kukuruza na reduciranu obradu pseudoglejnog tla. Fakultet agrobiotehničkih znanosti u Osijeku.
77. Vukadinović V, Vukadinović V. (2016). Tlo, gnojidba i prinosi. Što uspješan poljoprivrednik mora znati o tlu, usjevima, gnojidbi i tvorbi prinosa. U Osijeku.
78. Vukadinović V. (2021). Power point prezentacija:Elementi ishrane bilja. U Osijeku < [https://tlo-i-biljka.eu/Gnojidba/Elementi\\_ishrane\\_bilja.pdf](https://tlo-i-biljka.eu/Gnojidba/Elementi_ishrane_bilja.pdf) >. Pristupljeno: 13.03.2023.
79. Vuksanović Lj. (2021). Prinosi kukuruza je manji na kiselim zemljištima < <https://agroinfonet.com/poljoprivreda/ratarstvo/prinos-kukuruza-na-kiselim-zemljistima/> >. Pristupljeno: 22.03.2023.
80. Wang X., Zhao C., Guo N., Li Y., Jian S., Yu K. (2015.). Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in loessplateau semiarid regions. *Spectroscopy Letters*, 48(7), 492-498.
81. Wójtowicz M., Wójtowicz A., Piekarczyk J. (2016). Application of remote sensing methods in agriculture. *Communications in Biometry and Crop Science*, 11(1), 31-50.
82. Yareta (2022). The consultation and archive portal for Geneva's institutions of higher learning. ARI Anthocyanin Reflectance Index < <https://yareta.unige.ch/home/detail/bd39d8a6-a88a-4987-b107-86ac01f1e0cc> >. Pristupljeno: 03.07.2023.
83. Zhang X. G., Humphries A., Auricht G. (2007). Genetic variability and inheritance of aluminium tolerance as indicated by long root regrowth in lucerne (*Medicago sativa* L.). *Euphytica*, 157(1-2): 177-184.

84. Zhen S., Bugbee B. (2020). Substituting Far-Red for Traditionally Defined Photosynthetic. Photons Results in Equal Canopy Quantum Yield for CO<sub>2</sub> Fixation and Increased Photon Capture During Long-Term Studies: Implications for Re-Defining PAR. *Front. Plant Sci.* 11:581156. doi: 10.3389/fpls.2020.581156.
85. Zhu L., Suomalainen J., Liu J., Hyypä J., Kaartinen H., Haggren H. (2018.). A review: Remote sensing sensors. Multi-purposeful application of geospatial data, 19.

## **Životopis**

Mirna Strugar rođena je 16.09.1992. godine u Zagrebu. Pohađala je osnovnu školu Vjenceslava Novaka u Zagrebu, nakon čega upisuje Prehrambeno-tehnološku školu sa smjerom Tehničar nutricionist u Zagrebu. Godine 2011. upisuje preddiplomski studij Agroekologije na Agronomskom fakultetu u Zagrebu. Preddiplomski studij završava 2017. Godine obranom završnog rada na temu „Koralji (Antochozoa) u Jadranskom moru “ te iste godine upisuje diplomski studij Agroekologije na Agronomskom fakultetu u Zagrebu.