

UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKOG POLJA NA KLIJAVOST SJEMENA

Slavko RUPČIĆ

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Kneza Trpimira 2B, Osijek, Hrvatska
slavko.rupcic@ferit.hr

Vanja MANDRIĆ

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Kneza Trpimira 2B, Osijek, Hrvatska
vanja.mandric@ferit.hr

Miroslav LISJAK

Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Vladimira Preloga 1, Osijek, Hrvatska
miroslav.lisjak@fazos.hr

Vinko ŽOLDIN

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Kneza Trpimira 2B, Osijek, Hrvatska
vinko.zoldin@ferit.hr

<https://dx.doi.org/10.21857/mzvckptone9>

Sažetak

Elektromagnetsko (EM) zračenje nalazi se svuda oko nas i utječe na biljni i životinjski svijet koji se pod njegovim utjecajem mijenjao i razvijao, a tijekom evolucijskog procesa i prilagodio parametrima (intenzitetu i frekvenciji) elektromagnetskog polja nastalog uslijed prirodnih izvora. Ta polja zajedno s ostalim okolišnim parametrima (vlaga, temperatura, izloženost sunčevoj energiji, i drugi) predstavljaju okruženje u kojem se živi svijet razvija. Ako je to okruženje „ugodno“ (optimalni uvjeti), tada je i razvoj poticajan. Odstupanje od optimalne razine zračenja uzrokuje stres i utječe na daljnji razvoj organizama. Sjeme biljaka početna je faza razvoja biljke koja je prva pod utjecajem tog zračenja. Kvaliteta sjemena poljoprivredne kulture jedan je od važnijih čimbenika formiranja prinosa jer u velikoj mjeri određuje rast, razvoj i prinos biljaka. Različite kemijske, fizikalne i fiziološke metode rabe se u svrhu poboljšanja kvalitete sjemena. Utjecajem na biokemijske i fiziološke procese u sjemenkama može se pridonijeti ranijem klijanju, boljem zdravlju sadnica te bržem rastu i razvoju u kasnijoj fazi razvoja biljaka. Elektromagnetsko zračenje sjemena visokofrekvencijskim (VF) monoharmonijskim signalom pripada fizikalnim metodama tretiranja čiji su optimalni uvjeti još uvijek nepoznati. Polazna je hipoteza istraživanja da elektromagnetsko zračenje utječe na ukupnu klijavost, energiju klijanja te masu klijanca. U istraživanju se nastoje utvrditi optimalni elektromagnetski uvjeti rasta i razvoja biljaka na nivou klijavosti sjemena. U tu svrhu provedena su tretiranja sjemena

suncokreta (*Helianthus annuus* L.) sorte „Luka“ (proizvođač: Poljoprivredni institut Osijek) monoharmonijskim signalom definiranog intenziteta u frekvencijskom opsegu 0,8 – 8 GHz. Sjeme nije predtretirano niskim temperaturama ni tretirano protiv patogena pri sjetvi. Nakon četvrtog dana eksperimenta najbolji rezultat ostvaren je zračenjem od 60 minuta pri frekvenciji 1 GHz, snagom zračenja –10 dBm, gdje je kod 63,12% klijanaca utvrđeno visokorazvijeno sekundarno korijenje. Drugi statistički najznačajniji rezultat dobiven je u trećoj varijanti gdje je pri frekvenciji 2 GHz i snazi zračenja –3 dBm u trajanju od 30 minuta zabilježeno 60,97% klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem. Nadalje, nakon desetog dana eksperimenta kod već navedenog uzorka s 63,12% visokorazvijenog sekundarnog korijenja, utvrđena je i najveća masa korijena klijanaca od 0,0988 g, premda se ona nije statistički značajno razlikovala od kontrolnog uzorka. S obzirom na rezultate pri frekvenciji 1 GHz, u idućem ciklusu odabran je frekvencijski spektar 0,8 – 1,15 GHz i intenziteta zračenja $-3,5 \pm 0,5$ dBm u trajanju od 30 minuta. Nakon četvrtog dana čak sedam od osam zračenih uzoraka imalo je više od 44% klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem. Desetog dana eksperimenta utvrđena je najveća masa korijena klijanaca od 0,0987 g pri frekvenciji 1 GHz sa statistički značajnom razlikom naspram kontrolnog uzorka. Rezultati ukazuju na to da predtretiranje sjemena VF elektromagnetskim poljem može značajno utjecati na klijavost, brži razvoj sekundarnog korijenja te povećanje njegove mase, što može rezultirati bržim razvojem biljke u njezinu prirodnom okružju zbog lakšeg dolaska do hranjivih tvari iz tla. U budućim istraživanjima ispitivat će se aktivnost enzima te konduktivnost EM poljem zračenih uzoraka (poljoprivrednih kultura). Nadalje, istraživanje će se, u budućem radu, proširiti i na druge važne poljoprivredne kulture (npr. pšenica, kukuruz, uljana repica i druge).

Ključne riječi: klijavost, sjeme, elektromagnetsko polje, sekundarni korijen, poljoprivredna kultura

Ključna poruka rada: Elektromagnetsko zračenje utječe na ukupnu klijavost, energiju klijanja te masu klijanca sjemena poljoprivrednih kultura. U istraživanju se nastoje utvrditi optimalni elektromagnetski uvjeti rasta i razvoja biljaka na nivou klijavosti sjemena. U tu svrhu provedena su tretiranja sjemena suncokreta (*Helianthus annuus* L.) monoharmonijskim signalom definiranog intenziteta u frekvencijskom opsegu 0,8 – 8 GHz.

1. Uvod

Živi organizmi su električki neutralni prema okruženju, ali u svom sastavu sadrže nabijene atome (ione), polarizirane molekule i unutarnja elektromagnetska polja koja se podvrgavaju zakonima elektromagnetizma i termodinamike. Tako je utvrđeno, a danas je vrlo dobro poznato, da svaka živa stanica posjeduje transmembranski potencijal u

mirovanju. Ako takav potencijal ne postoji to ukazuje na to da je stanica nefunkcionalna (mrtva stanica). Djelovanje vanjskog EM polja na sustav (organizam), unutar kojeg postoje naboji i unutarnja polja, uvjetovati će promjenu broja, pozicije (polarizacija/prepolarizacija) i dinamike kretanja naboja kao i tih unutarnjih polja što će, nadalje, uvjetovati i promjenu funkcioniranja tog sustava (organizma).

Elektromagnetsko (EM) zračenje je neionizirajuće zračenje koje predstavlja promjenu elektromagnetskog polja u nekom prostoru nastalo uslijed gibanja/promjene električnog naboja.

Od samog nastanka života, živi organizmi su izloženi nekoj vrsti neionizirajućeg zračenja i ono uz ionizirajuće zračenje, temperaturu, tlak zraka i vlagu predstavlja okolišne utjecaje u kojima se živi svijet razvija. Kao i drugi od navedenih utjecaja i ovo zračenje može po svojim karakteristikama biti poticajno za rast i razvoj živih organizama ili pak djelovati negativno i onemogućavati taj rast i razvoj. Djelovanje nekog vanjskog elektromagnetskog polja na žive organizme utječe na sve procese koji se odvijaju u njima potičući ili ometajući njihov rad. Stoga je važno poznavati utjecaj EM polja na žive organizme u svakom od njihovih procesa. Za budući biljni organizam izuzetno je važan proces klijanja koji određuje daljnji razvoj same biljke te je fokus ovog istraživanja upravo na klijavosti i energiji klijanja sjemenke pod utjecajem EM polja širokog opsega frekvencija i razina. Ovaj rad bavi se djelovanjem neionizirajućeg zračenja na sjemenke suncokreta s ciljem utvrđivanja njegovog utjecaja na klijavost sjemena, a posredno i rast, razvoj te prinos te gospodarske kulture sa ciljem utvrđivanje frekvencije i nivoa EM polja koje je poticajno za klijavost sjemena suncokreta.

Foster (2000) u svom istraživanju daje pregled toplinskih i netoplinških mehanizama interakcije između radiofrekvencijskih (RF) polja i bioloških sustava. R Das i suradnici (2005.) ispituju reakciju rasta korijena sjemena *Cicuta arvensis* (slanutka) u prisutnosti magnetskog i električnog polja kada se primjenjuju zasebno. Utvrđuju da rast duljine korijena postaje maksimalan tijekom izlaganja jakosti magnetskog polja od 0,88 T tijekom 80 minuta. Primjena električnog polja visokog intenziteta (1,5 kV/cm) rast korijena se smanjuje u odnosu na kontrolni uzorak. Fedorov i Bakharev (2010) istražuju utjecaj THz zračenja sjemena pšenice na razdoblje imbibicije sjemena te je utvrđeno da je najizraženiji učinak uočen je nakon dva sata zračenja. Nadalje THz zračenje uzrokuje povećanje duljine stabljike i metlice, mase metlice, broja zrna u metlici i sadržaja proteina u zrnu. Radzevičius i suradnici (2013) prezentiraju istraživanje učinka zračenja mikrovalovima (9,3 GHz) velike snage (HPM) različitog trajanja izlaganja na klijavost sjemena različitog povrća. Istraživanje je obuhvatilo različite kulture: rotkvice, rajčica (tri sorte) i mrkvu. Utvrđeno je da je sjeme rotkvice izloženo mikrovalovima od 9,3 GHz imalo je veću klijavost i energiju klijanja za 6% u usporedbi s neozračenim sjemenke. Izloženost sjemena imala je a značajan pozitivan učinak na suhu masu mladica presadnica rajčice i visinu presadnica rajčice i rotkvice, ali negativno utjecao na visinu sadnice mrkve. Zračenje sjemena imalo je značajan pozitivan učinak utjecaj na količinu klorofila a, klorofila b,

klorofila a + b i karotenoida u svježim presadnicama rajčice mase, ali je suprotan učinak utvrđen u svježoj masi presadnica mrkve. Payez i suradnici (2013) provode istraživanje i prezentiraju rezultate istraživanja provedena na sjemenu pšenice (*Triticum aestivum* L. cv. Kavir) koje je potopljeno u vodi preko noći i zatim tretirano s ili bez statičkog magnetskog polja od 30 mT (SMF) i elektromagnetskog polja od 10 kHz (EMF) tijekom 4 dana, svakih 5 h. Izloženost oba magnetska polja nije utjecala na postotak klijavosti sjemena, ali je povećala brzinu klijanja u usporedbi s kontrolnom skupinom. Tretiranje EMF-om značajno je smanjilo duljinu klijanaca, a potom i indeks vitalnosti I, dok SMF nije imao utjecaja na ove parametre. Oba tretmana značajno su povećala indeks vitalnosti II u usporedbi s kontrolnom skupinom. Rezultati sugeriraju promotivne učinke EMF-a na integritet membrane i karakteristike rasta klijanaca pšenice. Vian i suradnici (2016) daju pregled uočenih efekata nakon izlaganja biljaka elektromagnetskim (EM) poljima visokih frekvencija (VF) na staničnoj, molekularnoj te razini cijele biljke. Uočeno je da se promjene ne događaju samo u tkivima koja su izravno izložena, već i sustavno u udaljenim tkivima, a pri tome se ova VF EM polja tretiraju kao neštetni čimbenik okoliša koji izaziva promjene u metabolizmu biljaka.

Niz autora IV nacionalne konferencije Bisceglia i drugi: Interakcija između elektromagnetskih polja i biosustava, (Milano, 4. – 6. srpnja 2016.) donosi svoja istraživanja na području: mikrovalnog zračenja za ekološki prihvatljivu poljoprivredu primjena; utjecaju EM polja na klijanje i rast biljaka – pregled dosadašnjih istraživanja u tom području; mikrovalnog zračenja za zaštitu bilja te izloženosti sjemena ELF MF - učinci na klijanje i rast. Posljednje navedeno istraživanje Masse i suradnika (2016), bavilo se učincima djelovanja magnetskog polja na sjemenke *Eruca sativa* i *Lactuca sativa*, a istraživanje je obuhvatilo utvrđivanje klijavosti sjemena i brzinu izlučivanja klijanaca. Magnetsko polje značajno povećava (25%) klijavost *L. sativa*, ali ne utječe na produženje korijena *L. sativa* i *E. sativa*. Zaključeno je da bi ove tehnike imale mali utjecaj na okoliš, a istovremeno mogu pridonijeti povećanju prinosa usjeva. Ambrosio D. T. na istoj konferenciji donosi istraživanje učinaka izlaganja sjemena i klica običnog graha mikrovalnom polju od 2,45 GHz. Abu-Elsaoud (2017) sa suradnicima objavljuje rezultate utjecaja mikrovalnog zračenja na klijanje, rast klijanaca i curenje elektrolita ječma te pri tome zaključuje da mikrovalno zračenje pozitivne i negativne učinke na rast i klijanje biljaka, a da bi se osigurao samo pozitivni učinak potrebno je osigurati kontrolirane doze zračenja uz minimiziranje vremena izlaganja sjemena mikrovalnom zračenju. Grupa autora na čelu sa Sadowskom U. 2018. objavljuje istraživanje utjecaj promjenjivog elektromagnetskog polja na energiju i klijavost kanabisa uz zaključak da promjenjivo elektromagnetsko polje s vrijednošću indukcije od 50 i 70 mT ne uzrokuje značajnije promjene energije i sposobnost klijavosti sjemena konoplje u odnosu na kontrolni uzorak, ali rezultira rastom klijanaca bez razvojnih nedostataka. Konefał-Janocha M. i suradnici 2018. provode istraživanje utjecaja stacionarnih i promjenjivih elektromagnetskih polja na klijanje i rani rast rotkvice uz kontrolirane vrijednosti magnetske indukcije u opsegu od 8-20 mT. Pri tome su utvrđeni različiti efekti od koji su najbolji pozitivni rezultati



dobivenih kod uzorka koji je bio izložen stacionarnom magnetskom polju intenziteta od 20 mT tijekom 12 min. Istraživanje utjecaja elektromagnetskog visokofrekvencijskog polja na klijavost sjemena suncokreta provedeno je 2020. kroz diplomski rad Žoldin (uz mentorstvo Rupčić) donosi dio rezultata koji se verificiraju i kroz ovaj rad, a nakon sustavno provedene statističke obrade pokazuje negativne i pozitivne učinke EM polja na klijavost, energiju klijanja te dimenzije klijanca (masa, duljina) pri čemu je kontrolirana vrijednost jakosti električnog polja i vremena izlaganja. Najnovija istraživanja iz ovog područja objavljena su 2023. godine i donose rezultate tretiranja sjemena elektromagnetskim poljem u sedam polusrodnih obitelji srebrne breze (Česniene i suradnici, 2023) te stimulaciju sjemena soje korištenjem ekološki prihvatljivih magnetskih i električnih polja (Dziwulska-Hunek i suradnici, 2023). Ovi rezultati otkrivaju složenost odgovora biljaka na stres izazvan tretiranjem sjemena stresorima (kao što je EM polje). Prethodno navedena istraživanja pokazuju da biljke mogu pozitivno i negativno reagirati na izloženost EM zračenju u smislu svog klijanja, rasta, razvoja i prinosa.

Ovaj članak je podijeljen u četiri poglavlja koja se odnose na pregled literature i rezultata prethodnih istraživanja, opis polja kojim se tretira biljni uzorak, detaljan opis tretiranja biouzoraka, analiza rezultata mjerenja i tretiranja sjemenki te zaključka.

2. Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetsko (EM) zračenje predstavlja energiju koja se propagira brzinom svjetlosti oscilirajućim električnim i magnetskim poljem, a može se opisati EM valom. EM zračenje obuhvaća široki spektar frekvencija u rasponu nekoliko Hz do nekoliko THz. Za potrebe ovog istraživanja mjerenja su provedena u frekvencijskom području radio spektra u rasponu od 800 MHz do 8 GHz.

3. Tretiranje sjemena izmjeničnim elektromagnetskim poljem

Elektromagnetski val propagira se kroz različite materijale koji su elektromagnetski definirani sljedećim parametrima: permitivnost, permeabilnost te električna vodljivost σ . Pri prolasku kroz materijal EM val mijenja svoje intenzitet, smjer i pravac, a ako je materijal nelinearna tada može mijenjati i frekvenciju. Glavni cilj ovog istraživanja jest utvrditi u kojoj mjeri jakost električnog polja EM vala (s promjenom frekvencije, iznosa snage i trajanja izlaganja tom polju) utječe na klijavost, energiju klijanja te karakteristike klijanca sjemenke suncokreta, sorte 'Luka'. Ova sorta proizvedena je na Poljoprivrednom institutu u Osijeku, a uzorci prije izlaganja EM valu nisu prethodno tretirani (niti niskom temperaturom niti protiv patogena pri sjetvi). Ukupna količina sjemenki koje su izložene EM polju je 3150 sjemenki (podijeljene su u grupe po 150 sjemenki).

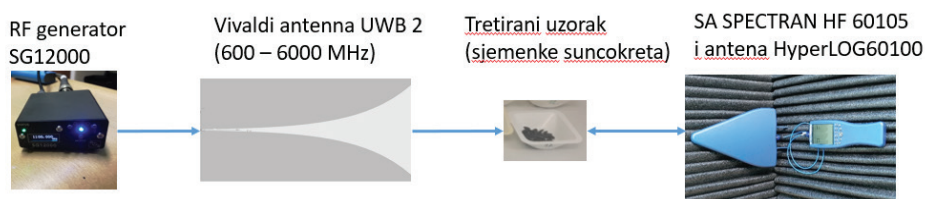
Tretiranje EM valom se provodi u tri faze:

- ▶ PRVA FAZA: Tretiranje sjemena suncokreta VF električnim poljem (provedena u Laboratoriju za VF mjerenja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku);
- ▶ DRUGA FAZA: Klijanje tretiranog sjemena u inkubatoru i praćenje (mjerenje) bitnih parametara klijanaca (provedena na Fakultetu agrobiotehničkih znanosti u Osijeku).
- ▶ TREĆA FAZA: Sušenje i mjerenje vlage te parametara klijanaca (provedena na Fakultetu agrobiotehničkih znanosti u Osijeku).

3.1. PRVA FAZA: Tretiranje sjemenki suncokreta izmjeničnim EM poljem

Visokofrekvencijski pobudni signal frekvencijskog opsega od 0,8 do 8 GHz i snage od 0 do -12 dBm, generiran je RF generatorom SG12000, DS Instruments, te je preko širokopojasne Vivaldi antene UWB 2 (600 MHz – 6 GHz) usmjerena na PVC posudu sa po 50 sjemenki suncokreta (tretirani uzorci). Nivo jakosti električnog polja kontroliran je spektralnim analizatorom SPECTRAN HF 60105, Aaronia i antenom HyperLOG 60100, Aaronia (Slika 1 i Slika 2).

Slika 1. Shematski prikaz tretiranja sjemenki suncokreta izmjeničnim EM poljem

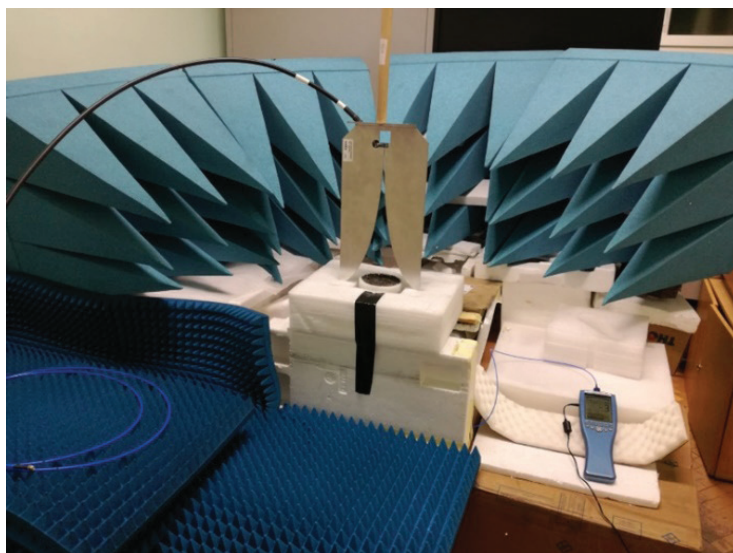


Provedene su četiri varijante (V1, V2, V3 i V4 – oznake na dijagramima) tretiranja sjemena (zračenja) u ovisnosti o parametrima vezanim uz nivo i frekvenciju EM polja te trajanje tretiranja:

- ▶ V1. Snaga: -10 dBm; trajanje zračenja 30 minuta; promjenjiva frekvencija u opsegu od 1–8 GHz;
- ▶ V2. Snaga: -10 dBm; trajanje zračenja 60 minuta; promjenjiva frekvencija u opsegu od 1–8 GHz;
- ▶ V3. Snaga: $-3,5 \pm 0,5$ dBm; trajanje zračenja 30 minuta; promjenjiva frekvencija u opsegu od 0,8–1,15 GHz sa koracima od 0,05 GHz;
- ▶ V4. Frekvencija 2 GHz; trajanje zračenja 30 minuta; snaga: 0, -3, -6 i -12 dBm.

Prva faza - tretiranje sjemenki poljem, kao što je navedeno, provedena je u četiri varijante – koje se razlikuju po parametrima zračenja: frekvencije, snage zračenja (na poziciji sjemena) i vremenu izloženosti sjemena EM polju. U svakoj od varijanti, jedna od veličina je promjenjiva, dok su ostale dvije konstantne. Prva varijanta predstavlja izloženost sjemena polju uz promjenu frekvencije signala u rasponu od 1 – 8 GHz (snaga polja iznosi – 10 dBm i vrijeme zračenja 30 min). Druga je također, vezana uz promjenu frekvencije u rasponu od 1-8 GHz i trajanje tretiranja od 60 min. Nakon druge varijante, uočeni su značajni rezultati u frekventijskom području od 0,8 do 1,15 GHz, te je rezolucija mjerenja fokusirana upravo na ovo frekventijsko područje (korak od 0,05 GHz) pa je treća varijanta provedena u tom frekventijskom opsegu uz trajanje tretmana od 30 minuta. Četvrta i posljednja varijanta predstavlja promjenu snage zračenja (0 do – 12 dBm) uz konstantnu frekvenciju 2 GHz i trajanje zračenja 30 min. Za sve faze i varijante tretiranja postojao je kontrolni uzorak sjemena („kontrola“ na dijagramima u nastavku) koji nije tretiran EM poljem.

Slika 2. Zračenje sjemenki suncokreta izmjeničnim električnim poljem u rasponu frekvencija od 0,8 do 8 GHz (Vivaldi antena UWB 2 (izvora EM polja) i mjerni set u okruženju apsorbera)



3.2. DRUGA FAZA: Klijanje tretiranih sjemenki u inkubatoru

Druga faza eksperimenta provedena je u laboratoriju Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku. Ova faza obuhvaća podjelu prethodno tretiranih 150 sjemenki u 3 laboratorijska uzorka (svaki po 50 sjemenki), nakon čega se uzorak stavlja na filtar papir prethodno navlažen destiliranom vodom (200 ml), postavlja u PVC vrećice u inkubator. Tretman u inkubatoru obuhvaća dva vremensko-temperaturna perioda: 8 h i temperaturu 30 °C (dan) te 16 h uz temperaturu 20 °C (noć) (Slika 3).

Slika 3. *Klijanje tretiranih i kontrolnih sjemenki u inkubatoru uz kontrolirane uvjete (dan predstavlja trajanje 8 h i temperaturu 30 °C, a noć je postavljena na trajanje 16 h uz temperaturu 20 °C): a) sjemenke u inkubatoru (svaki uzorka od 150 sjemenki podijeljen u tri grupe od po 50 sjemenki); b) iskljajali uzorak (četvrti dan) od 50 sjemenki.*

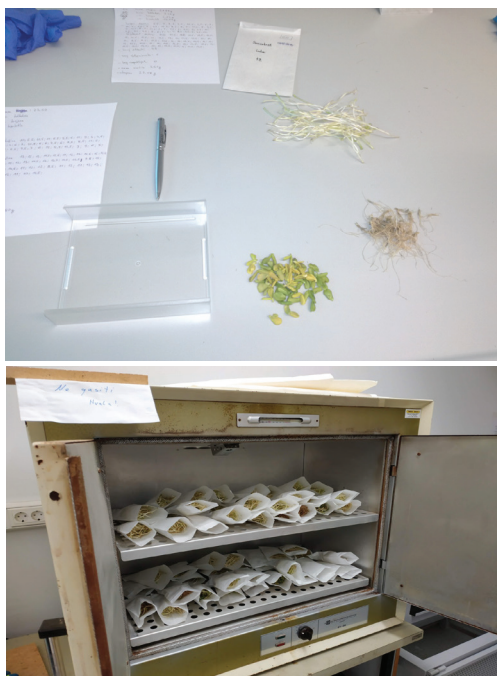


3.3. TREĆA FAZA: Mjerenja (mase, duljine pojedinih dijelova biljke) te vlage i suhe tvari

Nakon trodnevnog klijanja sjemena u inkubatoru, četvrti dan određuje se energija klijanja (EK) (broj proklijalog sjemena uz razlikovanje zdravog i deformiranog klijanca te neprokljalo sjeme). Posebno je utvrđen broj klijanaca sa vidljivo razvijenim sekundarnim korijenjem (SeK). Tretman u inkubatoru se nastavlja, a nakon desetog dana ponovo se utvrđuje broj zdravih razvijenih klijanaca na kojima je utvrđena standardna klijavost (SK) te izmjerena duljina svake biljke i korijena.

Nakon toga, odvaja se hipokotil, kotiledon i korijen uz određivanje mase sva tri dijela. Posljednji korak podrazumijeva je postavljanje sušenja svježje tvari u sušioniku 48 sati na temperaturi od 90 °C i sušenja mjerenje mase suhe tvari (Slika 4).

Slika 4. *Klijanje tretiranih i kontrolnih sjemenki u inkubatoru uz kontrolirane uvjete (dan predstavlja trajanje 8 h i temperaturu 30 °C, a noć je postavljena na trajanje 16 h uz temperaturu 20 °C): a) sjemenke u inkubatoru (svaki uzorka od 150 sjemenki podijeljen u tri grupe od po 50 sjemenki); b) isključili uzorak (četvrti dan) od 50 sjemenki.*

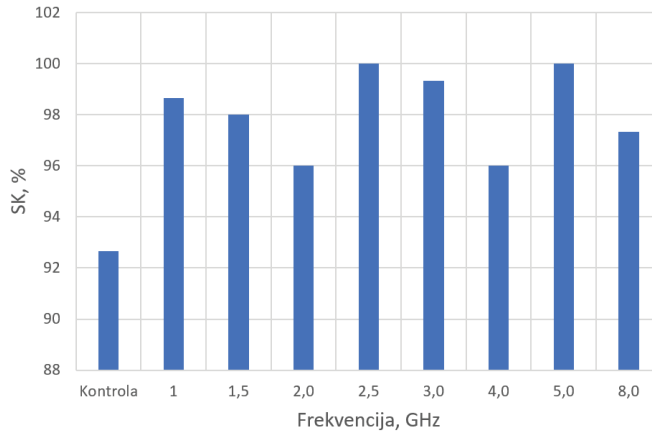


4. Rezultati mjerenja i analiza rezultata

U ovom poglavlju prezentirani su najvažniji rezultati mjerenja provedenih u ovom istraživanju. Rezultati su razvrstani po ispitnim parametrima tako da obuhvaćaju devet najvažnijih parametara pri tretmanu sjemenki suncokreta sorte „Luka“ izmjeničnim EM poljem i to: standardnu klijavost (SK), energiju klijanja (EK), postotak deformiranih klijanaca (DK), postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem (SeK), mase korijena po biljci (mKOR), masu hipokotila (mHIP), masu kotiledona (mKOT), duljinu korijena (DK) te duljinu hipokotila (DH). sjemenki suncokreta. Osim ovih parametara istraživanje je obuhvatilo i niz drugih parametara (masa svježe tvari, masa suhe tvari, postotak vlage i drugi) koji nisu prezentirani u ovom radu budući da nisu pokazali značajne razlike u odnosu na kontrolirani uzorak. Osim izmjerenih vrijednosti na navedenim slikama (rezultatima) navedeni su i parametri statističkih testova značajnosti: F-testa i Tukey HSD testa. Mjerenja parametara vezanih uz klijavost (SK- standardna klijavost; EK – energija klijanja; DK – postotak deformiranih klijanaca; SeK – postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem) prikazani su na slikama 5. do 8. pokazuju postojanje značajnosti rezultata u odnosu na kontrolni uzorak kod sva četiri prezentirana parametra (detaljnije u slijedećem poglavlju) pri čemu se može zaključiti da je utjecaj izlaganja EM polju poticajan. Mjerenja parametara vezanih uz dimenzije klijanaca (mKOR- masa korijena; mHIP – masa hipokotila; mKOT – masa kotiledona; LK i LH – duljina korijena i hipokotila) prikazani su na slikama 9. i 10. pokazuju postojanje značajnosti rezultata u odnosu na kontrolni uzorak kod svih pet prezentirana parametra (detaljnije u slijedećem poglavlju) pri čemu se može zaključiti da je utjecaj izlaganja EM polju ima utjecaja na ove parametre, ali je kod jednog broja parametara taj utjecaj poticajan (LH) dok kod drugog nije (mKOR, mHIP i LK) (detaljnije u slijedećem poglavlju). Statistički parametri pokazuju da na parametar mKOT nema značajnog utjecaja EM polja. Svi prikazani rezultati jesu usrednjena vrijednost tri mjerenja.

Slika 5. Postotak standardne klijavosti SK: a) V1. (30 min) b) F-test i Tukey HSD test za V1.; c) V2. (60 min); d) F-test i Tukey HSD test za V2.; e) V3. (frek. od 0.8 – 1.15 GHz) f) F-test i p za V3.; g) V4. (P od 0 do -12 dBm); h) F-test i Tukey HSD test za V4.

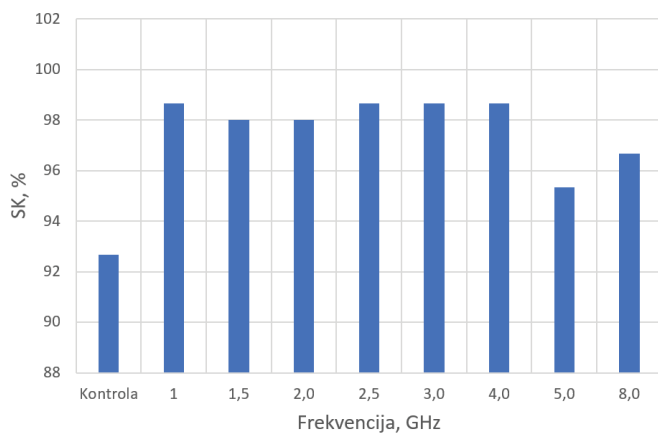
a)



b)

f , GHz	SK, %	Parovi tretmana	PHSD(SK)
1,00	98,67	K – 1,0	0,0268
1,50	98,00	K – 1,5	0,0619
2,00	96,00	K – 2,0	0,4904
2,50	100,00	K – 2,5	0,0047
3,00	99,33	K – 3,0	0,0113
4,00	96,00	K – 4,0	0,4904
5,00	100,00	K – 5,0	0,0048
8,00	97,33	K – 8,0	0,1356
Kontrola	92,67		
F-test p	4,59 0,0035		

c)

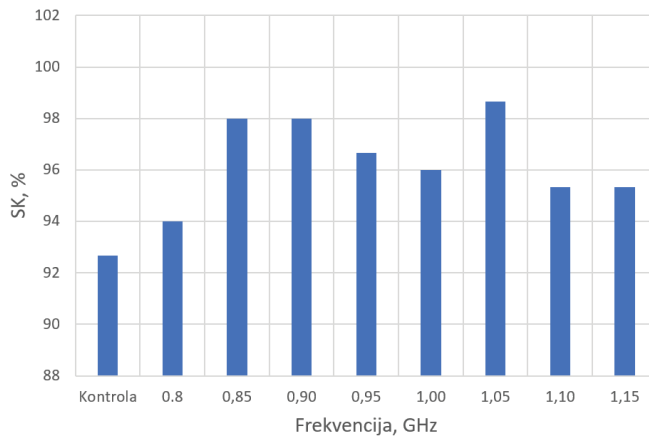


d)

f , GHz	SK, %	Parovi tretmana	PHSD(SK)
1,00	98,67	K – 1,0	0,1774
1,50	98,00	K – 1,5	0,2931
2,00	98,00	K – 2,0	0,2931
2,50	98,67	K – 2,5	0,1774
3,00	98,67	K – 3,0	0,1774
4,00	98,67	K – 4,0	0,1774
5,00	95,33	K – 5,0	0,8999
8,00	96,67	K – 8,0	0,6213
Kontrola	92,67		
F-test	1,88		
p	0,1267		



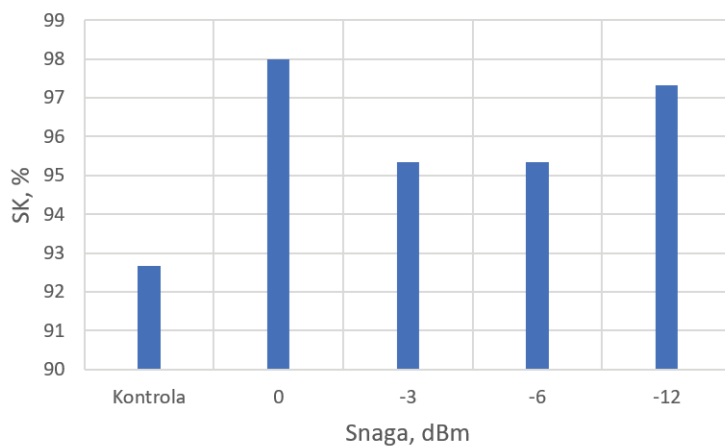
e)



f)

f , GHz	SK, %	Parovi tretmana	PHSD(SK)
0,80	94,00	K – 0,80	0,8999
0,85	98,00	K – 0,85	0,4100
0,90	98,00	K – 0,90	0,4100
0.95	96,67	K – 0,95	0,7153
1,00	96,00	K – 1,00	0,8669
1,05	98,67	K – 1,05	0,2720
1,10	95,33	K – 1,10	0,8999
1,15	95,33	K – 1,15	0,8999
Kontrola	92,67		
F-test p	1,42 0,2527		

g)

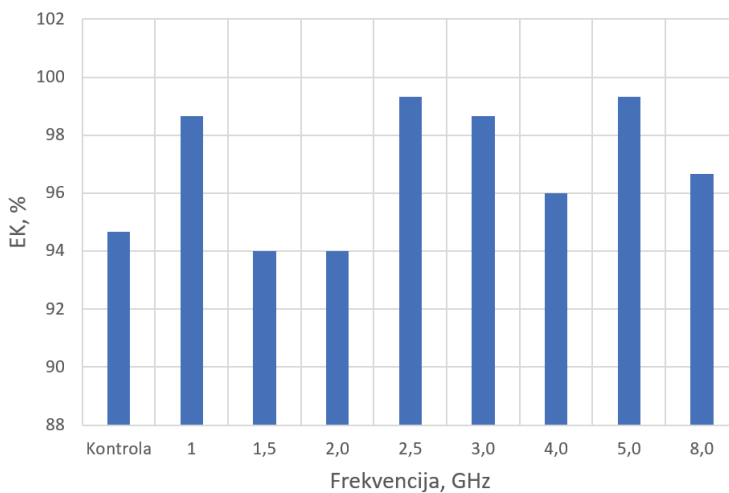


h)

P, dBm	SK, %	Parovi tretmana	PHSD(SK)
0,00	98,00	K – 0,00	0,0912
-3,00	95,33	K – -3,00	0,6037
-6,00	95,33	K – -6,00	0,6037
-12,50	97,33	K – -12,0	0,1573
Kontrola	92,67		
F-test ρ	2,58 0,1023		

Slika 6. Postotak energije klijanja EK: a) V1. (30 min) b) F-test i Tukey HSD test za V1.; c) V2. (60 min); d) F-test i Tukey HSD test za V2.; e) V3. (frek. od 0.8 – 1.15 GHz) f) F-test i Tukey HSD test za V3.; g) V4. (P od 0 do -12 dBm); h) F-test i Tukey HSD test za V4.

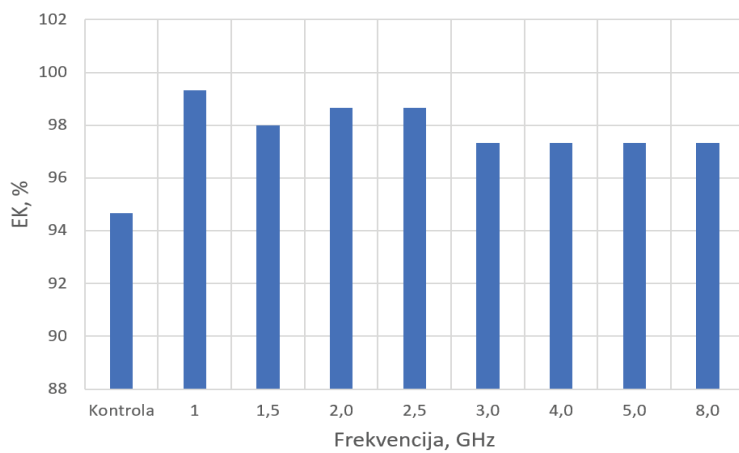
a)



b)

f , GHz	EK, %	Parovi tretmana	PHSD(EK)
1,00	98,67	K – 1,0	0,6986
1,50	94,00	K – 1,5	0,8999
2,00	94,00	K – 2,0	0,8999
2,50	99,33	K – 2,5	0,5443
3,00	98,67	K – 3,0	0,6986
4,00	96,00	K – 4,0	0,8999
5,00	99,33	K – 5,0	0,5442
8,00	96,67	K – 8,0	0,8999
Kontrola	94,67		
F-test p	1,91 0,1216		

c)

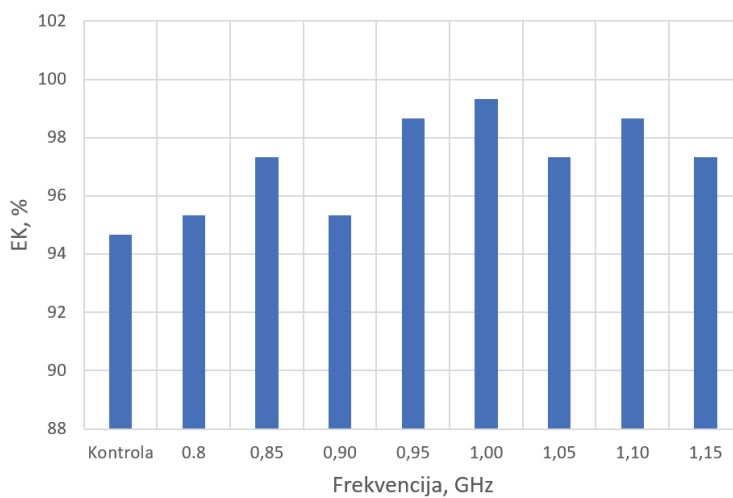


d)

f , GHz	EK, %	Parovi tretmana	PHSD(EK)
1,00	99,33	K – 1,0	0,3823
1,50	98,00	K – 1,5	0,7391
2,00	98,67	K – 2,0	0,5619
2,50	98,67	K – 2,5	0,5619
3,00	97,33	K – 3,0	0,8999
4,00	97,33	K – 4,0	0,8999
5,00	97,33	K – 5,0	0,8999
8,00	97,33	K – 8,0	0,8999
Kontrola	94,67		
F-test		0,88	
p		0,5482	



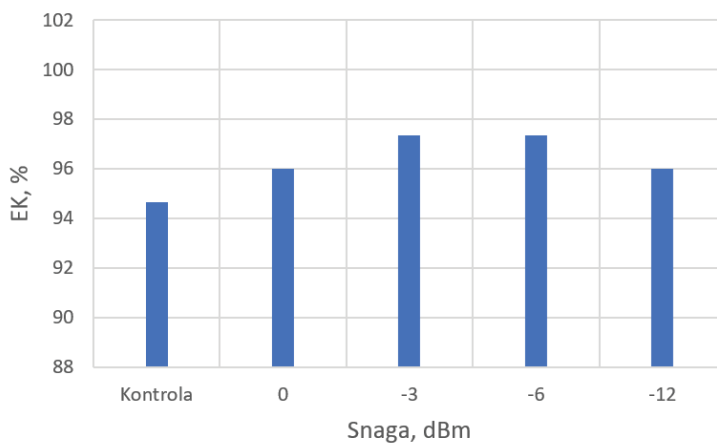
e)



f)

f , GHz	EK, %	Parovi tretmana	PHSD(EK)
0,80	95,33	K – 0,80	0,8999
0,85	97,33	K – 0,85	0,5553
0,90	95,33	K – 0,90	0,8999
0.95	98,67	K – 0,95	0,1285
1,00	99,33	K – 1,00	0,0504
1,05	97,33	K – 1,05	0,5553
1,10	98,67	K – 1,10	0,1285
1,15	97,33	K – 1,15	0,5553
Kontrola	94,67		
F-test ρ	3,13 0,0213		

g)

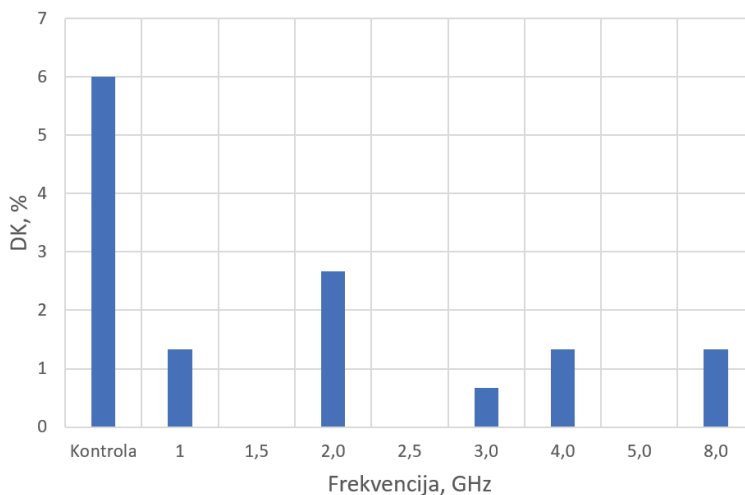


h)

P, dBm	EK, %	Parovi tretmana	PHSD(EK)
0,00	96,00	K – 0,00	0,8999
-3,00	97,33	K – -3,00	0,7835
-6,00	97,33	K – -6,00	0,7835
-12,50	96,00	K – -12,0	0,8999
Kontrola	94,67		
F-test	0,42		
p	0,7880		

Slika 7. Postotak deformiranih klijanaca DK: a) V1. (30 min) b) F-test i Tukey HSD test za V1.; c) V2. (60 min); d) F-test i Tukey HSD test za V2.; e) V3. (frek. od 0.8 – 1.15 GHz) f) F-test i Tukey HSD test za V3.; g) V4. (P od 0 do -12 dBm); h) F-test i Tukey HSD test za V4.

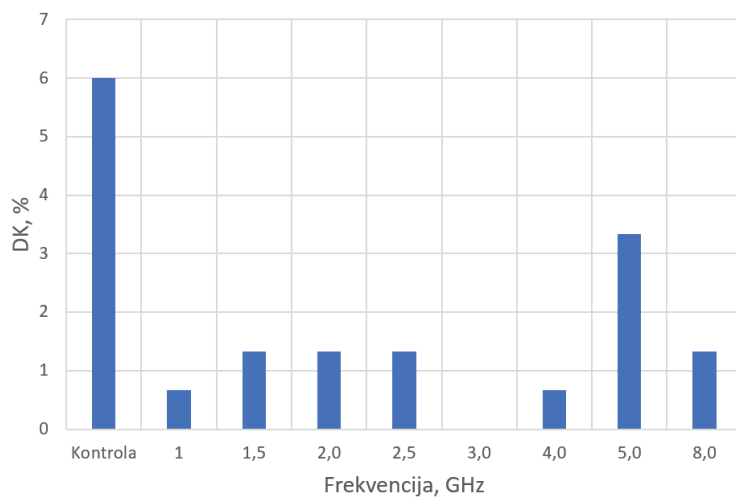
a)



b)

f, GHz	DK, %	Parovi tretmana	PHSD(DK)
1,00	1,33	K – 1,0	0,0197
1,50	0,00	K – 1,5	0,0019
2,00	2,67	K – 2,0	0,1719
2,50	0,00	K – 2,5	0,0019
3,00	0,67	K – 3,0	0,0061
4,00	1,33	K – 4,0	0,0197
5,00	0,00	K – 5,0	0,0019
8,00	1,33	K – 8,0	0,0197
Kontrola	6,00		
F-test p	5,27 0,0017		

c)

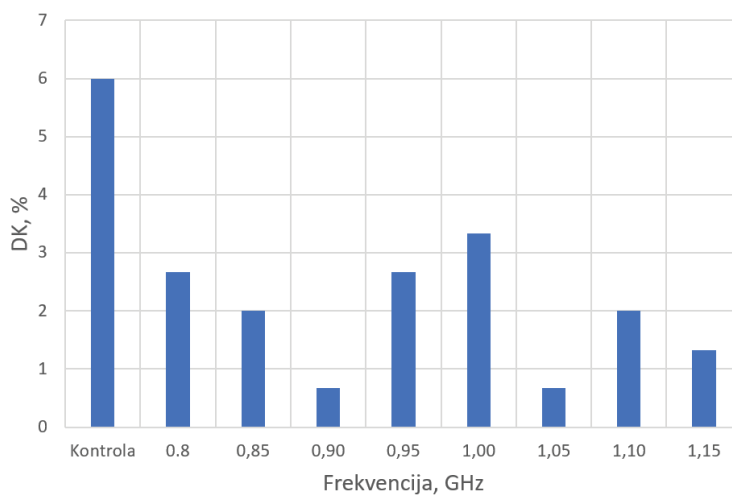


d)

f , GHz	DK, %	Parovi tretmana	PHSD(DK)
1,00	0,67	K – 1,0	0,0112
1,50	1,33	K – 1,5	0,0331
2,00	1,33	K – 2,0	0,0331
2,50	1,33	K – 2,5	0,0331
3,00	0,00	K – 3,0	0,0038
4,00	0,67	K – 4,0	0,0112
5,00	3,33	K – 5,0	0,4904
8,00	1,33	K – 8,0	0,0331
Kontrola	6,00		
F-test <i>p</i>	4,22 0,0053		



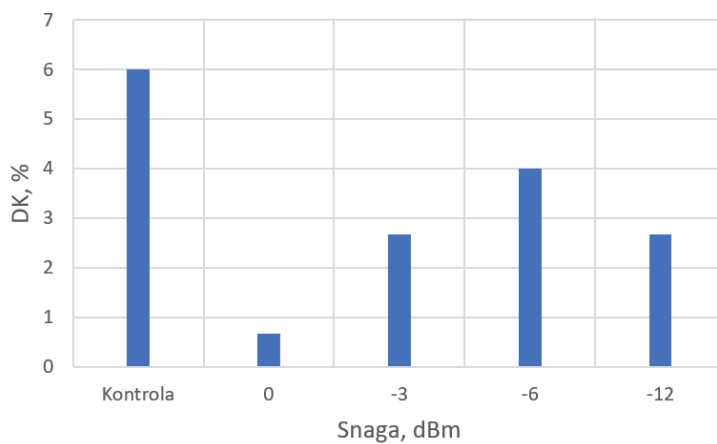
e)



f)

f , GHz	DK, %	Parovi tretmana	PHSD(DK)
0,80	2,67	K – 0,80	0,3847
0,85	2,00	K – 0,85	0,1890
0,90	0,67	K – 0,90	0,0337
0,95	2,67	K – 0,95	0,3847
1,00	3,33	K – 1,00	0,6347
1,05	0,67	K – 1,05	0,0337
1,10	2,00	K – 1,10	0,1890
1,15	1,33	K – 1,15	0,0830
Kontrola	6,00		
F-test ρ	2,58 0,0450		

g)

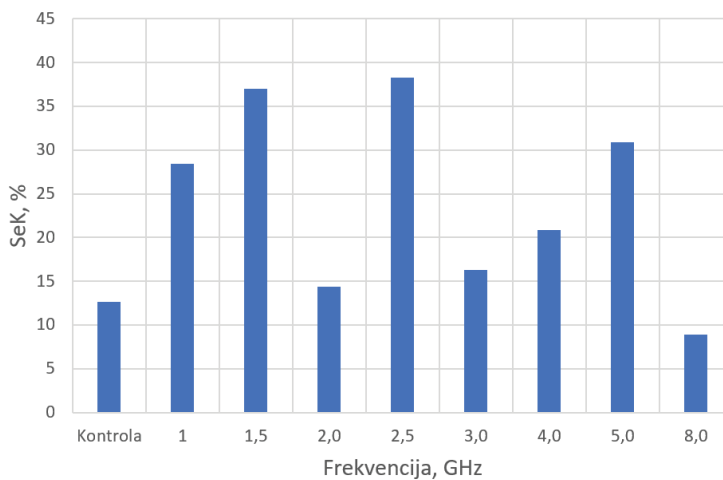


h)

P, dBm	DK, %	Parovi tretmana	PHSD(DK)
0,00	0,67	K – 0,00	0,0286
-3,00	2,67	K – -3,00	0,2273
-6,00	4,00	K – -6,00	0,6456
-12,50	2,67	K – -12,0	0,2273
Kontrola	6,00		
F-test p	3,63 0,0449		

Slika 8. Postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem SeK: a) V1. (30 min) b) F-test i Tukey HSD za V1.; c) V2. (60 min); d) F-test i Tukey HSD za V2.; e) V3. (frek. od 0.8 – 1.15 GHz) f) F-test i Tukey HSD za V3.; g) V4. (P od 0 do -12 dBm); h) F-test i Tukey HSD test za V4.

a)

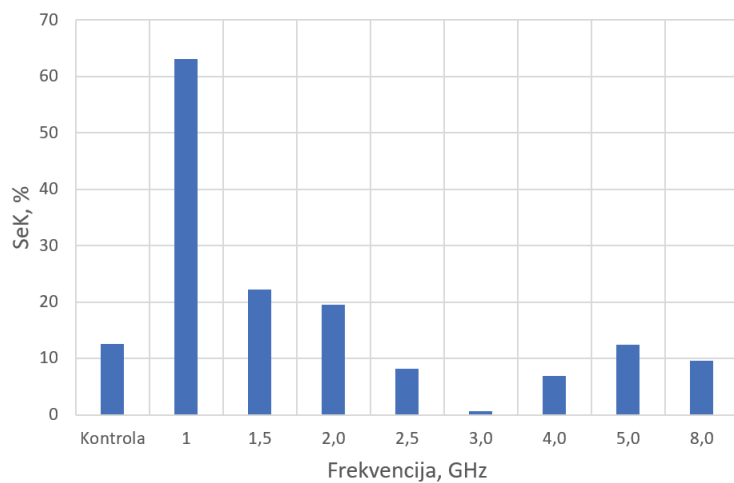


+

b)

f , GHz	SeK, %	Parovi tretmana	PHSD(SeK)
1,00	28,47	K – 1,0	0,7796
1,50	37,04	K – 1,5	0,3233
2,00	14,38	K – 2,0	0,8999
2,50	38,30	K – 2,5	0,2679
3,00	16,26	K – 3,0	0,8999
4,00	20,85	K – 4,0	0,8999
5,00	30,91	K – 5,0	0,6496
8,00	8,93	K – 8,0	0,8999
Kontrola	12,63		
F-test p	2,37 0,0610		

c)

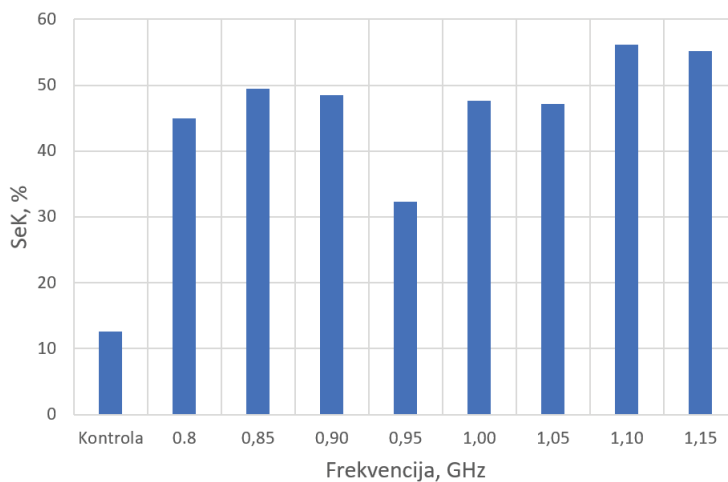


d)

f , GHz	SeK, %	Parovi tretmana	PHSD(SeK)
1,00	63,12	K – 1,0	0,0010
1,50	22,29	K – 1,5	0,8685
2,00	19,52	K – 2,0	0,8999
2,50	8,10	K – 2,5	0,8999
3,00	0,68	K – 3,0	0,6883
4,00	6,89	K – 4,0	0,8999
5,00	12,39	K – 5,0	0,8999
8,00	9,54	K – 8,0	0,8999
Kontrola	12,63		
F-test <i>p</i>	14,51 2,11·10⁻⁶		



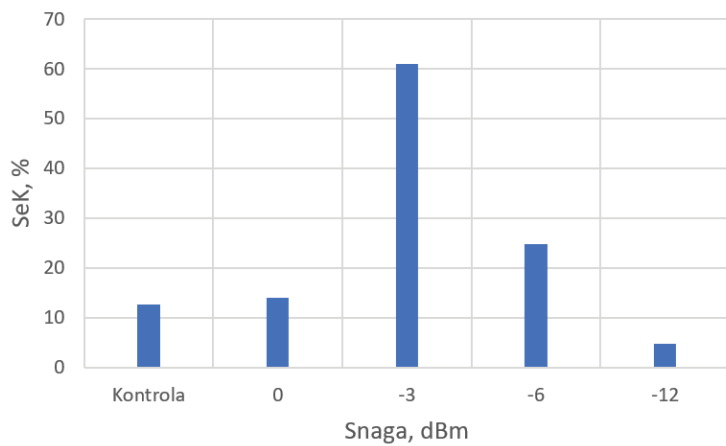
e)



f)

f , GHz	SeK, %	Parovi tretmana	PHSD(SeK)
0,80	44,92	K – 0,80	0,0273
0,85	49,66	K – 0,85	0,0087
0,90	48,52	K – 0,90	0,0115
0,95	32,41	K – 0,95	0,3752
1,00	47,69	K – 1,00	0,0140
1,05	47,27	K – 1,05	0,0155
1,10	56,07	K – 1,10	0,0182
1,15	55,24	K – 1,15	0,0022
Kontrola	12,63		
F-test p	5,10 0,0020		

g)

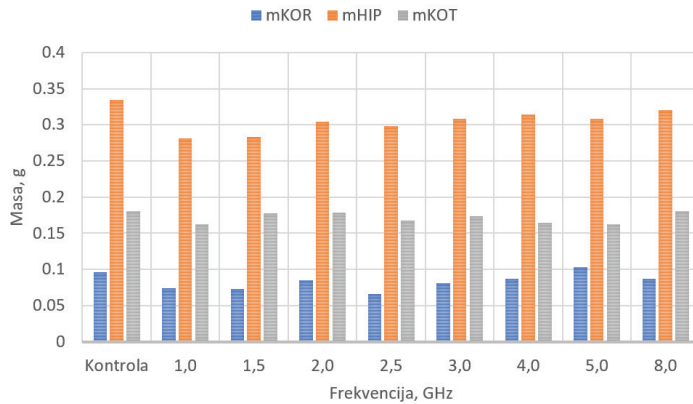


h)

P, dBm	SeK, %	Parovi tretmana	PHSD(SeK)
0,00	14,01	K – 0,00	0,8999
-3,00	60,97	K – -3,00	0,0010
-6,00	24,72	K – -6,00	0,1106
-12,50	4,72	K – -12,0	0,4172
Kontrola	12,63		
F-test p	51,84 1,19·10⁻⁶		

Slika 9. Mase korijena po biljci, hipokotila i kotiledona: a) V1. (30 min) b) F-test i p za V1.; c) V2. (60 min); d) F-test i p za V2.; e) V3. (frek. od 0.8 – 1.15 GHz) f) F-test i p za V3.; g) V4. (P od 0 do -12 dBm); h) F-test i p za V4.

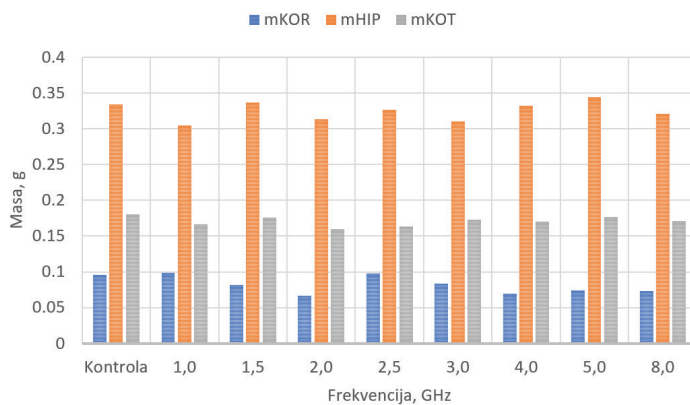
a)



b)

f, GHz	mKOR, g	mHIP, g	mKOT, g
1,00	0,07362	0,2809	0,1621
1,50	0,07306	0,2837	0,1774
2,00	0,08563	0,3044	0,1787
2,50	0,06627	0,2986	0,1677
3,00	0,08152	0,3085	0,1740
4,00	0,08733	0,3144	0,1649
5,00	0,10300	0,3085	0,1623
8,00	0,08685	0,3208	0,1802
Kontrola	0,09618	0,3341	0,1803
F-test	3,46	3,43	0,67
p	0,0136	0,0142	0,7109

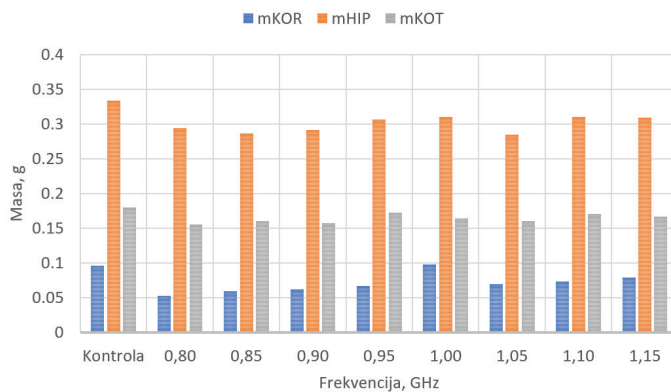
c)



d)

f , GHz	mKOR, g	mHIP, g	mKOT, g
1,00	0,09881	0,3051	0,1668
1,50	0,08211	0,3367	0,1759
2,00	0,06714	0,3134	0,1600
2,50	0,09773	0,3267	0,1635
3,00	0,08332	0,3102	0,1733
4,00	0,06962	0,3319	0,1706
5,00	0,7436	0,3446	0,1772
8,00	0,07331	0,3210	0,1710
Kontrola	0,09618	0,3341	0,1803
F-test	10,82	1,82	0,72
p	$1,80 \cdot 10^{-5}$	0,1379	0,6735

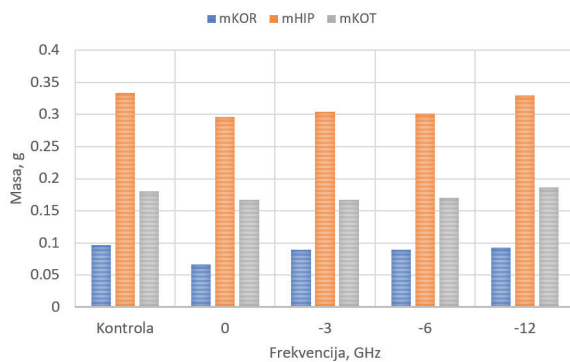
e)



f)

f, GHz	mKOR, g	mHIP, g	mKOT, g
0,80	0,05340	0,2940	0,1557
0,85	0,06000	0,2870	0,1605
0,90	0,06280	0,2913	0,1578
0,95	0,06270	0,3065	0,1732
1,00	0,09870	0,3099	0,1641
1,05	0,06990	0,2853	0,1609
1,10	0,07380	0,3107	0,1707
1,15	0,07970	0,3095	0,1672
Kontrola	0,09618	0,3341	0,1803
F-test	21,97	2,7395	1,2064
p	8,72·10⁻⁸	0,0361	0,3493

g)

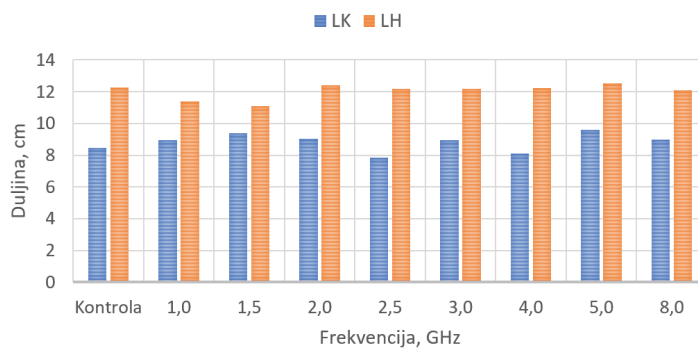


h)

P, dBm	mKOR, g	mHIP, g	mKOT, g
0,00	0,06660	0,2964	0,1672
-3,00	0,08947	0,3050	0,1677
-6,00	0,08932	0,3010	0,1705
-12,50	0,09269	0,3297	0,1862
Kontrola	0,09618	0,3341	0,1803
F-test	3,52	4,06	0,87
p	0,0485	0,0329	0,5110

Slika 10. Duljine korijena (LK) i hipokotila (LH): : a) V1. (30 min) b) F-test i p za V1.; c) V2. (60 min); d) F-test i p za V2.; e) V3. (frek. od 0.8 – 1.15 GHz) f) F-test i p za V3.; g) V4. (P od 0 do -12 dBm); h) F-test i p za V4.

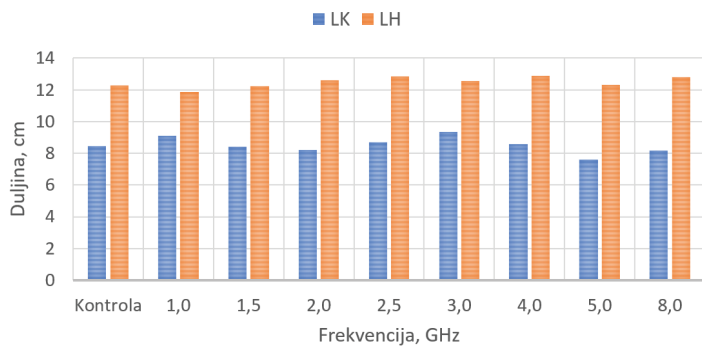
a)



b)

f , GHz	LK, cm	LH, cm
1,00	8,93	11,41
1,50	9,39	11,09
2,00	9,05	12,38
2,50	7,85	12,16
3,00	8,95	12,20
4,00	8,13	12,22
5,00	9,58	12,53
8,00	9,00	12,07
Kontrola	8,47	12,26
F-test	3,60	1,03
p	0,0115	0,4523

c)

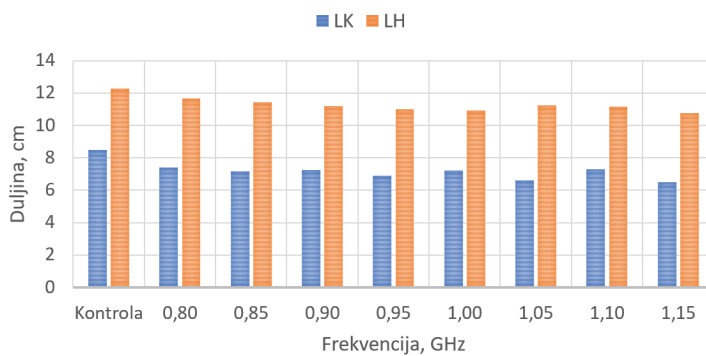


d)

f , GHz	LK, cm	LH, cm
1,00	9,09	11,87
1,50	8,42	12,25
2,00	8,19	12,60
2,50	8,70	12,86
3,00	9,35	12,58
4,00	8,56	12,89
5,00	7,58	12,32
8,00	8,15	12,79
Kontrola	8,47	12,26
F-test	2,07	1,37
p	0,0949	0,2758



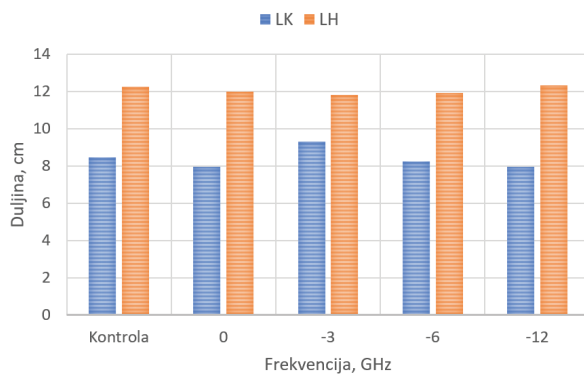
e)



f)

f , GHz	LK, cm	LH, cm
0,80	7,43	11,66
0,85	7,18	11,45
0,90	7,27	11,19
0,95	6,90	10,99
1,00	7,21	10,91
1,05	6,63	11,25
1,10	7,29	11,14
1,15	6,51	10,77
Kontrola	8,47	12,26
F-test	3,13	9,13
p	0,0210	5,64·10⁻⁵

g)



h)

P, dBm	LK, cm	LH, cm
0,00	7,95	12,00
-3,00	9,31	11,81
-6,00	8,25	11,91
-12,50	7,96	12,32
Kontrola	8,47	12,26
F-test	3,80	0,81
p	0,0394	0,5446

5. Analiza rezultata mjerenja

U ovom poglavlju analizirani su rezultati mjerenja tretiranja sjemenki suncokreta VF EM poljem, provedenog u tri faze i četiri verzije tretiranja te rezultati statističke analize značajnosti rezultata mjerenja. Statistička analiza rezultata mjerenja s jednom promjenjivim faktorom (frekvencija; snaga signala) provedena je F-testom i Tukey HSD pri čemu je statistička značajnost rezultata definirana vrijednošću p parametra koji kod značajnosti utjecaja promatranog faktora poprima vrijednosti $p < 0,05$. Tukey HSD testom utvrđena je statistička značajnost razlike između srednjih vrijednosti dvije populacije (mjerenja) pri čemu je jedna od dvije populacije uvijek kontrolni uzorak. Primjenom na ovo istraživanje, ovim testovima utvrđujemo statističke značajnosti pojedinih rezultata tretiranja i značajnosti odnosa među postignutim rezultatima tretiranja (između pojedinog tretiranja i kontrolnog uzorka).

Kod parametara: standardna klijavost (SK), energije klijanja (EK), postotak broja deformiranih klijanaca (DK) i postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem (SeK) postoji statistička značajnost utjecaja EM polja na njih te su prvi navedeni u ovoj analizi.

5.1. Utjecaj EM polja na standardnu klijavost (SK)

Rezultati mjerenja prikazani su dijagramima na slikama 5.a), 5.c), 5.e) i 5.g), dok su rezultati statističkih analiza prikazani u tablicama na slikama 5. b), 5.d), 5.f) i 5.h).

- a) Rezultati mjerenja u prvoj varijanti tretiranja pokazuju znatno veću standardnu klijavost za tretirane uzorke u odnosu na klijavost kontrolnog uzorka što ukazuje na to da EM zračenje značajno utječe na standardnu klijavost (Slika 5.a)). Ovo potvrđuju i statistički pokazatelji F-testa (F-test 4,59; $p = 0,0035$). Nadalje, taj utjecaj je vidljiv i pri usporednom testiranju Tukey HSD testom (kontrola i tretirani uzorci frekvencijama od 1 – 8 GHz) kod kojeg na frekvencijama 1; 2,5; 3 i 5 GHz, PHSD(SK) poprima vrijednosti manje od 0,05 (0,0268; 0,0047; 0,0113 i 0,0048) (Slika 5.b)).
- b) Iako rezultati mjerenja za preostale tri varijante tretiranja pokazuju povećanu standardnu klijavost uzoraka koji su tretirani EM poljem u odnosu na kontrolni uzorak statistički pokazatelji ne pokazuju značajnost tog utjecaja.

5.2. Utjecaj EM polja na energiju klijanja (EK)

Rezultati mjerenja prikazani su dijagramima na slikama 6.a), 6.c), 6.e) i 6.g), dok su rezultati statističkih analiza prikazani u tablicama na slikama 6. b), 6.d), 6.f) i 6.h).

- a) Rezultati mjerenja u prvoj, drugoj i četvrtoj varijanti tretiranja pokazuju povećanu standardnu klijavost uzoraka koji su tretirani EM poljem u odnosu na kontrolni uzorak, ali statistički pokazatelji ne pokazuju značajnost tog utjecaja.

- b) Rezultati mjerenja u prvoj pokazuju veću standardnu kljivost za tretirane uzorke u odnosu na kljivost kontrolnog uzorka što ukazuje na to da EM zračenje značajno utječe na standardnu kljivost. Ovo potvrđuju i statistički pokazatelji F-testa (F-test 3,13; $p = 0,0213$). Nadalje, taj utjecaj je djelomično vidljiv i pri usporednom testiranju Tukey HSD testom (kontrola i tretirani uzorak) kod kojeg na frekvenciji od 1 GHz PHSD(EK) poprima vrijednost približno jednaku 0,05 (0,0504).

5.3. Utjecaj EM polja na postotak broja deformiranih klijanaca (DK)

Rezultati mjerenja prikazani su dijagramima na slikama 7.a), 7.c), 7.e) i 7.g), dok su rezultati statističkih analiza prikazani u tablicama na slikama 7. b), 7.d), 7.f) i 7.h). Rezultati mjerenja u svim varijantama tretiranja pokazuju izuzetno niski postotak broja deformiranih klijanaca uzoraka koji su tretirani EM poljem u odnosu na kontrolni uzorak što ukazuje na to da EM zračenje značajno utječe na taj parametar (Slika 7.a), 7.c), 7.e) i 7.g)). Ovo potvrđuju i statistički pokazatelji F-testa za svaku od četiri varijante tretiranja (V1: F-test 5,27; $p = 0,0017$; V2: F-test 4,22; $p = 0,0053$ V3: F-test 2,58; $p = 0,0450$ i V4: F-test 3,63; $p = 0,0449$). Nadalje, taj utjecaj je vidljiv i pri usporednom testiranju Tukey HSD testom (kontrola i tretirani uzorci) kod kojeg u verziji:

- ▶ V1 samo na frekvenciji od 2 GHz nema značajnog utjecaja EM polja na postotak broja deformiranih klijanaca, a najniže vrijednosti $P_{HSD}(DK)$ parametra od 0,0019 su na frekvencijama od 1,5; 2,5 i 5,0 GHz na kojima je broj deformiranih klijanaca jednak nuli.
- ▶ V2 samo na frekvenciji od 5 GHz nema značajnog utjecaja EM polja na postotak broja deformiranih klijanaca, a najniža vrijednost $P_{HSD}(DK)$ parametra od 0,0038 je na frekvenciji od 3,0 GHz na kojoj je broj deformiranih klijanaca jednak nuli. Na frekvencijama od 1,0 i 4,0 GHz vrlo su niske vrijednosti od 0,67 % deformiranih klijanaca uz vrijednost $P_{HSD}(DK)$ parametra od 0,0112.
- ▶ V3 na frekvencijama od 0,90 i 1,05 GHz postoji značajan utjecaj EM polja što potvrđuju vrijednosti $P_{HSD}(DK)$ parametra od 0,01337 na frekvenciji 0,90 GHz i 0,0337 na frekvenciji 1,05 GHz. Na ostalim frekvencijama nema značajnog utjecaja EM polja na postotak broja deformiranih klijanaca.
- ▶ V4 samo snazi od 0 dBm ima značajnog utjecaja EM polja na postotak broja deformiranih klijanaca što potvrđuje i vrijednost $P_{HSD}(DK)$ parametra p od 0,0286. Viši nivoi snage EM polja, iako rezultati pokazuju niže vrijednosti postotka broja deformiranih klijanaca u odnosu na kontrolni uzorak, ne rezultiraju statističkom značajnošću utjecaja.

5.4. Utjecaj EM polja na postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem (SeK)

Rezultati mjerenja prikazani su dijagramima na slikama 8.a), 8.c), 8.e) i 8.g), dok su rezultati statističkih analiza prikazani u tablicama na slikama 8. b), 8.d), 8.f) i 8.h. Rezultati mjerenja u varijantama V2, V3 i V4 tretiranja pokazuju izuzetno visoki postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem uzoraka koji su tretirani EM poljem u odnosu na kontrolni uzorak što ukazuje na to da EM zračenje značajno utječe na taj parametar (Slika 8.a), 8.c), 8.e) i 8.g)). Ovo potvrđuju i statistički pokazatelji F-testa za ove varijante tretiranja (V2: F-test 14,51; $p = 2,11 \cdot 10^{-6}$ V3: F-test 5,10; $p = 0,0020$ i V4: F-test 51,84 $1,19 \cdot 10^{-6}$). Nadalje, taj utjecaj je vidljiv i pri usporednom testiranju Tukey HDS testom (kontrola i tretirani uzorci) kod kojeg u verziji:

- ▶ V2 samo frekvenciji od 1,0 GHz ima značajnog utjecaja EM polja na postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem uzoraka što potvrđuje i vrijednost parametra P_{HSD} (SeK) od 0,0010. Valja naglasiti da je rezultat na koji se odnosi ova statistička značajnost slijedeći: 63,12 % klijanaca tretiranih monoharmonijskim EM poljem frekvencije 1,0 GHz 60 minuta, imao razvijeno sekundarno korijenje.
- ▶ V3 samo na frekvenciji od 0,95 GHz nema značajnog utjecaja EM polja na postotak broja deformiranih klijanaca, a najniža vrijednost P_{HSD} (SeK) parametra (najveći utjecaj) od 0,0022 je na frekvenciji 1,15 GHz.
- ▶ V4 samo snazi od -3 dBm ima značajnog utjecaja EM polja na postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem što potvrđuje i vrijednost P_{HSD} (SeK) parametra od 0,0010. Ovaj rezultat se odnosi na visoki postotak klijanaca (60,97 %) s razvijenim sekundarnim korijenjem pri snazi zračenja od -3 dBm.

5.5. Utjecaj EM polja na masu korijena (mKOR), masu hipokotila (mHIP) i masu kotiledona (mKOT)

Rezultati mjerenja prikazani su dijagramima na slikama 9.a), 9.c), 9.e) i 9.g), dok su rezultati statističkih analiza prikazani u tablicama na slikama 9. b), 9.d), 9.f) i 9.h. Rezultati mjerenja u svim varijantama tretiranja pokazuju značajno veću masu korijena klijanaca (mKOR) kontrolne grupe što potvrđuju i statistički pokazatelji F-testa (V1: F-test 3,46 i $p = 0,0136$; V2: F-test 10,82 i $p = 1,80 \cdot 10^{-5}$; V3: F-test 21,97 i $p = 8,72 \cdot 10^{-8}$ i V4: F-test 3,52 i $p = 0,0485$). Ipak, valja naglasiti da je taj utjecaj negativan budući da su najveće vrijednosti postignute kod kontrolnih uzoraka.

Rezultati mjerenja hipoklotila (mHIP) u V1, V3 i V4 varijantama tretiranja pokazuju značajno veću masu korijena klijanaca (mHIP) kontrolne grupe što potvrđuju i statistički pokazatelji F-testa (V1: F-test 3,34 i $p = 0,0142$; V3: F-test 2,74 i $p = 0,0361$ i V4: F-test 4,06 i $p = 0,0329$). I u ovom slučaju taj utjecaj je negativan budući da su najveće vrijednosti postignute kod kontrolnih uzoraka.

Rezultati mjerenja u svim varijantama tretiranja pokazuju da EM polje nema značajnog utjecaja na masu korijena kotiledona (mKOT).

Unatoč ovom negativnom utjecaju EM polja na masu korijena važno je naglasiti da je najveća masa korijena (mKOR) utvrđena u V2 varijanti tretiranja na frekvenciji od 1 GHz i iznosi 0,0988 g.

5.6. Utjecaj EM polja na duljinu korijena (LK) i duljinu hipokotila masu hipokotila (LH)

Rezultati mjerenja prikazani su dijagramima na slikama 10.a), 10.c), 10.e) i 10.g), dok su rezultati statističkih analiza prikazani u tablicama na slikama 10. b), 10.d), 10.f) i 10.h).

Rezultati mjerenja duljine korijena (LK) u V1, V3 i V4 varijantama tretiranja pokazuju statističku značajnost duljine korijena (LK) što potvrđuju i statistički pokazatelji F-testa (V1: F-test 3,60 i $p = 0,0115$; V3: F-test 3,13 i $p = 0,0210$ i V4: F-test 3,80 i $p = 0,0394$). Pri tome je potrebno razlikovati slijedeće:

- ▶ varijanta V1: statistička značajnost se ogleda u tome da uzorci na frekvencijama 1,50; 2,00; 3,00; 5,00 i 8,00 GHz imaju veće duljine korijena od kontrolnog uzorka. Pri tome je najveća duljina korijena izmjerena na frekvenciji 5,00 GHz u iznosu od 9,58 cm u odnosu na 8,47 cm kontrolne grupe;
- ▶ varijanta V3: kontrolna grupa ima najveću duljinu korijena;
- ▶ varijanta V4: najveća duljina korijena je izmjerena kod uzorka tretiranog snagom od – 3 dBm pri čemu je duljina korijena 9,31 cm (kontrolni uzorak je duljine 8,47 cm).

Rezultati mjerenja duljine hipokotila (LH) jedino kod varijante V3 pokazuju statističku značajnost pri čemu je duljina korijena kontrolne grupe najveća i iznosi 12,26 cm. Statistički pokazatelj F-testa to potvrđuju V3: F-test 9,13 i $p = 5,64 \cdot 10^{-5}$.

Rezultati istraživanja ukazuju na to da tretiranje sjemena suncokreta sorte „Luka“ VF elektromagnetskim poljem pozitivno utječe na klijavost, veći broj zdravih klijanaca i brži razvoj sekundarnog korijenja. Što se tiče negativnih utjecaja tretiranja treba izdvojiti smanjenu masu korijena (mKOR) i masu hipokotila (mHIP).

6. Zaključak

U ovom istraživanju provedena su tretiranja sjemena suncokreta (*Helianthus annuus* L.) sorte „Luka“ elektromagnetskim poljem u frekvencijskom opsegu 0,8 – 8 GHz sa ciljem utvrđivanja optimalnih elektromagnetski uvjeti rasta i razvoja biljaka na nivou klijavosti sjemena. Tretman je proveden u dvije četiri varijante koje se razlikuju po parametrima



zračenja: frekvencije, snage zračenja (na poziciji sjemena) i vremenu izloženosti sjemena EM polju. U prvoj varijanti frekvencije signala EM polja je u rasponu od 1 – 8 GHz, snaga polja iznosi – 10 dBm i vrijeme zračenja 30 min dok je u drugoj varijanti samo povećano trajanje tretmana koje iznosi 60 minuta. U trećoj varijanti frekvencijsko područje je od 0,8 do 1,15 GHz, snaga polja iznosi – 10 dBm i vrijeme zračenja 30 min GHz. Četvrta varijanta predstavlja variranje snage zračenja (0 do – 12 dBm) uz konstantnu frekvenciju 2 GHz i trajanje zračenja 30 min. Kontrolni uzorak sjemena jest uzorak koji nije tretiran EM poljem. Za utvrđivanje statističke značajnosti utjecaja EM polja na rast, razvoj i klijavost sjemena suncokreta, korištene su statističke metode F-test i Tukey test. Djelovanje EM polja se promatralo utjecajem na devet najvažnijih parametara klijanaca suncokreta: standardnu klijavost (SK), energiju klijanja (EK), postotak deformiranih klijanaca (DK), postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem (SeK), mase korijena po biljci (mKOR), masu hipokotila (mHIP), masu kotiledona (mKOT), duljinu korijena (DK) te duljinu hipokotila (DH). Najvažniji pozitivni rezultat djelovanja EM polja jest utjecaj na razvoj sekundarnog korijenja pri čemu je utvrđeno da pri frekvenciji 1 GHz, snagom zračenja – 10 dBm uz 60 minutnu izloženost EM polju kod 63,12% klijanaca utvrđeno je visokorazvijeno sekundarno korijenje, a pri frekvenciji 2 GHz i snazi zračenja – 3 dBm u trajanju od 30 minuta zabilježeno je 60,97 % klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem. Nadalje, nakon desetog dana eksperimenta kod već navedenog uzorka s 63,12% visokorazvijenog sekundarnog korijenja, utvrđena je i najveća masa korijena klijanaca od 0,0988 g, premda nema statističke značajnosti u odnosu na kontrolni uzorak (to je pojedinačno najveća utvrđena masa korijena). U četvrtoj varijanti utvrđeno je da sedam od osam zračenih uzoraka imalo je više od 44 % klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem.

Drugi važan pozitivan rezultat jest taj da djelovanje EM polja utječe na smanjenje postotka broja deformiranih klijanaca uzoraka koji su tretirani EM poljem u odnosu na kontrolni uzorak uz statističku značajnost tog smanjenja u svim ispitivanim varijantama. Najbolji rezultat je utvrđen kod prve varijante tretiranja pri frekvencijama 1,5; 2,5 i 5 GHz (-10 dBm i trajanje tretmana od 30 minuta) na kojima nema niti jednog klijanca koji je deformira u odnosu na 6 klijanaca kontrolnog uzorka.

Osim ovih pozitivnih utjecaja utvrđeni su i negativni koji se odnose na masu korijena klijanca i hipokotila. U svim varijantama tretiranja utvrđena je statistički značajno veća masa korijena klijanaca (mKOR) kontrolne grupe, a u V1, V3 i V4 varijantama tretiranja utvrđena je značajno veća masa hipokotila (mHIP) kontrolne grupe.

Rezultati ukazuju da tretiranje sjemena VF EM poljem ima utjecaja na svojstva klijanja sjemena suncokreta. Neki od tih utjecaja jesu pozitivni kao što je smanjenje broja deformiranih klijanaca te brži razvoj sekundarnog korijenja što može rezultirati bržim razvojem biljke. Negativni utjecaji se ogledaju u smanjenju mase korijena i hipokotila.

Radi detaljnijeg uvida u utjecaj visokofrekvencijskog elektromagnetskog polja na razvoj i rast sjemena i biljaka ova istraživanja će se proširiti i na druge poljoprivredne kulture.

Literatura

- Abu-Elsaoud, A. M i Qari, S. H. (2017). Influence of Microwave Irradiations on Germination, Seedling Growth and Electrolyte Leakage of Barley (*Hordeum vulgare* L.), Egyptian Society for Environmental Sciences, 16(1), 11-24.
- Bisceglia, B. i Valbonesi, S. (2016). Microwave radiation for eco friendly agriculture: current scenarios and challenges for the future, 37.
- Caputo, L., Souza, L., Greco, S., Severin, C., Caldarola, E., Molichetti, M., De Feo, V. i Bisceglia, B. (2016). Exposure of Seeds to ELF MF. Effects on Germination i Growth. Preliminary Results, IV Convegno Nazionale Interazioni tra Campi Elettromagnetici e Biosistemi, 2016, 41.
- Cėsniene, I., Miškelyte, D., Novickij, V., Mildažiene, V. i Sirgedaite-Šežiene, V. (2023). Seed Treatment with Electromagnetic Field Induces Different Effects on Emergence, Growth and Profiles of Biochemical Compounds in Seven Half-Sib Families of Silver Birch, *Plants*, 12(17), 1-30.
- D'Ambrosio, N., Montuori, R., Migliore, M. D. i Massa, R. (2016). Effects of 2.45 GHz Exposure on Seeds and Sprouts of *Phaseolus vulgaris* L., *Articoli in Atti di convegno*, 43-44.
- Das, R. i Bhattacharya, R. (2006). Impact of Electromagnetic Field on Seed Germination, *Proceedings of the international Conference on Modern Electrostatics*, 141, 145-145.
- Dziwulska-Hunek, A., Niemczynowicz, A, Kycia, R. A., Matwijczuk, A., Kornarzyński, K., Stadnik, J. i Szymanek, M. (2023). Stimulation of soy seeds using environmentally friendly magnetic and electric fields, *Scientific Reports*, 1-14.
- Fedorov, V. i Bakharev, G. F. (2010). Influence of THz radiation on early phase of seed germinating and yield of wheat, *International Conference on Coherent and Nonlinear Optics*, 799327, 7.
- Foster, K. R. (2000). Thermal and nonthermal mechanisms of intercation of radio-frequency energy with biological systems, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28 (1), 15-23.
- Konefał-Janocha, M., Banaś-Ząbczyk, A., Bester, M., Bocak, D., Budzik, S., Górny, S., Larsen, S., Majchrowski, K. i Cholewa, M. (2019). The Effect of Stationary and Variable Electromagnetic Fields on the Germination and Early Growth of Radish (*Raphanus sativus*), *Pol. J. Environ. Stud.* Vol, 28(2), 709-715.



Massa, R., Migliore, M. D., Panariello, G., Pinchera, D., Schettino, F., Caprio, E., Martano, M., Maiolino, P., Pagano, I. i Griffo, R. (2016). Microwave Radiation for Plant Protection: the Red Palm Weevil Pest Control Case Study, 2016, 39.

Payez, A., Ghanati, F., Behmanesh, M., Abdolmaleki, P., Hajnorouzi, A. i Rajabbeigi, E. (2013). Increase of seed germination, growth and membrane integrity of wheat seedlings by exposure to static and a 10-KHz electromagnetic field, *Electromagnetic Biology and Medicine*, 32 (4), 417-429.

Radzevičius, A., Sakalauskienė, S., Dagys, M.; Simniskis, R., Karklelienė, R., Bobinas, C. i Duchovskis, P. (2013). The effect of strong microwave electric field radiation on: (1) vegetable seed germination and seedling growth rate, *Zemdirbyste-Agriculture*, 100 (2), 179-184.

Sadowska, U., Zabinski, A. i Tabor, S. (2018). Influence of variable electromagnetic field on the energy and germination capacity of *Cannabis sativa* L. subsp. *culta* Serebr, *Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE)*.

Valbonesi, S. i Bisceglia, B. (2016). EMF application to plants germination and growth: a way to a green economy, *IV Convegno Nazionale Interazioni tra Campi Elettromagnetici e Biosistemi*, 2016.

Vian, A., Davies, E., Gendraud, E. i Bonnet, P. (2016). Plant responses to high frequency electromagnetic fields, *BioMed Research International*, 1-13.

Žoldin, V. (2020). Utjecaj elektromagnetskog visokofrekvencijskog polja na klijavost sjemena poljoproivredne kulture – diplomski rad, FERIT Osijek.

INFLUENCE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE GERMINATION OF SEED

Slavko RUPČIĆ

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Kneza Trpimira 2B, Osijek, Croatia
rupcic@ferit.hr

Vanja MANDRIĆ

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Kneza Trpimira 2B, Osijek, Croatia
vanja.mandric@ferit.hr

Miroslav LISJAK

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek, Vladimira Preloga 1, Osijek, Croatia
miroslav.lisjak@fazos.hr

Vinko ŽOLDIN

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek, Kneza Trpimira 2B, Osijek, Croatia
vinko.zoldin@ferit.hr

Abstract

Electromagnetic (EM) radiation is found all around us and affects all the living world, which under its influence has changed and developed and adapted to the intensity and frequency of the electromagnetic field created by natural sources. If that environment is “pleasant” (optimal conditions), then that development is also stimulating, and if it is not, it causes stress and affects the further development of organisms. Plant seeds are the initial stage of plant development which is the first to be affected by this radiation. The quality of agricultural seed determines the growth, development and yield of plants. Various chemical, physical and physiological methods are used to improve seed quality. By influencing the biochemical and physiological processes in the seeds, it is possible to contribute to earlier germination, better seedling health, and faster growth and development in the later phase of plant development. The starting hypothesis of this research is that electromagnetic radiation affects overall germination, germination energy and seedling mass, and the aim is to determine the optimal electromagnetic conditions for plant growth and development at the level of seed germination. For this purpose, sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.) of the “Luka” variety (producer: Agricultural Institute Osijek) were treated with a monoharmonic signal of defined intensity in the frequency range 0.8–8 GHz. The seeds were not pre-treated with low temperatures or



treated against pathogens at sowing. After the fourth day of the experiment, the best result was achieved by irradiation for 60 minutes at a frequency of 1 GHz, with a radiation power of -10 dBm, where highly developed secondary roots were found in 63.12% of the seedlings. The second most statistically significant result was obtained in the third variant, where at a frequency of 2 GHz and a radiation power of -3 dBm for a duration of 30 minutes, 60.97% of seedlings with developed secondary roots were recorded. After the tenth day of the experiment, in the already mentioned sample with 63.12% of highly developed secondary roots, the highest mass of the seedling roots was determined to be 0.0988 g, although it was not statistically significantly different from the control sample. In the next cycle, the frequency spectrum was narrowed to the range of 0.8–1.15 GHz and radiation intensity -3.5 ± 0.5 dBm for 30 minutes. After the fourth day, seven out of eight irradiated samples had more than 44% seedlings with developed secondary roots. On the tenth day of the experiment, the largest root mass of the seedlings was determined to be 0.0987 g at a frequency of 1 GHz with a statistically significant difference compared to the control sample. The results indicate that pretreatment of seeds with a VF electromagnetic field affects germination, faster development of secondary roots and an increase in its mass, which can result in faster plant development. In future research, enzyme activity and conductivity of samples (agricultural crops) irradiated by the EM field will be examined, and it will also be extended to other important agricultural crops (eg wheat, corn and oilseed rape and others).

Key words: germination, seed, electromagnetic field, secondary root, agricultural culture

Key message of the paper: Electromagnetic radiation affects the overall germination, germination energy and weight of seedlings of agricultural crops. The research aims to determine the optimal electromagnetic conditions for plant growth and development at the seed germination level. For this purpose, sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.) were treated with a monoharmonic signal of defined intensity in the frequency range 0.8-8 GHz.