

Utjecaj EM VF polja na klijavost sjemena poljoprivrednih kultura.

Žoldin, Vinko

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:263437>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKOG
VISOKOFREKVENCIJSKOG POLJA NA KLIJAVOST
SJEMENA POLJOPRIVREDNE KULTURE**

Diplomski rad

Vinko Žoldin

Osijek, 2020.

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TRETIRANJE SJEMENA SUNCOKRETA SORTE "LUKA" IZMJENIČNIM EM POLJEM..... | 2 |
| 2.1 Rezultati mjerenja | 4 |
| 3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA | 13 |
| 4. ZAKLJUČAK..... | 20 |
| LITERATURA..... | 21 |
| Sažetak | 22 |
| Abstract | 22 |
| Životopis | 24 |

1. UVOD

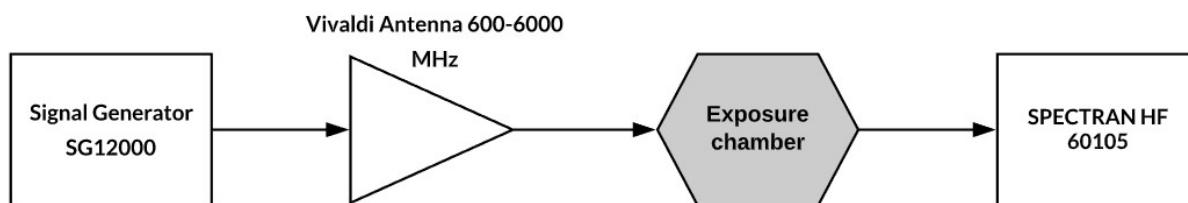
Elektromagnetsko zračenje prisutno je svugdje oko nas te, ovisno o izvoru, može biti prirodno ili umjetno. Promatrajući energiju zračenja, razlikuju se ionizirajuća i neionizirajuća zračenja. Važno je naglasiti utjecaj i primjenu elektromagnetskih polja danas, pogotovo u granama elektrotehnike i medicine, ali njihov se utjecaj može zamijetiti i u čitavoj okolini. Biljni i životinjski svijet oduvijek se nalazi pod utjecajem prirodnog elektromagnetskog zračenja i tijekom evolucijskog procesa prilagodio se prirodnom stupnju intenziteta elektromagnetskog polja. Svako odstupanje, iznad ili ispod optimalne razine zračenja, uzrokuje stres i utječe na daljnji razvoj organizma. Gledajući dugoročni efekt, stres ne mora biti nužno negativan. Kvaliteta sjemena jedan je od važnijih čimbenika formiranja prinosa jer u velikoj mjeri određuje rast, razvoj i prinos biljaka. Različite kemijske, fizikalne i fiziološke metode koriste 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 [1]. Elektromagnetsko zračenje sjemena monoharmonijskim signalom pripada fizikalnim metodama tretiranja čiji su optimalni uvjeti još uvijek nepoznati. Ovaj rad nastoji istražiti te optimalne elektromagnetske uvjete rasta i razvoja biljaka na nivou klijavosti sjemena. U radu je najprije bilo potrebno, za odabranu poljoprivrednu kulturu, načiniti tretiranje sjemena monoharmonijskim signalom definiranog intenziteta u frekvencijskom opsegu 0,8–8 GHz. Nakon toga zadatak je bio provjeriti klijavost svakog od tretiranih uzoraka i usporediti ih s kontrolnim uzorkom. Sljedeći je korak bio napraviti analizu dobivenih rezultata. Naposljetku, cijelo je vrijeme bilo važno okolišne parametre držati pod kontrolom.

2. TRETIRANJE SJEMENA SUNCOKRETA SORTE "LUKA" IZMJENIČNIM EM POLJEM

Polazna hipoteza ovog istraživanja je da elektromagnetsko zračenje utječe na ukupnu klijavost, energiju klijanja te masu klijanca. Za potrebe ovog istraživanja zračene su sjemenke suncokreta (*Helianthus annuus L.*) sorte "Luka" (proizvođač: Poljoprivredni institut Osijek), i to monoharmonijskim signalom u rasponu od 0,8–8 GHz. Sjeme nije predtretirano niskim temperaturama niti tretirano protiv patogena pri sjetvi. U prvom ciklusu 3150 sjemenki odvojeno je u papirnate vrećice sa 150 sjemenki u svakoj.

Zračenje se izvršilo u tri varijante u ovisnosti o trima fizikalnim veličinama: frekvencija, snaga i vrijeme zračenja. U prvoj varijanti frekvencija zračenja je promjenjiva, a snaga i vrijeme zračenja su konstantni i iznose -10 dBm i 30 minuta. U drugoj varijanti frekvencija i snaga zračenja su ponovljeni, ali se trajanje zračenja povećalo na 60 minuta. Posljednju, treću varijantu u prvom ciklusu eksperimenta karakterizira konstantna frekvencija od 2 GHz, kao i trajanje zračenja od 30 minuta te četiri različite razine snage zračenja koje se kreću od 0 do -12 dBm. Nakon prvog ciklusa i uvidom u dobivene rezultate, u drugom ciklusu ponovno je izvedena prva varijanta, ali ovoga puta s manjim opsegom frekvencije koji je išao od 0,8 do 1,15 GHz s korakom od 0,05 GHz. U svakom ciklusu nalazi se kontrolni uzorak koji nije bio pod utjecajem zračenja.

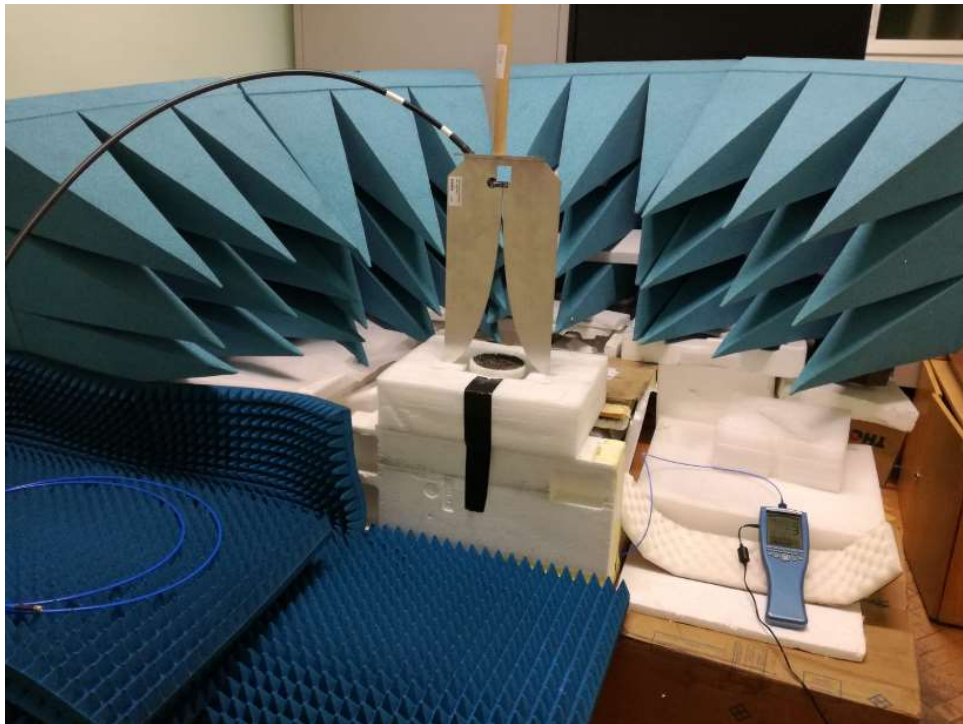
Zračenje sjemenki odrađeno je u laboratoriju za visokofrekvencijska mjerenja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Shema spoja prikazana je na slici 2.1. Za potrebe zračenja korišteni su sljedeći instrumenti: generator signala SG12000, Vivaldi širokopojasna antena 600–6000 MHz, analizator spektra SPECTRAN HF 60105 te piramidalne spužve za elektromagnetsku izolaciju.



Slika 2.1. Shema spoja s prikazom korištenih instrumenata i opreme pri elektromagnetskom zračenju sjemenki

Postupak je zahtijevao postavljanje zadanih parametara na instrumente. Točnije, definiranje frekvencije zračenja i snage zračenja na generatoru signala te postavljanje štoperice na određeno vrijeme, ovisno o tretmanu. Uzorak sjemenki postavljen je na plastičnu kružnu platformu ispod

čijeg se središta nalazi analizator spektra da bi mogao što točnije izmjeriti jakost polja u kojemu se sjemenke nalaze. Detaljniji prikaz vidljiv je na slici 2.2.



Slika 2.2. Tretiranje sjemena električnim poljem u rasponu od 0,8 do 8 GHz u Laboratoriju za VF mjerenja Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku

Nakon elektromagnetskog zračenja, eksperiment je prebačen u laboratorij Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek. U idućem koraku bilo je potrebno od pojedinog tretmana od 150 sjemenki napraviti 3 laboratorijska uzorka. Na 5 filter papira navlaženih s 200 ml destilirane vode postavljen je pojedini uzorak od 50 sjemenki. Navlažene papire nakon postavljanja uzoraka bilo je potrebno smotati u tuljke i zatvoriti u plastične vrećice radi očuvanja vlage. Potrebno je obratiti pozornost da se u pojedinoj vrećici nalazi samo jedan tretman. Sjeme je postavljeno u inkubator konfiguriran na trajanje dana od 8 sati pri temperaturi 30°C, odnosno na trajanje noći od 16 sati uz 20°C.

Četvrti dan od postavljanja uzoraka u inkubator izbrojano je isključivo sjeme gdje su se brojali zdravi i deformirani klijanci te neproključivo sjeme. Također su izbrojani klijanci koji su imali vidljivo razvijeno sekundarno korijenje. Deseti dan zahtijevao je nekoliko dodatnih koraka. Naime, nakon brojanja zdravih i razvijenih klijanaca utvrđena je standardna klijavost te je izmjerena duljina svake biljke i njenog korijena. Zatim je slijedilo odvajanje hipokotila, kotiledona i korijena te

mjerenje njihove mase. Posljednji korak tražio je postavljanje svježe tvari u sušionicu te mjerenje mase suhe tvari nakon 48 sati sušenja.

2.1 Rezultati mjerenja

Dobiveni rezultati analizirani su statističkim metodama obrade podataka pomoću programa Microsoft Office Excell 2016, SAS University Edition te besplatne inačice kalkulatora za statističku analizu dostupnog na [2]. Za obradu podataka korištene su sljedeće statističke metode: analiza varijance (ANOVA) te F-test i Tukey HSD test (engl. "*Honestly significant difference*"), što znači statistički testovi značajnosti i odnosa među dobivenim rezultatima.

Nakon statističke obrade dobivenih rezultata utvrđeno je da elektromagnetsko zračenje u prvoj varijanti utječe značajno na pet ispitivanih parametara vigora sjemena. U tablici 1 vidljiva je značajna razlika kod broja deformiranih klijanaca ($p = 0,0017$) te standardne klijavosti ($p = 0,0035$). U tablici 2, nakon detaljne analize pojedinog klijanca, utvrđena je značajna razlika kod duljine korijena ($p = 0,0115$), mase korijena ($p = 0,0136$) te mase hipokotila po klijanču ($p = 0,0142$).

Tablica 1. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u prvoj varijanti pokusa promatrajući broj neisklijalih (NI) i deformiranih klijanaca (DK), energiju klijanja (EK), standardnu klijavost (SK), masu klijanaca (mK), masu suhe tvari klijanaca (smK) te broj klijanca sa sekundarnim korijenjem nakon četvrtog dana (K).

| f [GHz] | NI (%) | DK (%) | EK (%) | SK (%) | mK (g) | smK (g) | K (%) |
|----------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------|--------|
| 1,0 | 0,00 | 1,33 | 98,67 | 98,67 | 25,02 | 2,05 | 28,47 |
| 1,5 | 2,00 | 0,00 | 94,00 | 98,00 | 26,03 | 2,23 | 37,04 |
| 2,0 | 1,33 | 2,67 | 94,00 | 96,00 | 27,28 | 2,13 | 14,39 |
| 2,5 | 0,00 | 0,00 | 99,33 | 100,00 | 26,64 | 2,19 | 38,30 |
| 3,0 | 0,00 | 0,67 | 98,67 | 99,33 | 28,00 | 2,12 | 16,26 |
| 4,0 | 2,67 | 1,33 | 96,00 | 96,00 | 27,11 | 2,00 | 20,85 |
| 5,0 | 0,00 | 0,00 | 99,33 | 100,00 | 28,70 | 2,01 | 30,91 |
| 8,0 | 1,33 | 1,33 | 96,67 | 97,33 | 28,62 | 2,15 | 8,93 |
| Kontrola | 1,33 | 6,00 | 94,67 | 92,67 | 28,24 | 1,99 | 12,63 |
| F-test | 1,58 | 5,27 | 1,91 | 4,59 | 1,41 | 1,04 | 2,37 |
| p | 0,2006 | 0,0017 | 0,1216 | 0,0035 | 0,2569 | 0,4454 | 0,0610 |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Tablica 2. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u prvoj varijanti pokusa promatrajući duljinu korijena (LK), duljinu hipokotila (LH), masu korijena po biljci (mKOR), masu hipokotila po biljci (mHIP) te masu kotiledona po biljci (mKOT)

| f [GHz] | LK (cm) | LH (cm) | mKOR (g) | mHIP (g) | mKOT (g) |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1,0 | 8,93 | 11,41 | 0,0736 | 0,2809 | 0,1621 |
| 1,5 | 9,39 | 11,09 | 0,0731 | 0,2837 | 0,1774 |
| 2,0 | 9,05 | 12,38 | 0,0856 | 0,3044 | 0,1787 |
| 2,5 | 7,85 | 12,16 | 0,0663 | 0,2986 | 0,1677 |
| 3,0 | 8,95 | 12,20 | 0,0815 | 0,3085 | 0,1740 |
| 4,0 | 8,13 | 12,22 | 0,0873 | 0,3144 | 0,1649 |
| 5,0 | 9,58 | 12,53 | 0,1030 | 0,3085 | 0,1623 |
| 8,0 | 9,00 | 12,07 | 0,0868 | 0,3208 | 0,1802 |
| Kontrola | 8,47 | 12,26 | 0,0962 | 0,3341 | 0,1803 |
| F-test | 3,60 | 1,03 | 3,46 | 3,43 | 0,67 |
| p | 0,0115 | 0,4523 | 0,0136 | 0,0142 | 0,7109 |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Nadalje, Tukey HSD metodom dobiven je odnos između kontrolnog uzorka te uzorka pojedinog tretmana kod onih rezultata gdje je utvrđena statistički značajna razlika. U tablici 3 oznake f1–f8 predstavljaju korištene frekvencije, redom od manje k većoj.

Tablica 3. Statistički značaj dobivenih rezultata pojedinih tretmana (f1–f8) u odnosu na kontrolni uzorak (K) korištenjem Tukey HSD metode.

| Parovi tretmana | $P_{HSD}(DK)$ | $P_{HSD}(SK)$ | $P_{HSD}(LK)$ | $P_{HSD}(mKOR)$ | $P_{HSD}(mHIP)$ |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| K – f1 | 0,0019 | 0,0268 | 0,8999 | 0,2693 | 0,0141 |
| K - f2 | 0,1719 | 0,0619 | 0,4653 | 0,2449 | 0,0222 |
| K – f3 | 0,0019 | 0,4904 | 0,8889 | 0,8999 | 0,3906 |
| K – f4 | 0,0061 | 0,0047 | 0,8339 | 0,0626 | 0,1957 |
| K – f5 | 0,0197 | 0,0112 | 0,8999 | 0,7359 | 0,5607 |
| K – f6 | 0,0019 | 0,4904 | 0,8999 | 0,8999 | 0,8074 |
| K – f7 | 0,0197 | 0,0047 | 0,2419 | 0,8999 | 0,5607 |
| K – f8 | 0,0197 | 0,1356 | 0,8999 | 0,8999 | 0,8999 |

*($P = 0,05$)

Nakon obrade rezultata Tukey HSD testom vidljivo je da kontrolni uzorak ima značajno najviši postotak deformiranih klijanaca te najmanju standardnu klijavost. Kod broja deformiranih klijanaca značajna razlika vidljiva je kod svih uzoraka, osim kod frekvencije 1,5 GHz. Što se tiče standardne klijavosti može se zaključiti da značajna razlika postoji kod četiriju različitih tretmana zračenja, dok se ostali rezultati ne razlikuju značajno naspram kontrolnog uzorka. Iako se prilikom F-testa dobila značajna razlika kod rezultata dobivenih mjerenjem duljine i mase korijena klijanaca, uvidom u rezultate Tukey HSD testa vidljivo je da ne postoji značajna razlika između kontrolnih i zračenih uzoraka. Nasuprot dobivenih rezultata za deformirane klijance i standardnu klijavost, gdje je kontrolni uzorak imao najlošije karakteristike, kod rezultata za masu hipokotila najveću masu imao je kontrolni uzorak sa značajnom razlikom naspram uzorka zračenih frekvencijama 1 GHz i 1,5 GHz. Točnije, 18,92% veću masu od uzorka na frekvenciji 1 GHz te 17,77% od uzorka zračenim frekvencijom 1,5 GHz.

Tablica 4. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u drugoj varijanti pokusa promatrajući broj neisklijalih (NI) i deformiranih klijanaca (DK), energiju klijanja (EK), standardnu klijavost (SK), masu klijanaca (mK), masu suhe tvari klijanaca (smK) te broj klijanaca sa sekundarnim korijenjem nakon četvrtog dana (K).

| f [GHz] | NI (%) | DK (%) | EK (%) | SK (%) | mK (g) | smK (g) | K (%) |
|----------|--------|---------------|--------|--------|--------|---------|--------------------------|
| 1,0 | 0,67 | 0,67 | 99,33 | 98,67 | 28,12 | 2,04 | 63,12 |
| 1,5 | 0,67 | 1,33 | 98,00 | 98,00 | 29,19 | 2,20 | 22,29 |
| 2,0 | 0,67 | 1,33 | 98,67 | 98,00 | 26,47 | 2,13 | 19,52 |
| 2,5 | 0,00 | 1,33 | 98,67 | 98,67 | 28,96 | 2,01 | 8,10 |
| 3,0 | 1,33 | 0,00 | 97,33 | 98,67 | 27,37 | 2,15 | 0,68 |
| 4,0 | 0,67 | 0,67 | 97,33 | 98,67 | 28,23 | 2,08 | 6,89 |
| 5,0 | 1,33 | 3,33 | 97,33 | 95,33 | 28,33 | 2,10 | 12,39 |
| 8,0 | 2,00 | 1,33 | 97,33 | 96,67 | 27,19 | 2,04 | 9,54 |
| Kontrola | 1,33 | 6,00 | 94,67 | 92,67 | 28,24 | 1,99 | 12,63 |
| F-test | 0,28 | 4,22 | 0,88 | 1,88 | 1,06 | 0,88 | 14,51 |
| p | 0,9642 | 0,0053 | 0,5482 | 0,1267 | 0,4320 | 0,5520 | 2*10⁻⁶ |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Druga varijanta eksperimenta je dala rezultate kod kojih samo tri parametra imaju statistički značaj. U tablici 4 vidljiv je vrlo visok značaj kod postotka deformiranih klijanaca ($p = 0,053$) te postotka klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem nakon 4. dana pokusa ($p = 2 * 10^{-6}$). Tablica 5 pokazuje statistički vrlo značajnu razliku ($p = 1,8 * 10^{-5}$) kod mase korijena klijanaca.

Tablica 5. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u drugoj varijanti pokusa promatrajući duljinu korijena (LK), duljinu hipokotila (LH), masu korijena po biljci (mKOR), masu hipokotila po biljci (mHIP) te masu kotiledona po biljci (mKOT)

| f [GHz] | LK (cm) | LH (cm) | mKOR (g) | mHIP (g) | mKOT (g) |
|----------|---------|---------|------------------------------|----------|----------|
| 1,0 | 9,09 | 11,87 | 0,0988 | 0,3051 | 0,1668 |
| 1,5 | 8,42 | 12,25 | 0,0821 | 0,3367 | 0,1759 |
| 2,0 | 8,19 | 12,60 | 0,0671 | 0,3134 | 0,1600 |
| 2,5 | 8,70 | 12,86 | 0,0977 | 0,3267 | 0,1635 |
| 3,0 | 9,35 | 12,58 | 0,0833 | 0,3102 | 0,1733 |
| 4,0 | 8,56 | 12,89 | 0,0696 | 0,3319 | 0,1706 |
| 5,0 | 7,58 | 12,32 | 0,0744 | 0,3446 | 0,1772 |
| 8,0 | 8,15 | 12,79 | 0,0733 | 0,3210 | 0,1710 |
| Kontrola | 8,47 | 12,26 | 0,0962 | 0,3341 | 0,1803 |
| F-test | 2,07 | 1,37 | 10,82 | 1,82 | 0,72 |
| p | 0,0949 | 0,2758 | 1,8 * 10⁻⁵ | 0,1379 | 0,6735 |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Navedena tri parametra, čiji je F-test pokazao značajnu razliku kod rezultata, podvrgnuta su Tukey HSD testu (tablica 6), gdje se u vidi da se kod postotka deformiranih klijanaca kontrolni uzorak značajno razlikuje naspram 7 od 8 ostalih tretmana. Statistički značajna razlika naspram kontrolnog uzorka kod postotka sekundarnih klijanaca pojavljuje se samo u prvom tretmanu, zračenim frekvencijom 1 GHz, dok se kod mase korijena klijanaca statistički značajna razlika pojavljuje u 4 od 8 tretmana, uz napomenu da 4 navedena značajna uzorka imaju manju masu korijena naspram kontrolnog uzorka.

Tablica 6. Statistički značaj dobivenih rezultata pojedinih tretmana (f1–f8) u odnosu na kontrolni uzorak (K) korištenjem Tukey HSD metode.

| Parovi tretmana | $P_{HSD}(DK)$ | $P_{HSD}(K)$ | $P_{HSD}(mKOR)$ |
|-----------------|---------------|---------------|-----------------|
| K – f1 | 0,0112 | 0,0010 | 0,8999 |
| K - f2 | 0,0331 | 0,8685 | 0,2401 |
| K – f3 | 0,0331 | 0,8999 | 0,0010 |
| K – f4 | 0,0331 | 0,8999 | 0,8999 |
| K – f5 | 0,0038 | 0,6883 | 0,3373 |
| K – f6 | 0,0112 | 0,8999 | 0,0025 |
| K – f7 | 0,4904 | 0,8999 | 0,0158 |
| K – f8 | 0,0331 | 0,8999 | 0,0106 |

*($P = 0,05$)

U trećoj, posljednjoj varijanti eksperimenta, uzeta je konstantna frekvencija od 2 GHz uz promjenjivu jakost zračenja u trajanju od 30 minuta. U tablici 7 vidljiva je značajna statistička razlika od postotka deformiranih klijanaca ($p = 0,0449$) te postotka klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem nakon četvrtog dana eksperimenta ($p = 1 * 10^{-6}$). U tablici 8 podaci se značajno razlikuju kod još triju parametara, točnije kod duljine korijena ($p = 0,0394$), mase korijena ($p = 0,0485$) te mase hipokotila klijanaca ($p = 0,0329$).

Tablica 7. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u trećoj varijanti pokusa promatrajući broj neisklijalih (NI) i deformiranih klijanaca (DK), energiju klijanja (EK), standardnu klijavost (SK), masu klijanaca (mK), masu suhe tvari klijanaca (smK) te broj klijanca sa sekundarnim korijenjem nakon četvrtog dana (K).

| P _T [dBm] | NI (%) | DK (%) | EK (%) | SK (%) | mK (g) | smK (g) | K (%) |
|----------------------|--------|---------------|--------|--------|--------|---------|----------------------------|
| 0 | 1,33 | 0,67 | 96,00 | 98,00 | 25,95 | 2,01 | 14,01 |
| -3 | 2,00 | 2,67 | 97,33 | 95,33 | 26,78 | 2,04 | 60,97 |
| -6 | 0,67 | 4,00 | 97,33 | 95,33 | 26,70 | 1,96 | 24,72 |
| -12 | 0,00 | 2,67 | 96,00 | 97,33 | 29,54 | 2,12 | 4,72 |
| Kontrola | 1,33 | 6,00 | 94,67 | 92,67 | 28,24 | 1,99 | 12,63 |
| F-test | 0,72 | 3,62 | 0,42 | 2,58 | 2,21 | 0,62 | 51,87 |
| p | 0,5960 | 0,0449 | 0,7880 | 0,1023 | 0,1415 | 0,6599 | 1 * 10⁻⁶ |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Tablica 8. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u trećoj varijanti pokusa promatrajući duljinu korijena (LK), duljinu hipokotila (LH), masu korijena po biljci (mKOR), masu hipokotila po biljci (mHIP) te masu kotiledona po biljci (mKOT)

| P _T [dBm] | LK (cm) | LH (cm) | mKOR (g) | mHIP (g) | mKOT (g) |
|----------------------|---------------|---------|---------------|---------------|----------|
| 0 | 7,95 | 12,00 | 0,0666 | 0,2964 | 0,1672 |
| -3 | 9,31 | 11,81 | 0,0895 | 0,3050 | 0,1677 |
| -6 | 8,25 | 11,91 | 0,0893 | 0,3010 | 0,1705 |
| -12 | 7,96 | 12,32 | 0,0927 | 0,3297 | 0,1862 |
| Kontrola | 8,47 | 12,26 | 0,0962 | 0,3341 | 0,1803 |
| F-test | 3,80 | 0,81 | 3,52 | 4,06 | 0,87 |
| p | 0,0394 | 0,5446 | 0,0485 | 0,0329 | 0,5110 |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Nadalje su rezultati petorih značajno različitih parametara prošli kroz Tukey HSD test prikazanih u tablici 9, u kojoj oznake P1–P4 predstavljaju korištenu jakost zračenja, redom od veće k manjoj. Utvrđeno je da se kod duljine korijena te mase hipokotila klijanaca ne javlja statistički značajna razlika između kontrolnog i zračenih uzoraka. U tablici 9 vidljivo je da kod postotka deformiranih klijanaca te mase hipokotila klijanaca značajna razlika postoji samo kod prvog uzorka, uz napomenu da je kod kontrolnog uzorka masa korijena klijanaca veća za 30,77% naspram prvog uzorka.

Tablica 9. Statistički značaj dobivenih rezultata pojedinih tretmana (P1–P4) u odnosu na kontrolni uzorak (K) korištenjem Tukey HSD metode.

| Parovi tretmana | $P_{HSD}(DK)$ | $P_{HSD}(K)$ | $P_{HSD}(LK)$ | $P_{HSD}(mKOR)$ | $P_{HSD}(mHIP)$ |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| K – P1 | 0,0286 | 0,8999 | 0,6858 | 0,0449 | 0,6848 |
| K – P2 | 0,2273 | 0,0010 | 0,3073 | 0,8999 | 0,1983 |
| K – P3 | 0,6456 | 0,0908 | 0,8999 | 0,8999 | 0,1218 |
| K – P4 | 0,2273 | 0,4379 | 0,7026 | 0,8999 | 0,8999 |

*($P = 0,05$)

Nakon uvida u rezultate prvog ciklusa i uzevši u obzir dostupnu opremu za elektromagnetsko zračenje, odlučeno je ponoviti prvu varijantu eksperimenta, prilikom čega bi se ovoga puta promatrao utjecaj elektromagnetskog zračenja na užem području frekvencija oko 1 GHz. Najveći broj statistički značajnih rezultata prvog ciklusa nalazi se upravo na frekvenciji 1 GHz te se stoga pošlo u smjeru traženja još pogodnije frekvencije zračenja. Promatrani su isti parametri kao u prvom ciklusu, s tim da se frekvencija kretala od 0,8 GHz do 1,15 GHz. Ograničenost korištene opreme za elektromagnetsko zračenje uzrokovalo je manje odstupanje kod iznosa snage zračenja pri nekim frekvencijama. Stoga je ona opisana iznosom $-3,5 \pm 0,5$ dBm.

Uvidom u rezultate eksperimenta i analizom upotrebom F-testa, statistički značajna razlika pojavljuje se u trima promatranim parametrima. Ukupna masa svježe tvari klijanaca u tablici 10 pokazala je statistički značaj ($p = 0,0372$), dok je u tablici 11 vidljiva izražena statistička razlika kod duljine hipokotila ($p = 8,5 * 10^{-6}$) te mase korijena po klijancu ($p = 1,26 * 10^{-6}$).

Tablica 10. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u prvoj varijanti pokusa promatrajući broj neisklijalih (NI) i deformiranih klijanaca (DK), energiju klijanja (EK), standardnu klijavost (SK), masu klijanaca (mK), masu suhe tvari klijanaca (smK) te broj klijanca sa sekundarnim korijenjem nakon četvrtog dana (K).

| f [GHz] | NI (%) | DK (%) | EK (%) | SK (%) | mK (g) | smK (g) | K (%) |
|----------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------|--------|
| 0,80 | 3,33 | 2,67 | 95,33 | 94,00 | 23,44 | 1,77 | 44,94 |
| 0,85 | 0,00 | 2,00 | 97,33 | 98,00 | 24,79 | 1,86 | 49,43 |
| 0,90 | 1,33 | 0,67 | 95,33 | 98,00 | 25,00 | 1,89 | 48,54 |
| 0,95 | 0,67 | 2,67 | 98,67 | 96,67 | 26,40 | 1,93 | 32,34 |
| 1,00 | 0,67 | 3,33 | 99,33 | 96,00 | 27,47 | 1,72 | 47,66 |
| 1,05 | 0,67 | 0,67 | 97,33 | 98,67 | 24,95 | 1,59 | 47,11 |
| 1,10 | 2,67 | 2,00 | 98,67 | 95,33 | 26,38 | 1,80 | 56,14 |
| 1,15 | 3,33 | 1,33 | 97,33 | 95,33 | 26,50 | 1,79 | 54,22 |
| Kontrola | 1,33 | 4,00 | 98,67 | 94,67 | 23,89 | 1,86 | 36,50 |
| F-test | 1,21 | 0,88 | 0,89 | 0,97 | 2,72 | 0,54 | 1,01 |
| p | 0,3467 | 0,5488 | 0,5436 | 0,4895 | 0,0372 | 0,8078 | 0,4630 |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Tablica 11. Značajnost utjecaja elektromagnetskog zračenja sjemena u prvoj varijanti pokusa promatrajući duljinu korijena (LK), duljinu hipokotila (LH), masu korijena po biljci (mKOR), masu hipokotila po biljci (mHIP) te masu kotiledona po biljci (mKOT)

| f [GHz] | LK (cm) | LH (cm) | mKOR (g) | mHIP (g) | mKOT (g) |
|----------|---------|-----------------------------------|------------------------------------|----------|----------|
| 0,80 | 7,43 | 11,66 | 0,0534 | 0,2940 | 0,1557 |
| 0,85 | 7,18 | 11,45 | 0,0600 | 0,2870 | 0,1605 |
| 0,90 | 7,27 | 11,19 | 0,0628 | 0,2913 | 0,1578 |
| 0,95 | 6,90 | 10,99 | 0,0672 | 0,3065 | 0,1732 |
| 1,00 | 7,21 | 10,91 | 0,0987 | 0,3099 | 0,1641 |
| 1,05 | 6,63 | 11,25 | 0,0699 | 0,2853 | 0,1609 |
| 1,10 | 7,29 | 11,14 | 0,0738 | 0,3107 | 0,1707 |
| 1,15 | 6,51 | 10,77 | 0,0797 | 0,3095 | 0,1672 |
| Kontrola | 6,54 | 9,93 | 0,0742 | 0,2681 | 0,1629 |
| F-test | 1,74 | 11,99 | 15,55 | 2,1871 | 0,6871 |
| p | 0,1578 | $8,5 * 10^{-6}$ | $1,26 * 10^{-6}$ | 0,0801 | 0,6979 |

*Podaci su prosjek triju ponavljanja; ($P = 0,05$)

Nakon toga, Tukey HSD test dao je odnos između kontrolnog i zračenih uzoraka ondje gdje je F-testom dobivena statistički značajna razlika. U tablici 12 vidi se da ipak ne postoji statistički značajna razlika između kontrolnog i zračenih uzoraka promatrajući masu klijanaca. Rezultati duljine hipokotila pokazuju izražen statistički značaj u usporedbi kontrolnog sa svim zračenim uzorcima gdje je na frekvenciji 0,85 GHz ta razlika najveća i iznosi 17,42%. Kod mase korijena po klijancu razlika kontrolnog i zračenih uzoraka statistički je značajna za samo dvije frekvencije. Kod frekvencije 0,85 GHz zračeni uzorak ima za 28,03% manju masu po klijancu od kontrolnog uzorka. Nasuprot tome, kod frekvencije 1 GHz zračeni uzorak ima 33,02% veću masu po klijancu u usporedbi s kontrolom.

Tablica 12. Statistički značaj dobivenih rezultata pojedinih tretmana (f1–f8) u odnosu na kontrolni uzorak (K) korištenjem Tukey HSD metode. Oznake f1–f8 predstavljaju korištene frekvencije, redom od manje prema većoj.

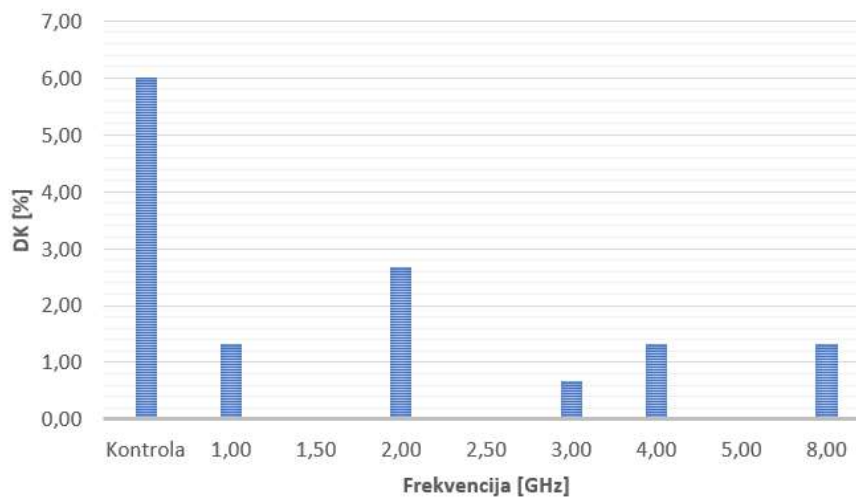
| Parovi tretmana | Tukey HSD (mK) | Tukey HSD (LH) | Tukey HSD (mKOR) |
|-----------------|----------------|----------------|------------------|
| K - f1 | 0,8999 | 0,0010 | 0,0076 |
| K - f2 | 0,8999 | 0,0010 | 0,1219 |
| K - f3 | 0,8999 | 0,0010 | 0,3234 |
| K - f4 | 0,4529 | 0,0013 | 0,8201 |
| K - f5 | 0,1027 | 0,0032 | 0,0015 |
| K - f6 | 0,8999 | 0,0010 | 0,8999 |
| K - f7 | 0,4625 | 0,0010 | 0,8999 |
| K - f8 | 0,4065 | 0,0131 | 0,8999 |

*($P = 0,05$)

3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

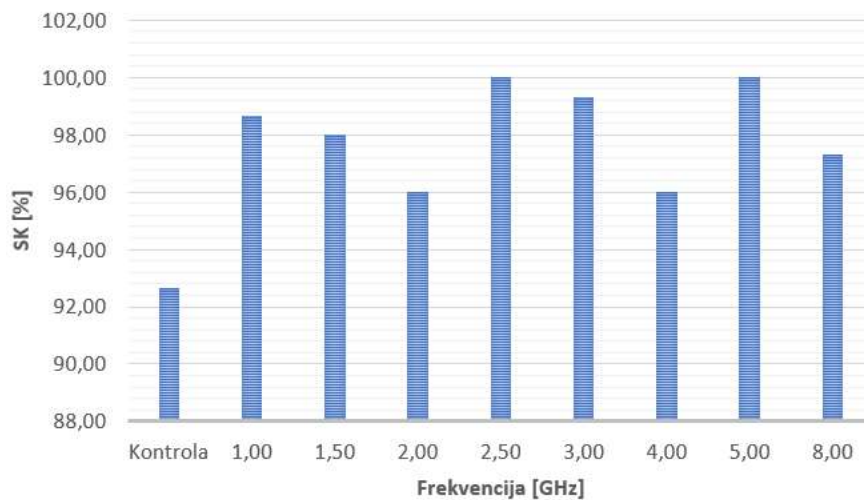
Rezultati pokazuju da kod svake varijante, u nekoliko promatranih parametara, postoji statistički značajna razlika između kontrolnog i barem jednog zračenog uzorka.

U prvoj su se varijanti pokusa od promatranih parametara njih 3 statistički značajno razlikovala naspram kontrolnog uzorka: postotak deformiranog klijanca, standardna klijavost i masa hipokotila po biljci. Rezultati su prikazani na donjim grafovima.



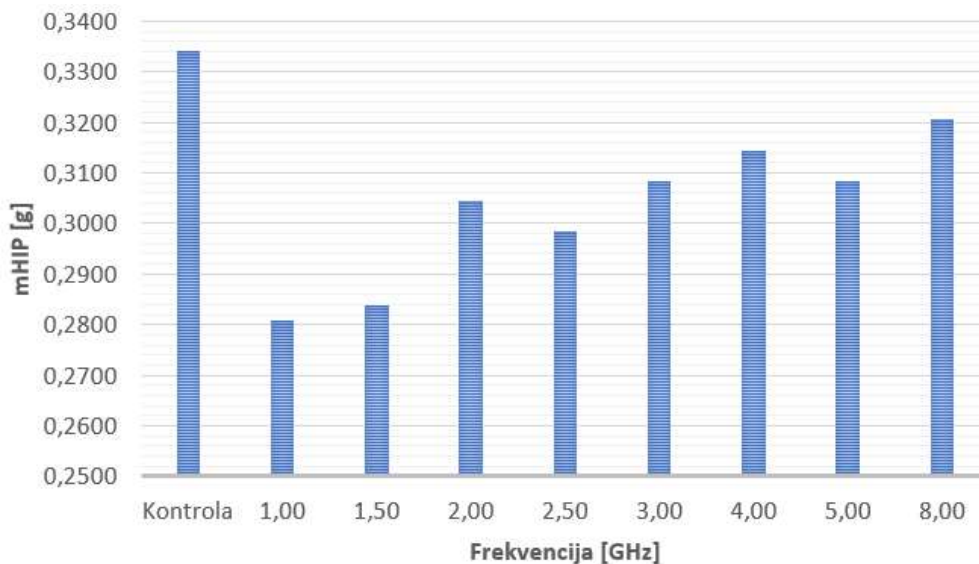
Slika 3.1. Prikaz postotka deformiranih klijanaca

Na slici 3.1. prikazan je postotak deformiranih klijanaca u uzorcima te postoji statistički značajna razlika kod svih zračenih uzoraka osim kod onog zračenog frekvencijom 2 GHz.



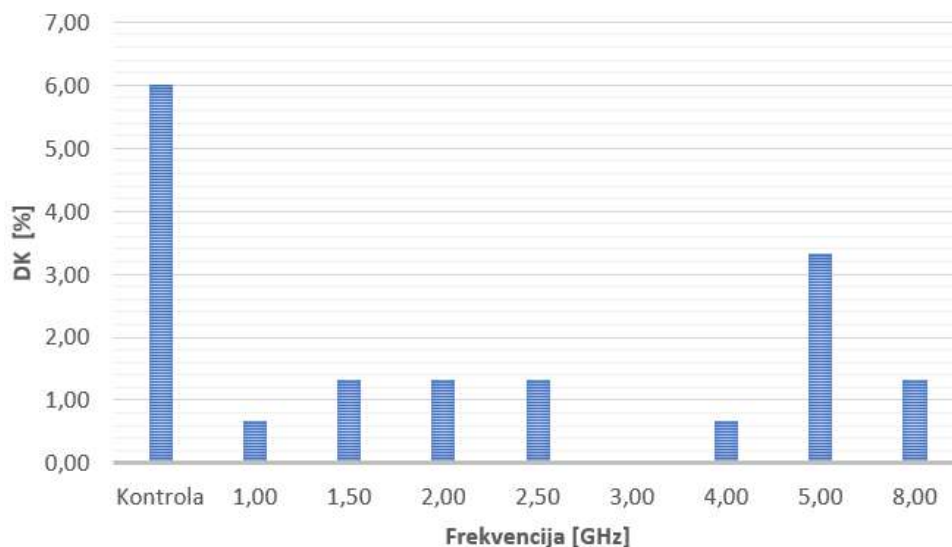
Slika 3.2. Prikaz postotka standardne klijavosti

Pozitivni utjecaj elektromagnetskog zračenja na klijance može se vidjeti na slici 3.2., koja pokazuje da kontrolni uzorak ima najmanji postotak standardne klijavosti, a kod četiriju zračenih uzoraka postoji statistički značajna razlika. Kod prosječne mase hipokotila klijanca situacija je obrnuta. Kontrolni uzorak ima najveću masu prosječnu masu hipokotila, a statistički značajna razlika javlja se kod uzoraka pri frekvenciji 1 i 1,5 GHz.



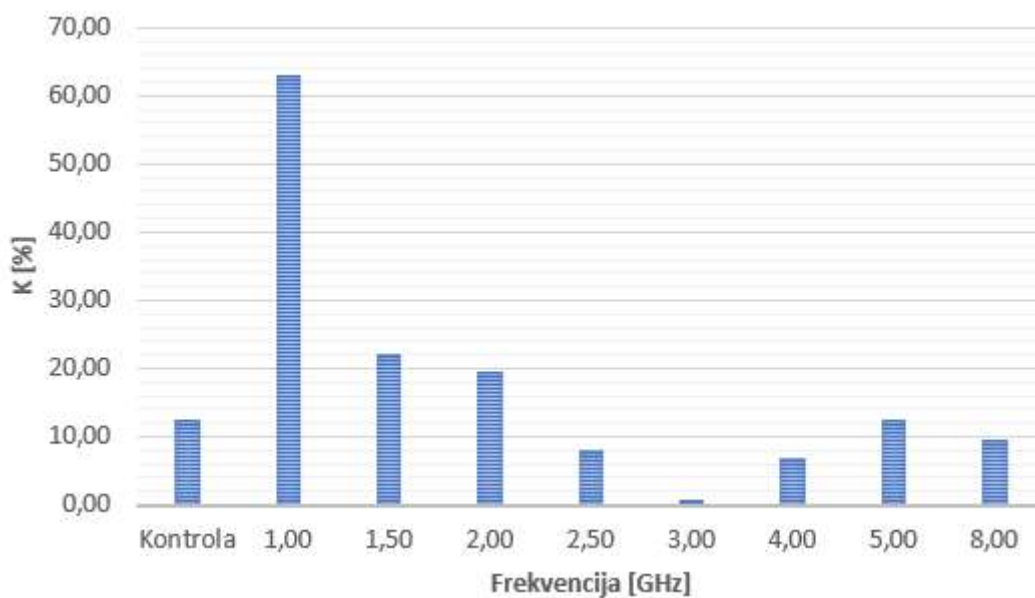
Slika 3.3. Masa hipokotila po biljci

U drugoj varijanti ponovno su tri karakteristike imale statistički značajnu razliku promatrajući kontrolni i zračene uzorke. Na slici 3.4. grafički je prikazan visoki statistički značaj kontrolnog naspram gotovo svih zračenih uzoraka. Osim uzorka zračenog frekvencijom 5 GHz, gdje on postoji, ali je nešto manji.



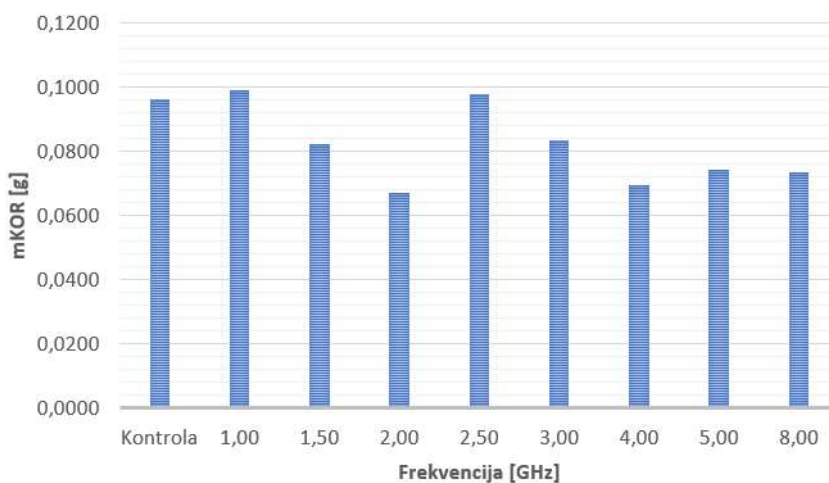
Slika 3.4. Deformirani klijanci

Na sljedećoj slici 3.5 grafički je prikazan statistički značaj broja klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem nakon četvrtog dana eksperimenta. On postoji samo između kontrolnog uzorka i uzorka zračenog frekvencijom 1 GHz. U tom uzorku čak je 63,12 % klijanaca imalo razvijeno sekundarno korijenje. Rezultati ostalih zračenih uzoraka približni su kontrolnom uzorku.



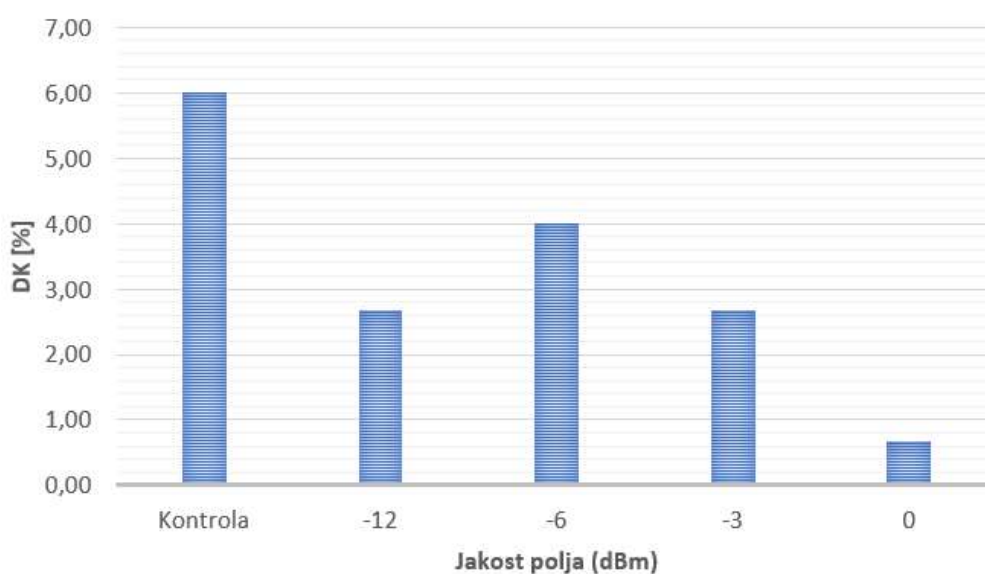
Slika 3.5. Prikaz postotka klijanaca sa sekundarnim korijenjem

Promatrajući masu korijena klijanaca dobivena je statistički značajna razlika između kontrolnog i četiri zračenja uzorka, ali s negativnom karakteristikom gdje su uzorci zračeni frekvencijama 2, 4, 5 i 8 GHz imali značajno manju masu korijena klijanca. Treba istaknuti kako uzorak zračen frekvencijom 1 GHz, kao i u prijašnjem grafu na slici 3.5., pokazuje najbolji rezultat te ima najveću masu korijena klijanca.



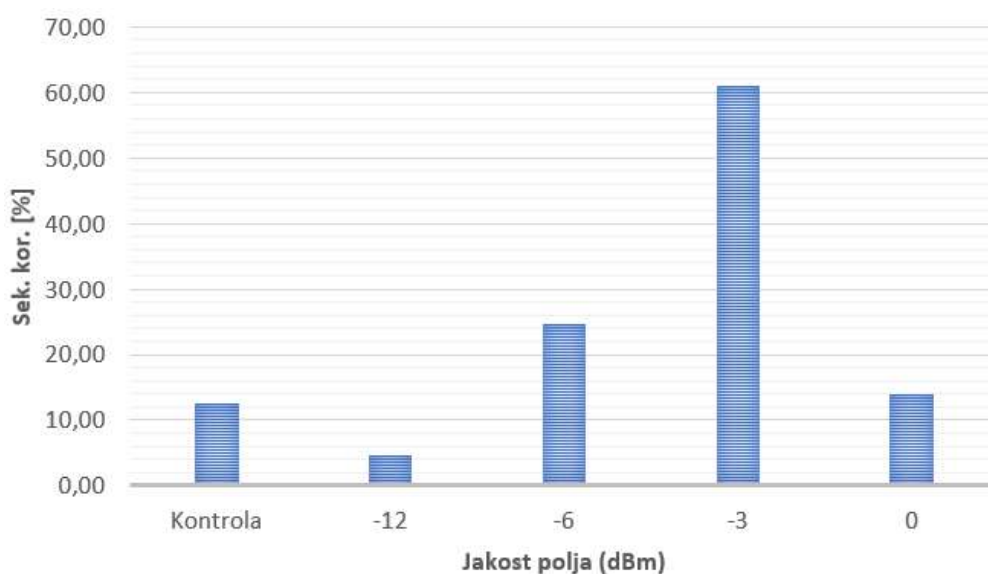
Slika 3.6. Masa korijena po biljci

Kod treće varijante je dobivena statistički značajna razlika u pet mjerenih karakteristika, ali u samo tri karakteristike je ta razlika između kontrolnog i zračenih uzoraka. Kod postotka deformiranih klijanaca statistički značajna razlika postoji jedino kod uzorka zračenog s 0 dBm jakosti elektromagnetskog polja gdje je zabilježeno njih 0,67 %.



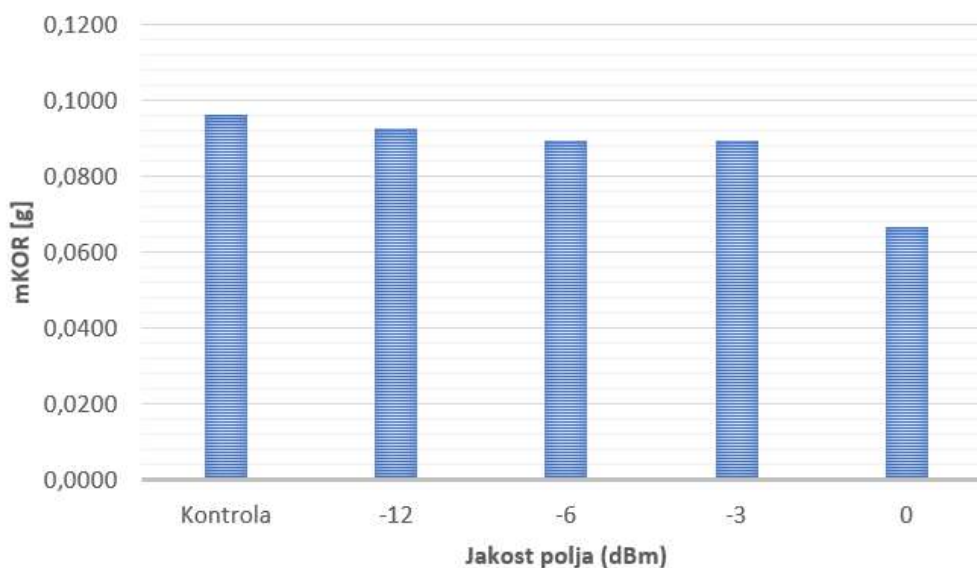
Slika 3.7. Deformirani klijanac

Na slici 3.8. prikazan je vrlo visoki postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem pri jakosti EM zračenja od -3 dBm. Iznosi 60,97 % i vrlo je sličan rezultatu u drugoj varijanti eksperimenta pri frekvenciji 1 GHz.



Slika 3.8. Postotak klijanaca sa sekundarnim korijenjem

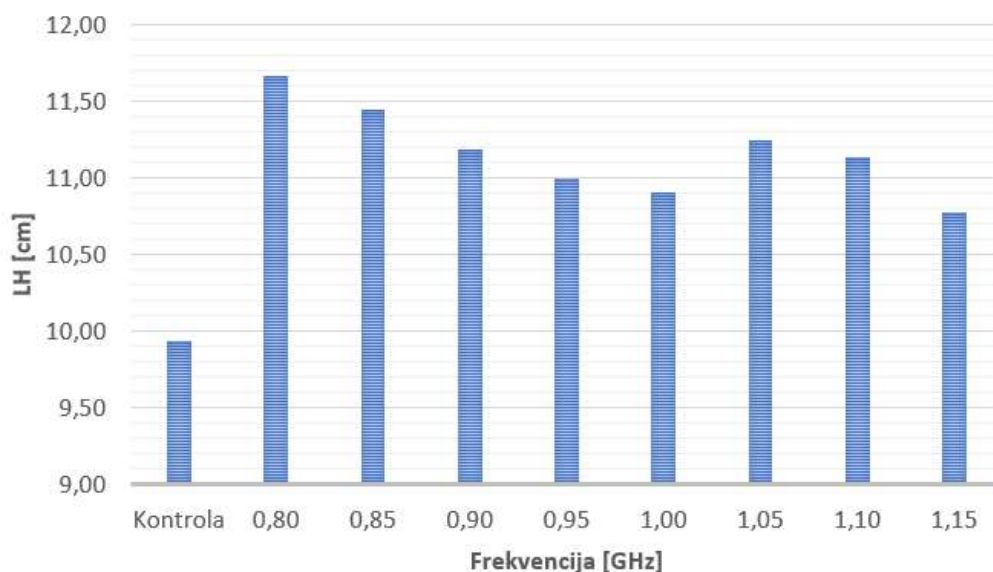
Kod rezultata mjerenja prosječne mase korijena klijanaca vidljiva je, kao i u drugoj varijanti, negativna karakteristika, pri kojoj nezračeni uzorak ima najveću prosječnu masu korijena klijanca. Pritom se tri uzorka ne razlikuju značajno, dok četvrti ima značajno manju prosječnu masu korijena klijanca.



Slika 3.9. Masa korijena po klijanču

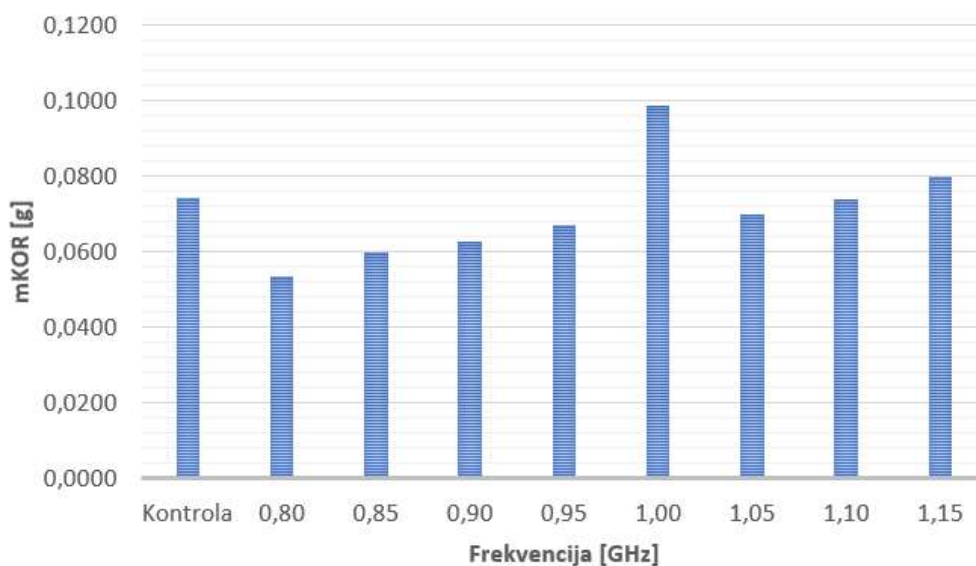
Da bi mjerenje bilo što preciznije i da bi klijanči bili razvijani u potpuno istim uvjetima, u ponovljenoj prvoj varijanti eksperimenta zračenja sjemenki napravljena su mjerenja i za novi kontrolni uzorak. Statistički značajna razlika između tog i zračenih uzoraka pojavila se kod samo dvije mjerene karakteristike klijanaca: duljine hipokotila i prosječne mase korijena klijanca.

Na slici 3.10. prikazane su vrijednosti duljine hipokotila klijanaca te je vidljiva statistički značajna razlika svih zračenih uzoraka u usporedbi s kontrolnim. Najveća vrijednost duljine je kod uzorka zračenog frekvencijom 0,80 GHz, a iznosi 11,66 cm.



Slika 3.10. Duljina hipokotila

Promatrajući vrijednosti prosječne mase korijena po klijancu vidljivo je da se vrijednost kontrolnog uzorka nalazi između najviše i najniže vrijednosti. Statistički značajna razlika javlja se kod dvaju uzoraka. Pri zračenju uzorka frekvencijom 0,80 GHz vidi se negativni efekt zračenja jer je prosječna masa korijena po klijancu najniža i iznosi 0,0534 g. Nasuprot tome, uzorak zračen frekvencijom 1 GHz pokazuje najveću vrijednost koja iznosi 0,0987 g.



Slika 3.11. Masa korijena po klijancu

Izlaganje sjemenki suncokreta (*Helianthus annuus L.*) elektromagnetskom zračenju dovelo je do stimulirajućeg utjecaja na neke od promatranih karakteristika. Primjerice, poboljšanje standardne

klijavosti, razvijenije sekundarno korijenje te smanjen broj deformiranih klijanaca neke su od glavnih karakteristika koje se očituju pri određenim parametrima stresiranja. Kod nekih karakteristika češća je i izraženija razlika naspram kontrolnog uzorka, ali treba napomenuti da ne postoji linearna veza između rezultata i parametara zračenja. Jedno od mogućih objašnjenja za poboljšani razvoj klijanaca tretiranih elektromagnetskim zračenjem ($P < 0.05$) temelji se na činjenici da stres uslijed djelovanja zračenja na tkivnim strukturama klijanca dovodi do prijenosa esencijalnih tvari kroz kanale inducirane na staničnim membranama [3]. Djelovanje elektromagnetskog polja rezultira polarizacijom unutarnjeg i vanjskog naboja stanice u sjemenoj lupini, uzrokujući razliku potencijala i potencijalnog slabljenja stanične stijenke. Odgovarajućom razinom zračenja, odnosno stresiranja klijanaca, moguće je stvoriti brojne pore i slabljenje vanjskog tkiva koje okružuje embrij, rezultirajući bržim razvojem embrija uslijed lakšeg otvaranja sjemene lupine [4]. Osim efekta zagrijavanja, utjecaj visokih frekvencija (1–300 GHz) očituje se i kroz povećanje konduktivnosti i pojačanog djelovanja enzima unutar biološke tvari [5].

4. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu istražen je utjecaj elektromagnetskog zračenja na klijavost sjemena poljoprivredne kulture suncokreta, pri čemu je bio korišten monoharmonijski signal definiranog intenziteta i frekvencije u trajanju zračenja od 30 i 60 minuta. Klijanca su se zatim, zajedno s kontrolnim uzorcima, razvijali u kontroliranim uvjetima gdje su se nakon četvrtog i desetog dana promatrale njihove karakteristike. Izlaganje suncokretovih sjemenki visokofrekvencijskom polju pokazalo je statistički značajnu razliku kod nekih promatranih parametara kao što su: standardna klijavost, broj deformiranih klijanaca, broj klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem i masa korijena klijanaca. 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. Iako bez statistički značajne razlike, nakon četvrtog dana čak sedam od osam ozračenih uzoraka imalo je više od 44% klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem. Naposljetku, 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 može povećati svojstva klijanja, ubrzati klijanje i poboljšati daljnji razvoj sadnice. Neke od beneficija zračenja, kao što su brži razvoj sekundarnog korijenja te njegova veća masa, mogu rezultirati bržim razvojem biljke u njezinu prirodnom okruženju uslijed lakšeg dolaska do hranjivih tvari iz tla. Radi detaljnijeg uvida u utjecaj visokofrekvencijskog elektromagnetskog polja na poljoprivrednu kulturu, u budućim istraživanjima potrebno je provjeriti aktivnost enzima te konduktivnost zračenih uzoraka.

LITERATURA

- [1] S. Urszula, Z. Andrzej, T. Sylwester; *Influence of variable electromagnetic field on the energy and germination capacity of Cannabis sativa L. subsp. culta Serebr*; objavljeno u "*Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE)*" 2018.
- [2] https://astatsa.com/OneWay_Anova_with_TukeyHSD/
- [3] James C. Weaver, *A general phenomenon for manipulating cells and tissues*, J Cell Biochem, 1993.
- [4] Gregory E. Welbaum i Kent J. Bradford, *Water relations of seed development and germination in Muskmelon*, Plant Physiol 92, 1990.
- [5] Kenneth R. Forster, *Thermal and nonthermal mechanisms of intercation of radio-frequency energy with biological systems*, IEEE Vol 28, 2000

Sažetak

Cilj istraživanja bio je utvrditi optimalne elektromagnetske uvjete za rast i razvoj biljaka na nivou klijavosti sjemena. Sjemenke poljoprivredne kulture suncokreta (*Helianthus annuus L.*) tretirane su neionizirajućim elektromagnetskim zračenjem u tri varijante u ovisnosti o tri fizikalne veličine. Korištena frekvencija zračenja nalazi se u spektru od 0,8 do 8 GHz uz trajanje zračenja od 30 ili 60 minuta te jakosti polja od 0 do -12 dBm. U sve tri varijante prisutna je statistički značajna razlika kod promatranih karakteristika klijanaca uspoređenih s kontrolnim uzorkom. Najveći broj statistički značajnih razlika kod promatranih parametara nalazi se uz frekvenciju 1 GHz, pri kojoj je u četvrtom danu eksperimenta utvrđen stimulativni utjecaj zračenja visokim brojem klijanaca s razvijenim sekundarnim korijenjem, smanjenjem broja deformiranih klijanaca te povećanjem standardne klijavosti. Osim efekta zagrijavanja, utjecaj elektromagnetskog zračenja visokih frekvencija očituje se i kroz povećanje konduktivnosti i pojačanog djelovanja enzima unutar biološke tvari, dakle parametara koji u ovom istraživanju nisu utvrđivani, te su potrebna daljnja istraživanja u svrhu određivanja optimalne količine stresa elektromagnetskim zračenjem na klijance poljoprivredne kulture.

Ključne riječi: elektromagnetsko zračenje, frekvencija, standardna klijavost, suncokret

Abstract

Influence of electromagnetic field of high frequencies on germination of an agricultural crop

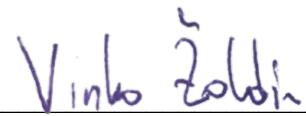
The aim of the study was to determine the optimal electromagnetic conditions for plant growth and development at the level of seed germination. In the study, seed material of sunflower (*Helianthus annuus L.*) was treated with non-ionizing electromagnetic radiation in three variants depending on the three physical quantities. The radiation frequency used is in the spectrum from 0.8 to 8 GHz with a radiation duration of 30 or 60 minutes and a field strength of 0 to -12 dBm. In all three variants, there was a statistically significant difference in the observed characteristics of seedlings compared with the control sample. The largest number of statistically significant differences in the observed parameters is found with the radiation frequency of 1 GHz where on the fourth day of the experiment the stimulating effect of radiation with a high number of seedlings with developed secondary roots, reduction of deformed seedlings and increased of standard germination was determined. In addition to the warming effect, the effect of high frequency

electromagnetic field is manifested through increased conductivity and enhanced enzyme activity within biological matter, parameters that were not determined in this study. Therefore, further research is needed to determine the optimal amount of electromagnetic radiation stress on seedlings.

Keywords: electromagnetic field, high frequency, germination, radiation, seedlings

Životopis

Vinko Žoldin rođen je 3.6.1995. godine u Vinkovcima. Živi u Slakovcima gdje je pohađao Osnovnu školu Slakovci. Nakon osnovne škole upisuje se u Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer elektrotehničar. Akademske godine 2014./2015. upisuje prvu godinu preddiplomskog studija elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, gdje se nakon prve godine opredjeljuje za smjer "komunikacije i informatika". Akademske godine 2017./2018. upisuje prvu godinu diplomskog studija komunikacijskih tehnologija.

Handwritten signature of Vinko Žoldin in blue ink, written over a horizontal line.

(Potpis)