

# Apsorberi EM zračenja zasnovani na biopodlogama - izvedba i mjerenja

---

Varga, Maja

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:200:250950>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**APSORBERI EM ZRAČENJA ZASNOVANI NA  
BIOPODLOGAMA - IZVEDBA I MJERENJA**

**Diplomski rad**

**Maja Varga**

**Osijek, 2020.**

# SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1.	Zadatak diplomskog rada .....	2
2.	ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE .....	3
2.1.	Klasična elektromagnetska teorija.....	3
2.2.	Spektar elektromagnetskih valova.....	7
2.3.	Nastanak i širenje radiovalova .....	9
3.	APSORPCIJA ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA U DIELEKTRIKU .....	12
3.1.	(Dielektrični) apsorberi elektromagnetskog zračenja.....	12
3.2.	Kompozitni apsorberi.....	16
3.3.	Bioapsorberi .....	18
4.	METODOLOGIJA EMPIRIJSKOG ISTRAŽIVANJA.....	22
4.1.	Cilj i zadatci istraživanja.....	22
4.2.	Opis mjernog postava.....	23
4.2.1.	Antene .....	23
4.2.2.	Apsorberi .....	25
4.2.3.	Kućište.....	26
4.2.4.	Vaga .....	32
4.2.5.	Spektralni analizator.....	35
4.3.	Tijek mjerenja apsorpcije pojedinih kultura.....	36
5.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	42
5.1	Gubici uzrokovani istom kulturom različite debljine .....	42
5.1.1.	Soja.....	42
5.1.2.	Pšenica.....	44
5.1.3.	Djetelina .....	45

5.2 Usporedba gubitaka uzrokovanih različitim kulturama jednakih debljina.....	47
5.2.1. Debljina 10 cm.....	47
5.2.2. Debljina 20 cm.....	49
5.2.3. Debljina 30 cm.....	50
5.2.4. Analiza rezultata .....	52
5.3 Gubici uzrokovani istom kulturom različite količine vlažnosti.....	55
5.3.1. Soja.....	55
5.3.2. Pšenica.....	57
5.3.3. Djetelina .....	58
5.4 Usporedba gubitaka uzrokovanih različitim kulturama jednake vlažnosti .....	61
5.4.1. Vlažnost 0.088 l/kg .....	61
5.4.2. Vlažnost 0.175 l/kg .....	63
5.4.3. Vlažnost 0.526 l/kg .....	64
5.4.4. Analiza rezultata .....	67
6. ZAKLJUČAK .....	71
7. LITERATURA .....	73
SAŽETAK .....	76
ABSTRACT.....	77
ŽIVOTOPIS.....	78

# 1. UVOD

Čovjek živi u elektromagnetskom okolišu jer je izložen elektromagnetskom zračenju iz različitih izvora, koji mogu biti prirodni (poput Sunca) ili, pak, ljudske konstrukcije (npr. dalekovodi, radari, antene, itd.). Budući da se sve više promišlja o izloženosti ljudskog organizma zračenju, pri čemu se čak spominje *elektromagnetsko zagađenje* i *elektromagnetski smog* [1], ne čudi što se propituje utjecaj različitih materijala na prostiranje elektromagnetskih valova, kao i električne karakteristike tih sredstava, bilo da se radi o umjetnim materijalima, ili biološkim materijalima [2][3].

Predmet ovoga rada su apsorberi elektromagnetskog (EM) zračenja zasnovani na biopodlogama. Iz tog se razloga u prvim poglavljima rada pozornost usmjerava elektromagnetskom zračenju i njegovoj apsorpciji. Točnije, na početku se elektromagnetsko zračenje određuje kao širenje energije kroz prostor elektromagnetskim valovima [4]. Elektromagnetske valove određuje njihova valna duljina, frekvencija i amplituda (energija), a ovisno o tim parametrima oni se nalaze u različitim dijelovima spektra elektromagnetskog zračenja, od gama-zraka, rendgenskih zraka, ultraljubičastih zraka, zrake vidljive svjetlosti, infracrvenih zraka, do mikrovalova i radiovalova [5]. Ipak, za potrebe ovog rada, korišten je dio EM spektra radiovalova od 300 MHz do 5GHz koji obuhvaća neionizirajuće zračenje, a kojima su bili izložene biopodloge.

Širenjem elektromagnetskih valova prostorom dolazi do različitih pojava, među kojima se ističe apsorpcija elektromagnetskog zračenja, a koja ovisi o vrsti elektromagnetskog zračenja i o materijalu koji ga apsorbira. Biopodloge koje su korištene kao apsorberi načinjene su od slame soje, slame pšenice i velike djeteline (lucerne), bez ili sa dodatkom vode. Kako bi se utvrdilo njihovo apsorpcijsko svojstvo, bilo je potrebno mjeriti gubitke koji se ostvaruju prolaskom elektromagnetskih valova kroz te materijale.

U tu je svrhu osmišljen i izrađen mjerni postav koji se detaljno opisuje u poglavlju o metodologiji, kao i sam postupak mjerenja apsorpcije biopodloga. Bioapsorberi su materijali biljnog podrijetla koji svojim svojstvima otežavaju prijenos energije do prijemne antene, tj. apsorbiraju dio energije elektromagnetskog vala. Velik broj kultura koje ostaju na poljima ne iskorištava se adekvatno. Ukoliko rezultati istraživanja budu pokazali visok koeficijent apsorpcije, to će značiti da se neiskorištene kulture mogu preusmjeriti na racionalniju uporabu, primjerice, u građevinarstvu.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak je diplomskog rada provesti istraživanje o apsorberima elektromagnetskog zračenja zasnovanih na biopodlogama, pri čemu je prvi korak usmjeren na konstrukciju mjernog postava. Cilj je utvrditi i opisati kako biokulture utječu na prostiranje elektromagnetskih valova, odnosno kako se ponašaju u ulozi apsorbera, te koliko se pojedine kulture međusobno razlikuju.

Način na koji će se to odrediti jest izravno mjerenje gubitaka, tj. parametra  $S_{21}$ , pri prolasku elektromagnetskog zračenja s predajne Vivaldi antene kroz bioapsorbere do prijamne Vivaldi antene. Parametri koji će biti uzimani u obzir su debljina biomaterijala (10 cm, 20 cm, 30 cm), *gdje svaki odjeljak ima istu količinu materijala izraženu u kilogramima*; vlažnost biomaterijala, tj. točno određena količina vode koja se nanosi na svaki uzorak biomaterijala (1 l, 2 l ili 6 l); te vrsta biomaterijala (soja, pšenica, velika djetelina).

U dijelu rada koji prethodi izvedbi i mjerenju, potrebno je detaljno pojasniti pojam elektromagnetskog zračenja i njegove apsorpcije, kako bi se mogli pravilno interpretirati rezultati dobiveni mjerenjem. U drugom dijelu rada opisuje se metodologija istraživanja koja se odnosi na opis mjernog postava i tijeka mjerenja. Mjerni postav uključuje i prilagodljivo kućište za biopodloge koje je konstruirano, izrađeno i upotrijebljeno u procesu mjerenja. Mjerenja se vrše u frekvencijskom opsegu od 300 kHz do 5 GHz.

## 2. ELEKTROMAGNETSKO ZRAČENJE

Pojam elektromagnetskog zračenja odnosi se na širenje energije u prostor elektromagnetskim valovima različitih valnih duljina.[4] J.C. Maxwell je još davne 1865. godine iznio teorijski opis elektromagnetskih valova te, kroz spajanje postojećih zakona (Amperov, Faradayev i Gaussov) u jedan cjeloviti sustav međusobno zavisnih fizikalnih jednadžbi, pokazao kako promjenjivo magnetsko polje stvara električno, i obrnuto, kako promjenjivo električno polje stvara magnetsko polje.[6] Uz to jednadžbe definiraju i naboj kao monopolni izvor električnog polja.

### 2.1. Klasična elektromagnetska teorija

Maxwell je postavio opću matematičku teoriju elektriciteta i osnovne zakone elektrodinamike prikazao pomoću četiri jednadžbe sljedećih naziva: Gaussov zakon za električno polje, Gaussov zakon za magnetsko polje, Faradayev zakon indukcije i Amperov zakon [7][8][9]. One opisuju klasičnu elektromagnetsku teoriju i predstavljaju osnovu svih proračuna koji se odnose na elektromagnetske valove i njihovo širenje kroz prostor. Jednadžbama se objašnjava veza između električnog i magnetskog polja, kao i veza tih polja s električnim nabojem, a predstavljene su u nastavku.

*Maxwellova jednadžba 1: Gaussov zakon za električno polje*

Veza između električnog polja i naboja koji ga proizvodi može se predočiti Gausovim zakonom do kojeg se dolazi promatranjem električnog toka polja. Tok električnog polja kroz neku površinu čine silnice homogenog električnog polja koje upadaju okomito na ravnu plohu površine  $S$  pomnožene električnim pomakom toka  $D$ :

$$\Phi = \varepsilon ES = DS, \quad (2-1)$$

gdje se vektor gustoće električnog toka  $\vec{D}$  definira:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (2-2)$$

Ukoliko je kut između vektora  $\vec{S}$  i silnica različit od nule, tada je tok:

$$\Phi = \vec{D} \cdot \vec{S} = DS \cos \vartheta \quad (2-3)$$

Tok električnog polja kroz plohu kugle proporcionalan je naboju unutar kugle, a obrnuto proporcionalan polumjeru kugle. To znači da, općenito uzeto, tok električnog polja kroz zatvorenu plohu proizvoljnog oblika mora biti jednak svom naboju unutar te plohe. Tok električnog polja može se predočiti brojem silnica koje prolaze kroz okomitu površinu S, a iznos vektora  $\vec{D}$  brojem silnica kroz jediničnu okomitu površinu. Kada iz plohe izlazi onoliko silnica koliko je u plohu ušlo, ukupni tok električnog polja jednak je nuli.

Uvrštavanjem izraza (2-5) u izraz (2-4),

$$\Phi = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \sum \vec{D}_i \cdot \Delta \vec{S}_i = \oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (2-4)$$

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi R^2} 4R^2 \pi = Q \quad (2-5)$$

dobiva se jednačba koja predstavlja osnovni zakon elektrostatike:

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (2-6)$$

Naboj Q može se izraziti prostornom gustoćom naboja u volumenu V:

$$Q = \iiint_V \rho \, dV \quad (2-7)$$

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho \, dV \quad (2-8)$$

Gausov zakon za električno polje govori da se sila između dva tačkasta naboja smanjuje kvadratom udaljenosti među njima [9]



### *Maxwellova jednadžba 2: Gaussov zakon za magnetsko polje*

Prema gustoći silnica može se zaključiti je li određeno magnetsko polje slabo ili jako. Gušće silnice znače veću jakost magnetskog polja i veću magnetsku indukciju. Ekvivalentno električnom polju, postoji tok magnetskog polja koji je predstavljen skupom silnica kroz neku plohu. Ukoliko je polje homogeno, tada se ono iskazuje formulom [9]:

$$\Phi_B = BS, \quad (2-9)$$

gdje je  $\vec{B}$  vektor u smjeru silnica okomit na površinu  $S$ , a  $S$  ravna površina.

U slučaju kada silnice homogenog magnetskog polja ne padaju pod pravim kutom na površinu  $S$ , tada se tok izražava kao:

$$\Phi_B = BS \cos \vartheta = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (2-10)$$

Kako bi se izračunao magnetski tok kroz površinu neke plohe, ploha se dijeli na male elemente te je, stoga, magnetski tok izražen plošnim integralom vektora magnetske indukcije:

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2-11)$$

Budući da ne postoje izolirani magnetski dijelovi, broj silnica koje ulaze u plohu ekvivalentan je broju silnica koje izlaze iz plohe. Da je magnetski tok kroz zatvorenu plohu jednak nuli pokazuje sljedeća jednadžba:

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2-12)$$

### *Maxwellova jednadžba 3: Faradayev zakon*

Faradayev zakon indukcije temelji se na otkriću elektromagnetske indukcije, odnosno činjenici da promjenjivi magnetski tok prolaskom kroz neki vodič ili zavojnicu stvara elektromotornu silu na svojim krajevima. Promjena magnetskog toka može se postići mijenjanjem magnetnog polja u vremenu u mirnoj petlji, koja se iskazuje parcijalnom derivacijom toka po vremenu, ili se promjena postiže mijenjanjem toka zbog promjene površine petlje, čiji izraz glasi:

$$\oint_K (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} \quad (2-13)$$

Relativno gibanje vodiča u magnetnom polju također može uzrokovati inducirano električno polje.

$$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \oint_K (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} \quad (2-14)$$

Inducirana elektromotorna sila proporcionalna je brzini promjene magnetskog toka, te je pomoću nje oblikovana treća Maxwellova jednadžba:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2-15)$$

$$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2-16)$$

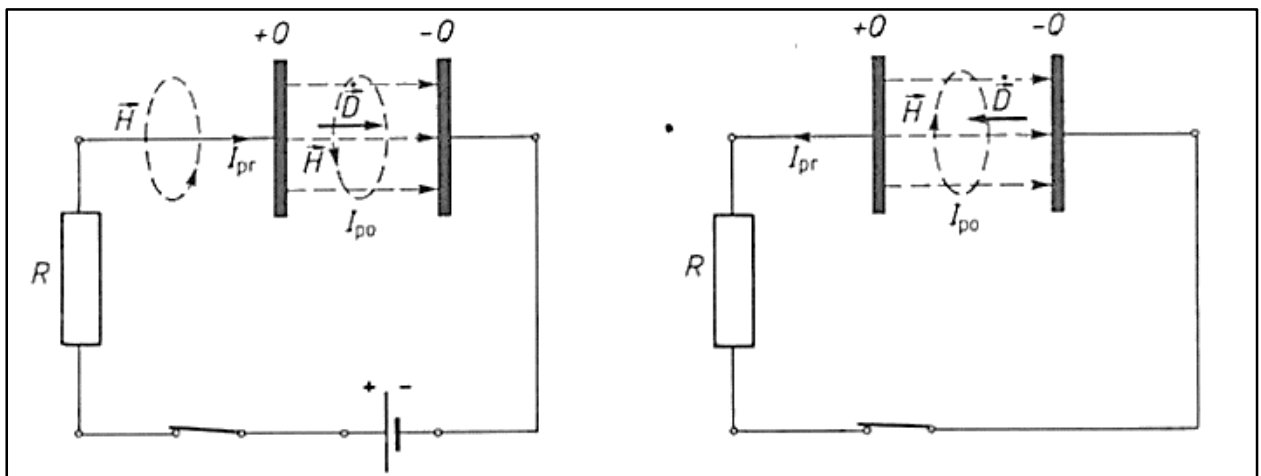
#### Maxwellova jednadžba 4: Amperov zakon

Prema (2-8), struja pomaka i provodna struja su jednake:

$$I_{pr} = \frac{dQ}{dt} = I_{pom} \quad (2-17)$$

Ako se u (2-8) uvrsti (2-17) dobiva se ukupna struja pomaka:

$$I_{pom} = \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (2-18)$$



**Slika 2.1** Shema spoja istosmjernog RC električnog kruga s DC izvorom i sklopkom; a) nabijanje kapaciteta  $C$  preko otpora  $R$ ; b) izbijanje kapaciteta  $C$  preko otpora  $R$  [7]

Na slici 2.1 opažamo kako se strujni krug zatvara pomoću struje pomaka, koja, kao i provodna struja, uzrokuje magnetske učinke, zbog čega je potrebno navesti obje struje u sljedećoj relaciji:

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = I_{pr} + I_{pom}, \quad (2-19)$$

koja kao takva predstavlja poopćeni Amperov zakon.

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = I + \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S}, \quad (2-20)$$

pri čemu  $K$  predstavlja rub plohe površine  $S$ .

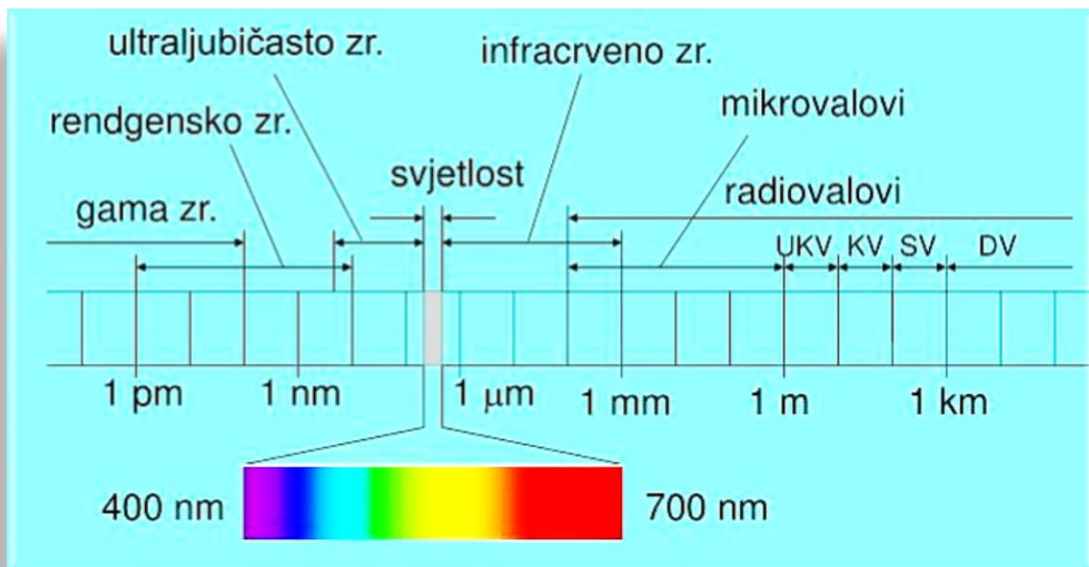
## 2.2. Spektar elektromagnetskih valova

U odnosu na valnu duljinu i frekvenciju na kojoj se odašilje elektromagnetski val, razlikuju se vrste elektromagnetskog zračenja na spektru prikazan slikom 2.2. Duljina vala obrnuto je proporcionalna frekvenciji vala i kreće se u rasponu od  $10^{-16}$  m do  $10^8$  m. Od najniže k najvišoj frekvenciji slijede vrste elektromagnetskog zračenja: radiovalovi, mikrovalovi, infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko zračenje i gama zračenje. Svaki taj dio spektra ima različite izvore (npr. Sunce, mikrovalna pećnica, antena), a porastom frekvencije povećava se i energija koju valovi prenose, pa različite vrste elektromagnetskog zračenja kao i učinak na materiju. [5] Primjerice, za ljudski organizam je štetna izloženost kratim valnim duljinama i visokoj frekvenciji do te mjere da ionizirajuće zračenje (UV, X, gama) oštećuje stanice.

Mjerenje koje je provedeno u svrhu diplomskog rada obuhvaća frekvencijski opseg od 300 kHz do 5 GHz, odnosno radiovalno područje.

Radiovalovi obuhvaćaju frekvencijski spektar zračenja od 300 kHz do 300 GHz. Svoju svrhu pronalaze ponajprije za pomorsku navigaciju dok se s vremenom potencijal radiovalova iskoristio

kako u zrakoplovnoj navigaciji tako i za bežični prijenos informacija namijenjenih komunikaciji i zvučnih poruka. [11][12]



**Slika 2.2** Prikaz raspona spektra elektromagnetskog zračenja u odnosu na valnu duljinu [10]

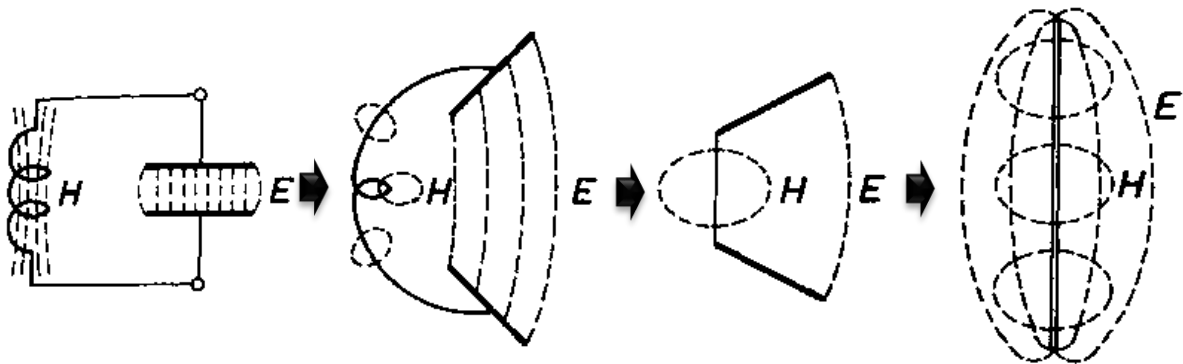
Nakon emitiranja valova od strane odašiljačke antene put radiovalova do prijemne antene znatno je otežan. U idealnim uvjetima ne postoje nikakve prepreke već se val ravnomjerno rasprostire slobodnim prostorom. Međutim, situacija je znatno drugačija u realnim uvjetima. Površina Zemlje ima svoje reljefne nepravilnosti, što umjetne, što prirodne. Brojne zgrade, neboderi, planinski nizovi te ostale visoke prepreke znatno narušavaju kvalitetu prijenosa radiovalova. Ovisno o vrsti i debljini materijala u pravilu radiovalovi lako prolaze kroz neprovodne materijale poput drva, opeke, betona, naravno uz neznatne gubitke. Materijali poput vode i metala teže propuštaju radiovalove, stoga se mogu očekivati i veći gubici.

Kad god se pri prijenosu radiovalova želi postići signal sa što manjim gubicima i smetnjama na manjim udaljenostima, valovi se ograničavaju žicama i koaksijalnim kablovima. Bežični prijenos se koristi kada su mjesta primatelja neodređena ili suviše brojne, kao u slučaju radio i televizijske komunikacije. Iznimka je jedino kabelska televizija kod koje se elektromagnetsko zračenje prenosi

korisnicima koaksijalnim kablskim sustavom, ili iz zajedničke antene, ili izravno iz radijskih postaja. Prijenos elektromagnetskih valova sa što manje smetnji daje signal visoke kvalitete.

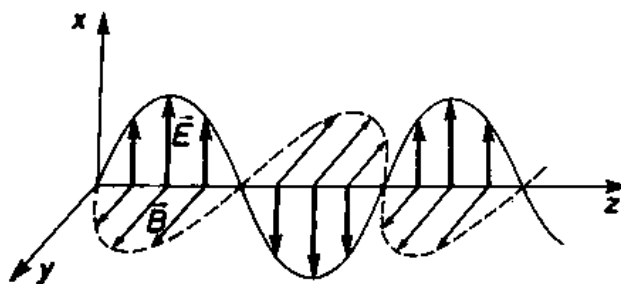
### 2.3. Nastanak i širenje radiovalova

Zračenje elektromagnetskih valova podrazumijeva emisiju energije u prostor [4]. Da bi se elektromagnetski val širio u prostor, titrajni krug mora biti otvoren. To se postiže povećanjem razmaka između ploča kondenzatora i zavoja zavojnice (Slika 2.4). Na taj se način smanjuje induktivitet i kapacitet, a silnice promjenjivog električnog polja zauzmu što veći dio prostora oko titrajnog kruga. Konkretnije, otvoreni titrajni krug stvara elektromagnetsko polje koje je izvor elektromagnetskih valova.



**Slika 2.4** Nastanak elektromagnetskog zračenja u prostor povećanjem razmaka između ploča kondenzatora i zavojnice [13]

Uređaj koji emitira ili prima elektromagnetske valove zove se antena. Iz antene koja odašilje elektromagnetske valove, električno i magnetsko polje istovremeno isijavaju u obliku vrtloga koji se širi u ravninama okomitima na vodič. Tako se, primjerice, iz dipolne antene prostorom širi kuglasti elektromagnetski val, čiji smjer širenja određuje radijus-vektor, a električno i magnetsko polje međusobno su okomiti, kao i na smjer širenja vala (Slika 2.4).



Slika 2.4 Širenje sinusnog elektromagnetskog vala u smjeru  $z$  [13]

Ponašanje vala u prostoru određeno je jednačbama za elektromagnetske valove izvedenima iz prethodno opisanih Maxwellovih jednačbi [13]. Prve dvije Maxwellove jednačbe (2-8) i (2-12) govore kako je električno i magnetsko polje okomito na smjer širenja, odnosno kako tok električnog i magnetskog polja zatvorene plohe iznosi 0. Iz treće Maxwellove jednačbe dokazana je veza električnog i magnetskog polja u bilo kojoj točki prostora (2-16). Iz četvrte Maxwellove jednačbe (2-20) dobivena je diferencijalna jednačba koja u kombinaciji s trećom Maxwellovom jednačbom (2-16) kreira valnu jednačbu za električno i magnetsko polje:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0 \quad (2-21)$$

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 B_y}{\partial t^2} = 0 \quad (2-22)$$

gdje je  $\epsilon$  dielektričnost,  $\mu$  permeabilnost,  $E_x$  električno polje na pravcu  $x$  koji putuje u smjeru  $z$ ,  $B_y$  magnetsko polje na pravcu  $y$  u smjeru  $z$

Brzina širenja elektromagnetskog vala u vakuumu iznosi

$$v = 2.99 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (2-23)$$

s obzirom da je  $\epsilon = \epsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ .

To je ujedno i brzina svjetlosti u vakuumu, čime je dokazano da je svjetlost elektromagnetski val. U vakuumu frekvencija, kao i valna duljina, nemaju utjecaj na faznu brzinu, što znači da je ona jednaka za sve vrijednosti. Iz tog je razloga brzina širenja energije (grupna brzina) jednaka faznoj

brzini. Pri prelasku elektromagnetskog vala u sredstvo različito vakuumu, brzina će biti smanjena relativnom dielektričnošću i permeabilnošću sredstva [13].

Kod širenja elektromagnetskog vala prostorom bitne su dvije konstante:

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (2-24)$$

$$\beta = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)^{1/2} \quad (2-25)$$

gdje je  $\alpha$  prigušna konstanta, a  $\beta$  fazna konstanta.

Obje konstante, kao i fazna brzina  $v_f$ , određuju prostiranje elektromagnetskog vala, ovisno o kružnoj frekvenciji polja  $\omega$ , značajkama  $\varepsilon$ ,  $\mu$  te vodljivosti materijala  $\kappa$ :

$$v_f = \pm c \left[ \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right) \right]^{-1/2}, \quad (2-26)$$

gdje je  $c = \frac{1}{(\mu\varepsilon)^{1/2}}$ .

Svaki val ima svojstvo prenošenja energije. Tako na primjer, radiovalovi odaslani predajnom antenom prenose energiju do prijemnika. Takva energija prenesena u jedinici vremena kroz neku površinu naziva se gustoćom toka energije, odnosno intenzitetom elektromagnetskog vala. Ukupan intenzitet elektromagnetskog vala je zbroj gustoće energije električnog i magnetskog polja predstavljen izrazom:

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon E_x^2 + \frac{1}{2\mu} B_y^2 \quad (2-27)$$

Koristeći relacije za mehaničke valove moguće je izraziti gustoću toka vektorski, odnosno Poyningovim vektorom koji ima smjer jednak smjeru prostiranja vala:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} (\vec{E} \times \vec{B}) \quad (2-28)$$

Izrazom (2-28) označava se smanjenje energije pohranjene u elektromagnetskom polju, a ono je pak jednako, zbroju gubitaka u prostoru i strujanja energije iz promatranog prostora.

### **3. APSORPCIJA ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA U DIELEKTRIKU**

Prenoseći energiju, val elektromagnetskog zračenja širi se prostorom i u tom procesu dolazi u dodir s raznovrsnim materijalima, pri čemu može doći do različitih pojava: refrakcija, refleksija, difrakcija, disperzija i apsorpcija [14]. Iako energija ne može nastati ni iz čega niti nestati, već ona samo prelazi iz jednog oblika u drugi, apsorpcija zračenja predstavlja svojevrstan gubitak tijekom prijenosa energije. Pojednostavljeno, apsorpcija je upravo pretvorba elektromagnetske energije u neku drugu vrstu energije, najčešće toplinsku energiju. Razlog tomu jest taj što elektromagnetska energija predana iz polja nabojima u materijalu pretvara se dijelom u reverzibilni dio, a dijelom u ireverzibilni dio energije, tj. pretvara se nepovratno u gubitak energije zbog različitih učinaka. [15] Učinci ovise, kako o vrsti elektromagnetskog zračenja koja se apsorbira, tako i o tvari koja ga apsorbira. Te se tvari nazivaju apsorberima. [16]

#### **3.1. (Dielektrični) apsorberi elektromagnetskog zračenja**

Sva sredstva kojima se elektromagnetski valovi šire (osim vakuuma) imaju svojstvo apsorpcije određene količine elektromagnetskog zračenja, makar i vrlo male. Materijali s različitim električnim svojstvima imaju različito izraženo svojstvo apsorpcije elektromagnetskog zračenja. Tako primjerice, materijali s najvećom vodljivošću, poput metala, pokazuju i veću apsorpciju [17]. Vodljivost je sposobnost provođenja električne energije, odnosno struje. Provodnost materijala iskazuje se parametrom provodnosti  $\kappa$  koji se može odrediti eksperimentalnim mjerenjem. Ukoliko je vrijednost parametra  $\kappa$ , veća od približno  $10^7$  S/m pri temperaturi od  $20^\circ\text{C}$ , određena tvar smatrat će se vodičem. Povišenjem temperature, vodljivost se smanjuje. Parametar  $\kappa$  zapravo govori o pokretljivosti negativnih nosioca naboja u atomu (elektrona) koji se, pod djelovanjem određene sile, mogu usmjereno gibati. Materijali s većom provodnošću imaju manju dubinu prodiranja elektromagnetskog zračenja, a koja se definira kao udaljenost na kojoj se val priguši na približno

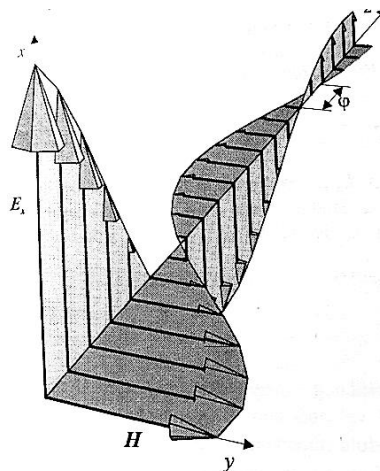


37% svoje vrijednosti. Što je frekvencija vala veća, dubina prodiranja je manja jer se val brže prigušuje (apsorbira). [9]

Kod dobrih vodiča, magnetsko i električno polje nisu u fazi, već magnetsko polje zaostaje za električnim za fazni kut  $\varphi$  određen granicama  $0^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$

Što je provodnost materijala manja, a frekvencija vala veća, to je kut faznog pomaka manji. Zato je kod metala kut faznog pomaka približno  $45^\circ$ , dok on kod materijala s malom provodnosti iznosi približno  $0^\circ$ .

Slika 3.1. prikazuje eksponencijalno opadanje amplitude, tj. odnos vektora električnog i magnetskog polja u trenutku  $t=0$ , u smjeru  $z$  gdje je val magnetskog polja za kut  $\varphi$  pomaknut prema valu električnog polja. [9][15]



**Slika 3.1** Fazni pomak  $\varphi$  između dvaju vektora elektromagnetskog vala u vodljivom materijalu s gubicima [15]

Prigušenje je u dobrim vodičima proporcionalno frekvenciji, permeabilnosti materijala te vodljivosti. Vodiči su svi metali, nedestilirana voda, kiseline, otopine soli, lužine, itd. Bakar i aluminij su najčešće korišteni metali u svrhu provođenja električne struje.

Suprotno opisanome, materijali s malom vodljivošću koji su prema svojim električnim svojstvima izolatori, ne pokazuju visoke vrijednosti apsorpcije zračenja. Takvi materijali, kroz koje prolazi električno polje, ali sami ne vode električni naboj (struju), nazivaju se dielektricima (grč. *dia* kroz). [9]

---

Idealan dielektrik jest vakuum jer predstavlja neograničen, slobodan prostor u kojemu se elektromagnetski valovi mogu nesmetano širiti. Prigušna konstanta  $\alpha$  (2-24) u ovom slučaju je nula jer se snaga ne gubi pri propagaciji, pa zato nema niti prigušenja. Fazna brzina jednaka je brzini svjetlosti jer u idealnom izolatoru nema frekvencijske ovisnosti. U realnim uvjetima, fazna brzina je obrnuto proporcionalna frekvenciji. U dielektricima s gubicima (svi materijali osim vakuuma) fazna je brzina manja od one u vakuumu pa se i valna duljina skraćuje s porastom debljine materijala. [15][18]

Prigušna konstanta različita je od nule, što znači da su električno i magnetsko polje vala prigušeni u smjeru prostiranja. Prigušna konstanta ovisi proporcionalno o frekvenciji, kao i o vodljivosti materijala. Kompleksna dielektrična konstanta može se izraziti u pravokutnom i polarnom obliku [9][15]:

---

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{j\alpha} \quad (3-1)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3-2)$$

gdje je:

$\varepsilon'$  izmjenična dielektričnost,

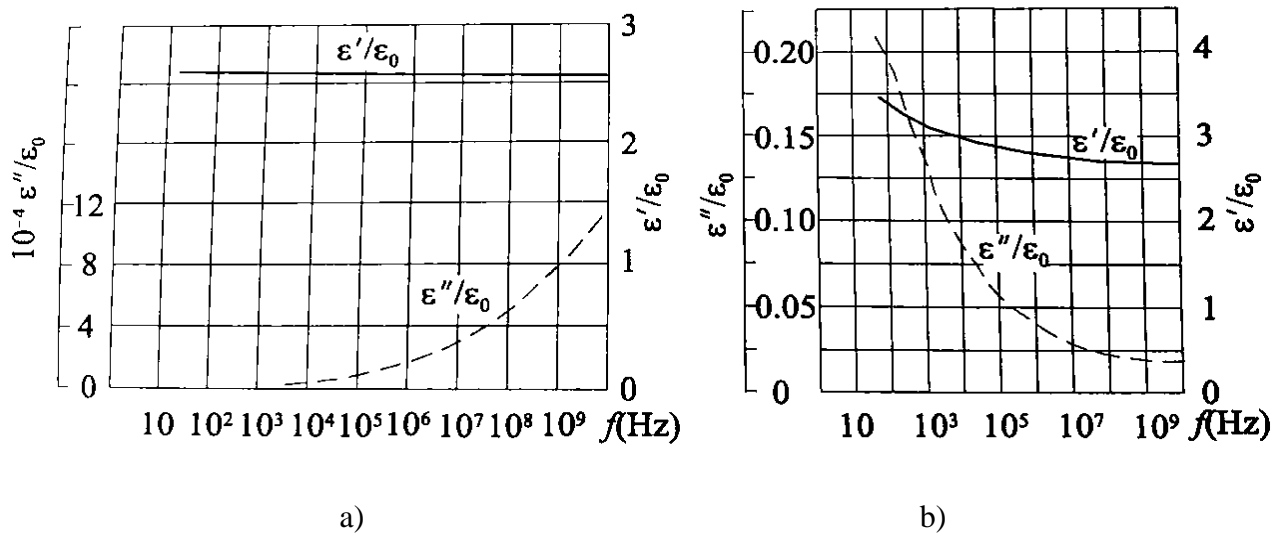
$\varepsilon''$  faktor dielektričnih gubitaka,

$\delta$  je kut dielektričnih gubitaka

---

Kut dielektričnih gubitaka predstavlja tangencijalni odnos realnog i imaginarnog dijela kompleksne dielektrične konstante. Što je kut dielektričnih gubitaka (3-2) veći to su veći gubici u materijalu zbog faktora gubitka koji je u tom slučaju veći nego izmjenična dielektričnost.

Materijal kod kojega je izmjenična dielektričnost približno jednaka za cijelo frekvenzijsko područje, i čiji je imaginarni dio kompleksne dielektrične konstante malen, predstavlja materijal s malim gubicima (npr. polistiren). Suprotno tomu, pleksiglas je primjer materijala koji uzrokuje više gubitaka  $\epsilon''$  [19], a kojemu realni dio nije konstantan pri promjeni frekvencije (Slika 3.2).



**Slika 3.2** Značajke realnog i imaginarnog dijela kompleksne dielektričnosti u ovisnosti za a) polistiren pri  $25^\circ\text{C}$  i b) pleksiglas pri  $25^\circ\text{C}$  [15]

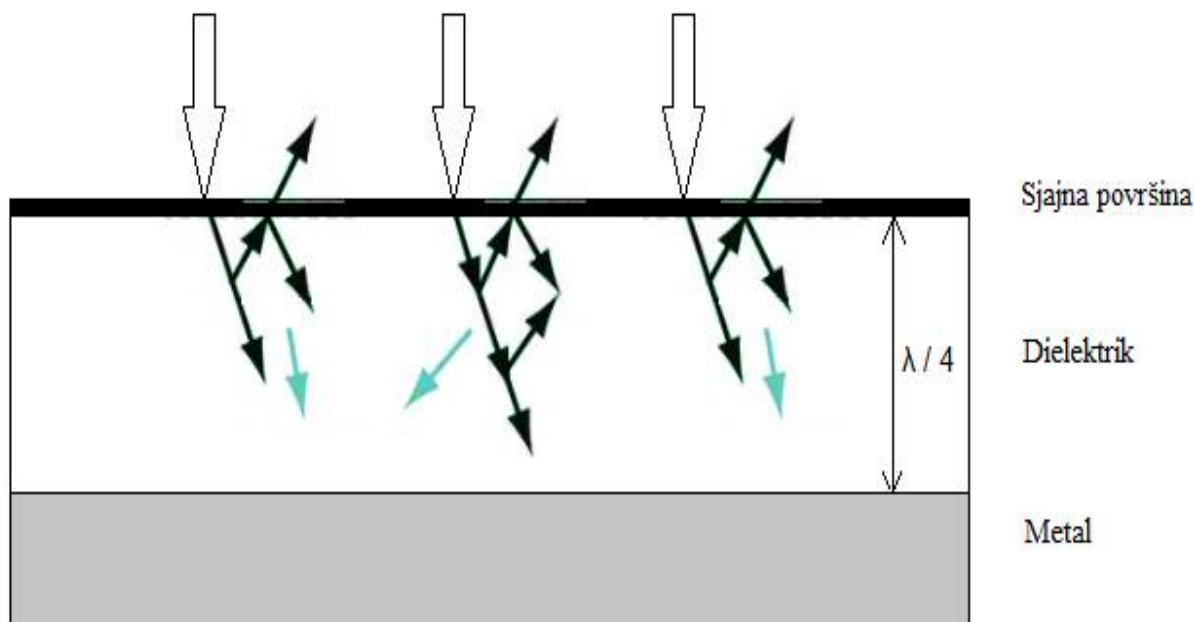
Elektroprovodljivi metali, poput bakra, mogu reflektirati i apsorbirati radiovalove te posljedično ometati njihov prijenos, za razliku od tankog plastičnog omota, voštanog papira, pamuka ili gume koji neće ometati radio valove u takvoj mjeri.[18]

### 3.2. Kompozitni apsorberi

Kod današnje primjene apsorbera elektromagnetskog zračenja, većinom se koriste kompozitni apsorberi koji nastaju kombinacijom dvaju ili više materijala različitih svojstava [17]. Materijali koje je nužno kombinirati radi povećanja apsorpcije su dvovrsni –prvo su nam potrebni metali koji imaju svojstvo dobre vodljivosti, a zatim i dielektrici, koji ga nemaju. Tri su elementa pritom ključna, a to su ravna metalna površina, dielektrik bez gubitaka, čija debljina iznosi četvrtinu valne duljine elektromagnetskog vala koju treba apsorbirati, te tanki sjajni zaslon.[20]

Da bi apsorber bio svrsishodan, on ne treba biti niti dobar dielektrik (apsorbicije gotovo i da nema) niti dobar vodič (više se energije reflektira no što se apsorbira), već treba biti kombinacija oba. Učinkovit apsorber koristi se kod visokofrekventnih mjerenja ili u tkz.“gluhim sobama“(sobe u cijelosti obložene apsorberima). On je najčešće načinjen od gumenog pjenastog materijala s primjesama ugljika i željeza čija je konstrukcija u piramidalnom obliku. Takav oblik omogućava prigušenje elektromagnetskog zračenja niskih (udaljenost od vrha piramide do baze je oko 70 cm) i visokih frekvencija (udaljenost od vrha do baze piramide 7 do 10 cm). [17]

Princip rada kompozitnog apsorbera može se objasniti analizom Salisburyjeva zaslona (Slika 3.3) Najprije val udari u površinu dielektrika pa se dijeli na dva vala, od kojih se jedan reflektira o sjajni zaslon dok drugi val ulazi u dielektrični sloj te se odbija od metalnu površinu koja ga vraća u okolinu. [21]



**Slika 3.3.** *Struktura Salisburyjeva zaslona [21]*

Debljina dielektrika iznosi četvrtinu valne duljine očekivanog elektromagnetskog vala. Međutim, drugi val, koji prodire u dielektrični prostor dva puta prelazi duljinu od  $\lambda/4$ . Jednom pri ulasku te drugi put pri refleksiji od metalnu površinu. To znači da je val pola valne duljine izvan faze s prvim valom kada se kombiniraju, a dva vala se poništavaju. U pravilu bi to značilo da, kada drugi val dosegne površinu dielektrika, zbog interferencije se poništava te se na taj način energija vala ne reflektira u prostor.[22]

Pojam interferencije elektromagnetskih valova objašnjava međusobno ponašanje dvaju ili više valova u prostoru. Koherentni valovi teško se mogu dobiti iz dvaju neovisnih izvora. Da bi se njima lakše maipuliralo jedan val se dijeli u dva snopa te zatim dolazi do superpozicije. Valovi koji su koherentni, odnosno valovi čija je faza, polarizacija i frekvencija jednaka, putujući istim prostorom međusobno superponiraju te kao posljedica toga dobiva se rezultantni val. Valovi koji su u fazi će se zbrojiti, za razliku od valova koji imaju protufaze gdje će se njihovi iznosi oduzeti i kao razlika bit će dobivena 0.[22][19]

### 3.3. Bioapsorberi

Osim kompozitnih apsorbera, kao apsorberi se mogu koristiti i biološki materijali. Radi se o određenim poljoprivrednim kulturama koje se intenzivno uzgajaju na području Istočne Hrvatske, ali najčešće u neapsorpcijske svrhe: slama soje, slama pšenice i velika djetelina. Predmet je ovoga rada upravo mjerenje apsorpcije elektromagnetskog zračenja kod tih kultura u različitim okolnostima. Te su kulture posebno značajne jer njihova svojstva i mogućnosti nisu dovoljno istraživani, a potencijalno mogu biti korisni za smanjenje izloženosti elektromagnetskom zračenju. Osim toga, koristi se dio biljke koji se ne koristi u prehrani ljudi, već se u poljoprivredi koristi za hranjenje stoke. Radi pojednostavljivanja, u radu se koristi samo naziv biljke bez preciziranja dijela biljke koji se koristi.

#### *Soja (Glycine max, L.)*

Soja je biljna kultura podrijetlom iz Azije (Slika 3.4.), a danas je na globalnoj razini glavni izvor bjelančevina visokih hranidbenih vrijednosti te značajna uljna kultura. Točnije, zrno soje se koristi u prehrani ljudi i stoke te u razne industrijske svrhe, budući da lecitin izdvojen iz sojinog ulja ima primjenu u pekarskoj, konditorskoj, farmaceutskoj, tekstilnoj i kemijskoj industriji. Zbog visoke kvalitete bjelančevina i velikog udjela ulja, koristi se kao nadomjestak za meso - u ljudskoj prehrani zadovoljava oko 30 % potreba za bjelančevinama, što je značajno više od drugih kultura. U Republici Hrvatskoj, proizvodnja soje ima pozitivne trendove i u površinama i u urodima zrna zadnjih nekoliko godina. Zbog svoje morfologije, odnosno činjenice da na korijenu razvija kvržice s bakterijama koje ju opskrbljuju dušikom, soja je jedan od najboljih predusjeva za mnoge ratarske kulture [23]



**Slika 3.4.** *Prikaz suhe biokulture soje korištene u diplomskom radu [24]*

U istraživanjima svojstva soje pozornost se usmjerava na proučavanje duljine, širine, debljine i aritmetičke sredine promjera zrna, geometrijske sredine promjera, zakrivljenosti, obujma, mase, gustoće, poroznosti, opadanja tlaka, energetske potrošnje mehaničkog oštećenja itd., [25], dok apsorpcijska svojstva slame biljke ostaju neispitana.

#### *Pšenica (Triticum aestivum, L.)*

Pšenica je biljna kultura koja se dobro prilagođava klimi i tlu pa ima mnogo sorti. Pšenica je najvažniji ratarski usjev, a uzgaja se na oko 23% svjetskih obradivih površina. U Hrvatskoj je jedna od najznačajnijih ratarskih kultura [26]. Primjenu pronalazi prvenstveno u prehrambenoj industriji za izradu kruha, kojime se hrani oko 70% svjetskog stanovništva, a u ekstenzivnom stočarstvu slama služi za ishranu stoke. Primjena pšenične slame (Slika 3.5.) poznata je i u

arhitekturi, zahvaljujući sljedećim svojstvima: ekološki je prihvatljiv materijal, otporan na požar, podatan u izgradnji različitih objekata, zvučni je i toplinski izolator i nema aktivno zračenje [27][28]. Ponašanje slame kao apsorbera elektromagnetskog zračenja nedovoljno je istraženo.



**Slika 3.5** *Prikaz suhe biokulture pšenice korištene u diplomskom radu [29]*



*Velika djetelina ili lucerna (Medicago sativa, L.)*

Velika djetelina (Slika 3.6.) se u Republici Hrvatskoj uzgaja na 42 tisuće hektara pa predstavlja najrašireniju krmnu kulturu, što znači da se ne koristi izravno u ljudskoj prehrani, ali se njome hrani stoka koju ljudi konzumiraju. I u prošlosti je bila značajna kultura poznata već prije 8000 godina. Spada u skupinu višegodišnjih krmnih kultura, koje se koriste 4 do 5 godina, dajući svake godine 4 do 6 otkosa u našem agroekološkom području uz veliku masu godišnjeg prinosa. Bogata je bjelančevinama (2000 do 2400 kg/ha) s povoljnim aminokiselinskim sastavom. [30]



**Slika 3.6** Prikaz suhe biokulture djeteline korištene u diplomskom radu [31]

## 4. METODOLOGIJA EMPIRIJSKOG ISTRAŽIVANJA

### 4.1. Cilj i zadatci istraživanja

Glavni je cilj rada bio istražiti i opisati izvedbu te rezultate mjerenja apsorpcije elektromagnetskog zračenja zasnovane na biopodlogama. Zanimao nas je način na koji biopodloge, kao prirodni apsorberi, utječu na prostiranje elektromagnetskih valova. Kao biopodloga upotrijebljen je biološki supstrat kojega su činile odabrane biljne kulture, a namjera je rada upravo usporediti apsorpcijska svojstva tih supstrata.

U svrhu ostvarivanja toga cilja postavljeni su i izvršeni sljedeći zadatci. Prvo je bilo potrebno pripremiti odgovarajući mjerni postav u kontroliranom okruženju i primijeniti tako postavljen mjerni postav kako bi se različiti supstrati izložili elektromagnetskom zračenju. Važno je bilo osmisliti i izraditi kućište koje će sadržavati biopodlogu izloženu elektromagnetskom zračenju.

Tijekom zračenja supstrata elektromagnetskim valovima mjerene su vrijednosti apsorpcije elektromagnetskog zračenja koju su demonstrirale različite biljne kulture. Točnije, izravno su mjereni gubici energije koji su nastali u ovisnosti o dvije dimenzije apsorbera - debljine sloja i vlažnosti. Tako su dobivene četiri mjerene kategorije:

- a) apsorpcija kod istih kultura različite debljine
- b) apsorpcija kod različitih kultura jednake debljine
- c) apsorpcija kod iste kulture različite vlažnosti
- d) apsorpcija kod različite kulture jednake vlažnosti

Posljednji je zadatak bio analizirati prikupljene podatke iz procesa mjerenja kako bi se odgovorilo na pitanje kakva svojstva apsorbera elektromagnetskog zračenja pokazuje pojedini supstrat primjenom određenog mjernog postava, koji je opisan u nastavku.

## 4.2. Opis mjernog postava

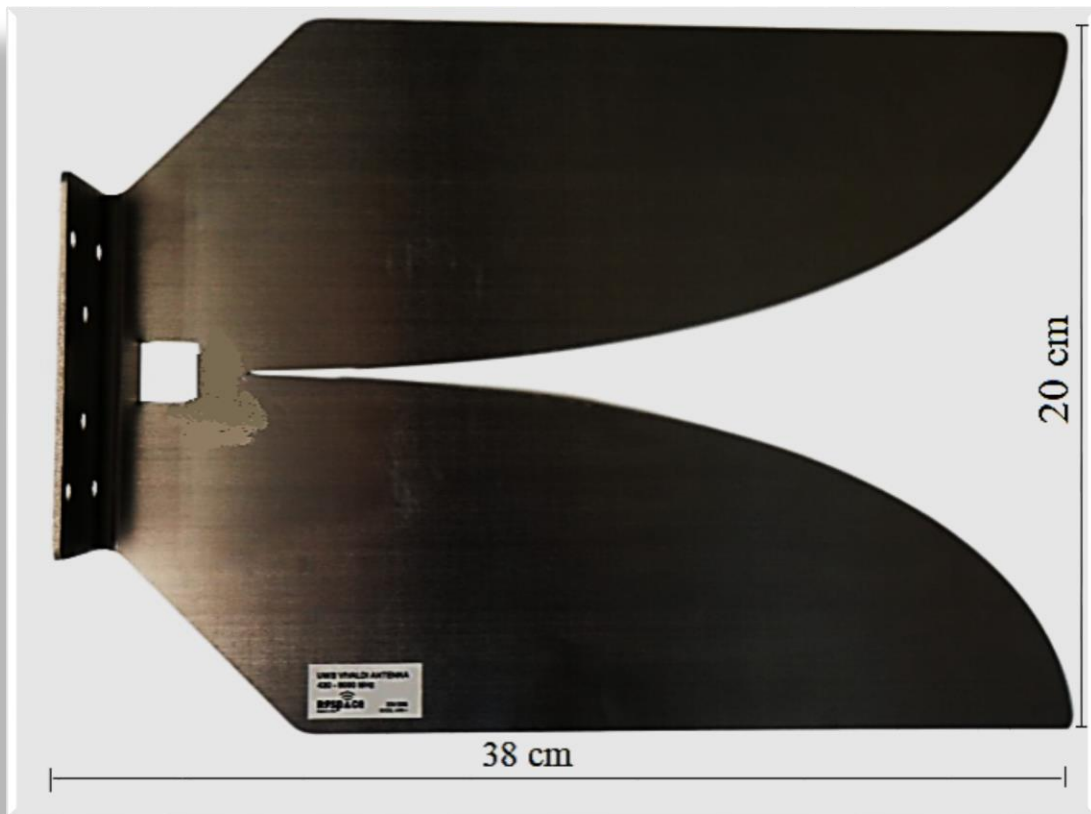
U skladu s postavljenim ciljem, organizirano je mjerenje gubitaka elektromagnetskog zračenja uzrokovanog različitim apsorberima. Mjerni postav izveden je u primjereno opremljenom laboratoriju, a čine ga dvije Vivaldi antene, kućište, apsorberi, vage te mjerni uređaj za analizu spektra N9914A FieldFox Handheld RF. U nastavku se detaljnije opisuje pojedini dio mjernog postava.

### 4.2.1. Antene

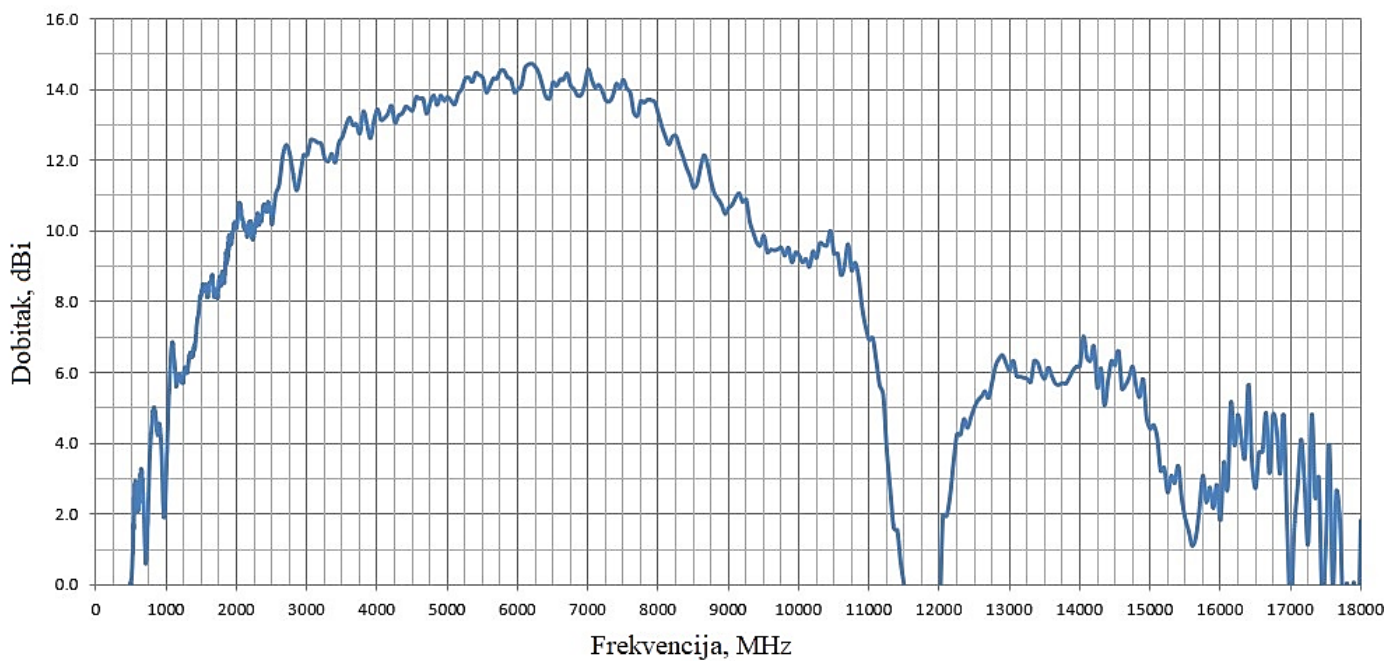
Kako bi se mogao istraživati utjecaj biopodloga na prostiranje elektromagnetskih valova, ključno je osigurati kontinuirano odašiljanje toga zračenja i njegov prijem u kontroliranim uvjetima. U tu su svrhu korištene dvije konstrukcijski jednake antene koje su imale različite funkcije u sustavu mjerenja. Naime, jedna od antena je bila u funkciji predajne antene, čije se usmjereno zračenje prostiralo kroz biopodlogu do druge antene koja je bila u funkciji prijamne antene. Ona je, pak, primala zračenje koje nije bilo apsorbirano u biopodlozi.

Radna frekvencija korištene Vivaldi antene obuhvaća interval od 600 MHz do 6 GHz +. Prednosti takve Vivaldi antene uključuju nizak VSWR preko cijelog raspona bez rezonancija, čisti odziv impulsa, SMA izlazni priključak, podesivu polarizaciju te pristupačnu cijenu. Premda se zbog tih svojstava može koristiti u različite svrhe (GPR, LTE, WIMAX, WIFI, PCS, UWB, GSM, HDTV, IoT, SIGINT, COMINT, ELINT, SDR, EMC ispitivanje itd. [32]), u ovom je istraživanju bila primijenjena isključivo za mjerenje gubitaka elektromagnetskog zračenja (Slika 4.1.).

Kako bi se podatci dobiveni mjerenjem mogli tumačiti, važno je poznavati umnožak umjerenosti antene i njezine učinkovitosti, koji se naziva dobitkom antene. Slika 4.2. predstavlja graf iz kojega je vidljivo kretanje vrijednosti dobitka antene u odnosu na frekvenciju. Dobitak korištene Vivaldi antene je najviši pri njezinoj najvišoj frekvenciji (6 GHz) i iznosi oko 14 dBi.



**Slika 4.1.** *Korištena Vivaldi antena [32]*



**Slika 4.2.** *Dobitak korištene Vivaldi antene pri određenim frekvencijama [33]*

Graf sa slike 4.2. predstavlja dobitak antene s obzirom na frekvenciju iz kojega je jasno vidljivo kako pri manjoj frekvenciji je i dobitak manji. Pri 600 MHz oko 3 dBi, pri 2 GHz iznosi 10 dBi, 13 dBi na 4 GHz, a pri 6 GHz iznosi 14dBi. Znajući prirodu ponašanja Vivaldi antene (na kojim frekvencijama je dobitak veći, odnosno manji), bit će lakše doći do shvaćanja različitog ponašanja biomaterijala te samog utvrđivanja teorijskog dijela pri provedbi eksperimentalnog mjerenja.

To svojstvo antene potrebno je uvažiti pri analizi vrijednosti apsorpcije koje će se utvrditi mjerenjem. Primjerice, na frekvenciji manjoj od 0.6 GHz ne treba očekivati veliku apsorpciju s obzirom da je na toj frekvenciji dobitak neznatan.

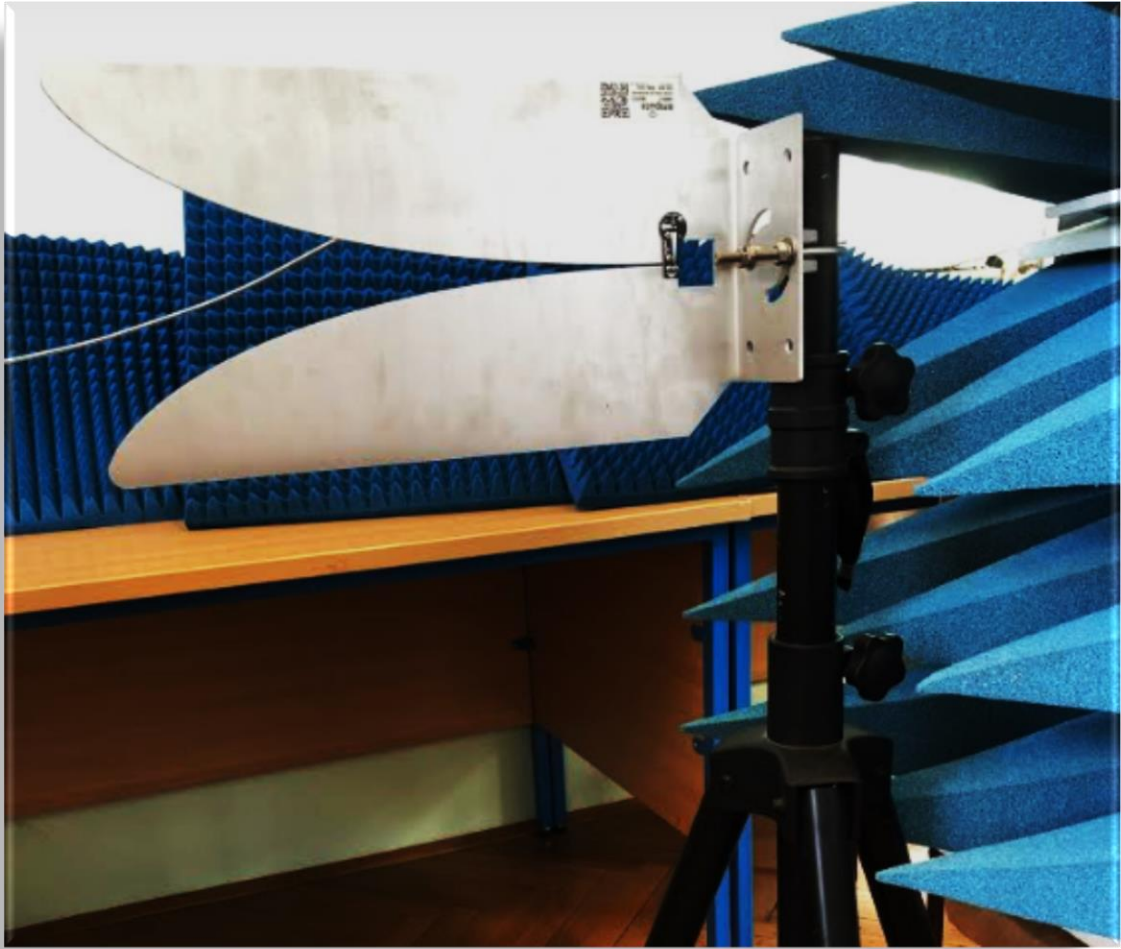
#### **4.2.2. Apsorberi**

Za potrebe istraživanja korištene su dvije vrste apsorbera – kompozitni apsorber čiji apsorpcijski učinak nije mjereno, i biološki materijali kod kojih se tek trebao utvrditi apsorpcijski učinak i predmet su ovoga rada.

Prvi su bili nužni jer je u mjernom prostoru poput laboratorija za mjerenje jakosti visokofrekvencijskih elektromagnetskih polja potrebno osigurati uvjete u kojima je mogućnost refleksije i smetnji uzrokovanih elektromagnetskim valovima iz okoline svedena na najmanju moguću mjeru. Zbog toga je prostor obložen apsorberima koji su upravo namijenjeni za inhibiranje refleksija ili prijenosa elektromagnetskog zračenja iz drugih izvora. Korišteni su kompozitni apsorberi izvedeni su u dvije veličine. Veće dimenzije apsorbera postavljene su iza antena (veće zračenje), dok su bočni prostori obloženi apsorberima manjih dimenzija.

Biološki materijali kod kojih se mjerila apsorpcija odnose se na osušene i usitnjene slame soje, slame pšenice i velike djeteline. One su korištene kao supstrat ili biopodloga ujednačene mase kroz koju je pušteno elektromagnetsko zračenje različitih frekvencija u kontroliranim uvjetima. Osim suhog supstrata, korišteni su i vlažni apsorberi koji su načinjeni tako da se suhim biljkama dodala manja ili veća količina nedestilitane vode.

Prikazani industrijski proizvedeni kompozitni apsorberi (Slika 4.3) čine dio mjernog postava, dok su se tijekom mjerenja smjenjivali različiti biomaterijali unutar konstruiranog kućišta.



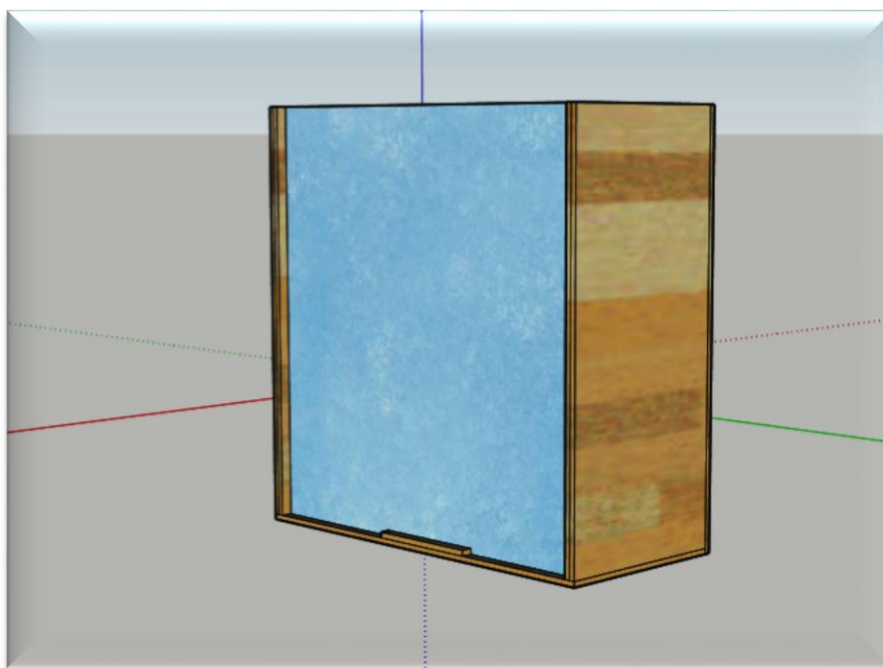
*Slika 4.3. Prikaz kompozitnih apsorbera postavljenih u laboratoriju (piramidalni šiljci)*

### **4.2.3. Kućište**

Konstruiranje i izrada kućišta bio je jedan od glavnih zadataka ovoga rada. U kućište se smješta biopodloga tijekom mjerenja vrijednosti elektromagnetskog zračenja koje kroz nju prolazi pa mora ispunjavati određene uvjete. Kako bi se mjerenje nesmetano odvijalo, konstrukcija mora biti čvrsta i otporna na vlagu.

Prvotna je zamisao bila da čitava pravokutna konstrukcija bude od istog prozirnog materijala (pleksiglasa), ali se ona pokazala neodgovarajućom, budući da ne postoji dovoljno snažno ljepilo

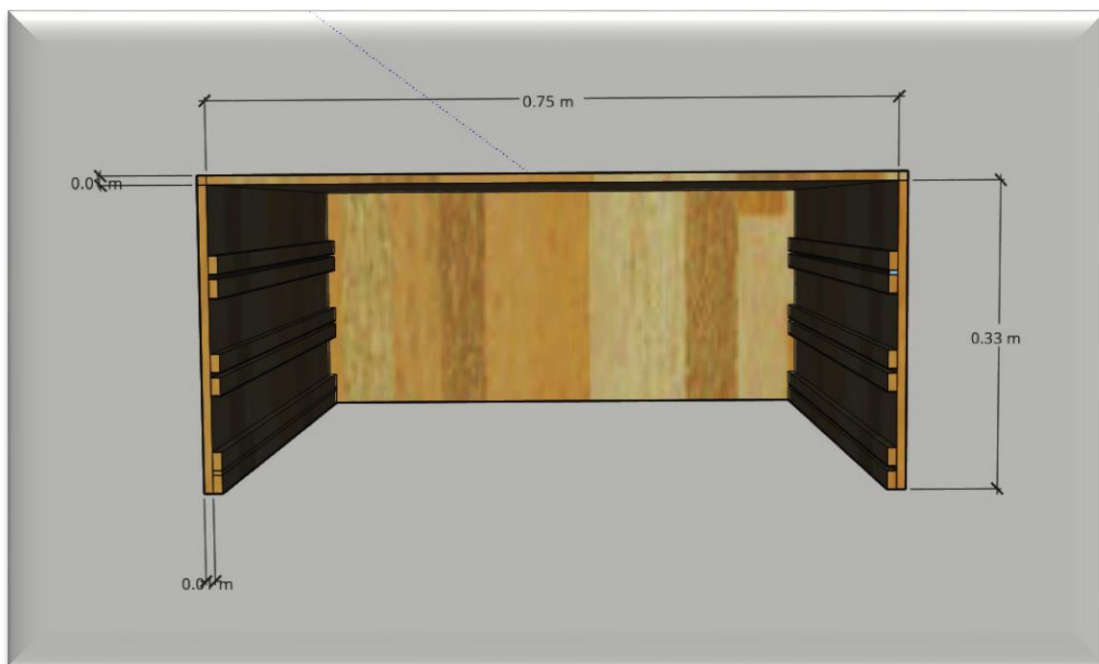
koje bi osiguralo postojanost takve konstrukcije, a nedovoljna čvrstoća dovela bi do većih pogrešaka pri mjerenju. Umjesto toga, odabrana je konstrukcija od dvaju materijala - pleksiglasa i iverala. Iveral je dao stabilnost i nepromočivost za unaprijed određene količine vode, dok je pleksiglas poslužio, zbog svoje male mase, savitljivosti te prozirnosti, kao pregradna stjenka koja ujedno čini jednu plohu kvadra. Veličina konstrukcije trebala je biti dovoljno velikih dimenzija kako bi se mogao što preciznije prikazati utjecaj biomaterijala na elektromagnetsko zračenje. Dimenzije unutrašnjosti kućišta koja će se ispuniti biomaterijalom zbog toga iznose 0.75 m širine, 0.75 m visine i 0.31 m dubine.



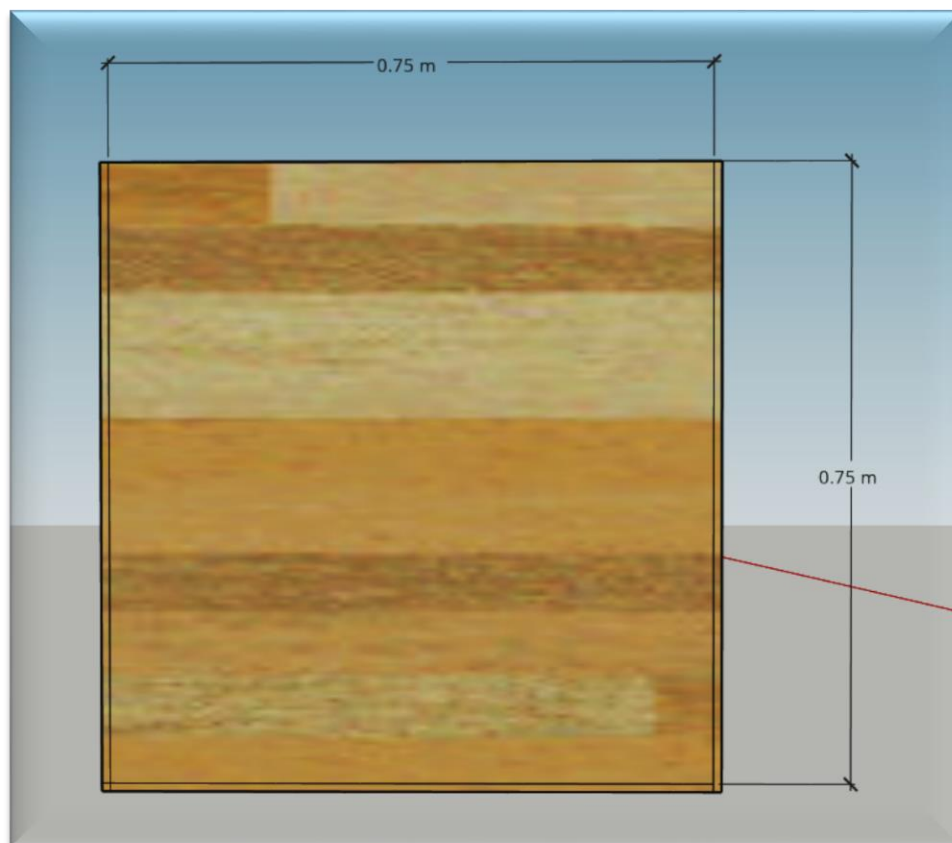
**Slika 4.4.** *Izgled potpuno izrađenog kućišta*

Prije izrade kućišta bilo potrebno napraviti vjerodostojan prikaz konstrukcije pomoću programskog softwera *Sketch Up*, čija je namjena 3D modeliranje. Slika 4.4. prikazuje završni izgled pravokutne konstrukcije kućišta koje je korišteno za izvedbu mjerenja prolaska elektromagnetskih valova kroz biomaterijal.

Kao što se može vidjeti na slici 4.5., debljina stranice kućišta izrađena od iverala iznosila je 0.01 m. Prednja je strana otvorena iz razloga što nju čini pomični pleksiglas, čije dimenzije iznose 0.75 m x 0.75 m.



**Slika 4.5.** *Prikaz kućišta odozgo*

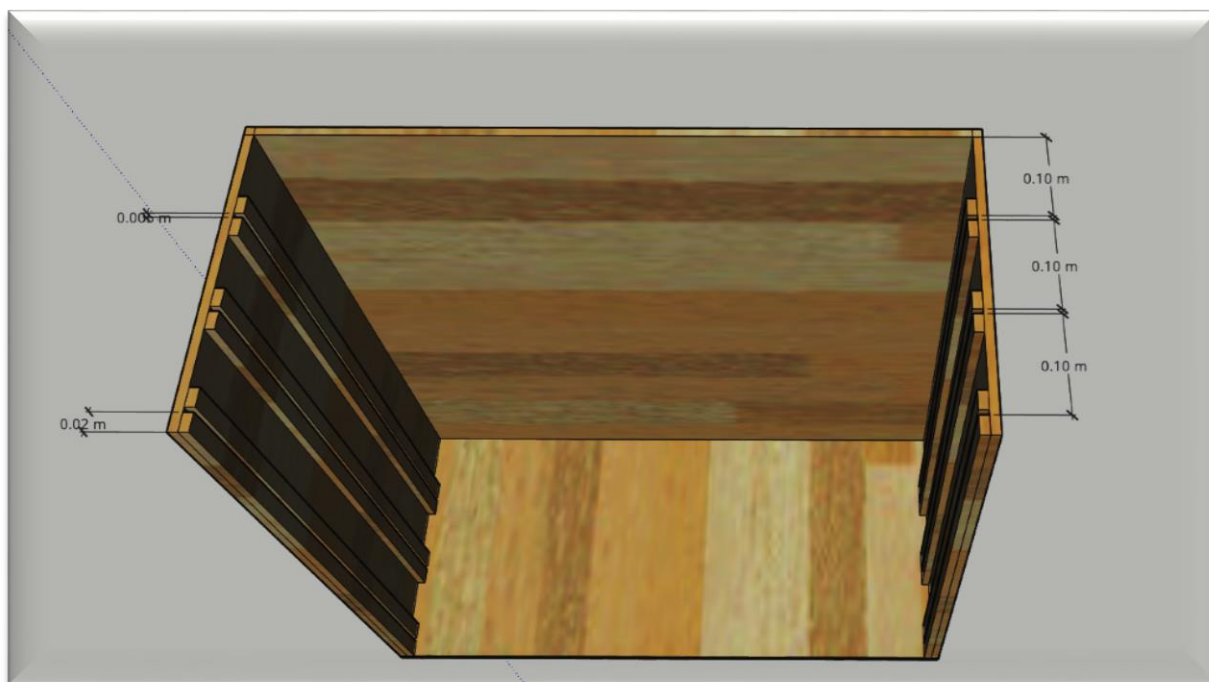


**Slika 4.6.** *Kućište sa stražnje strane*



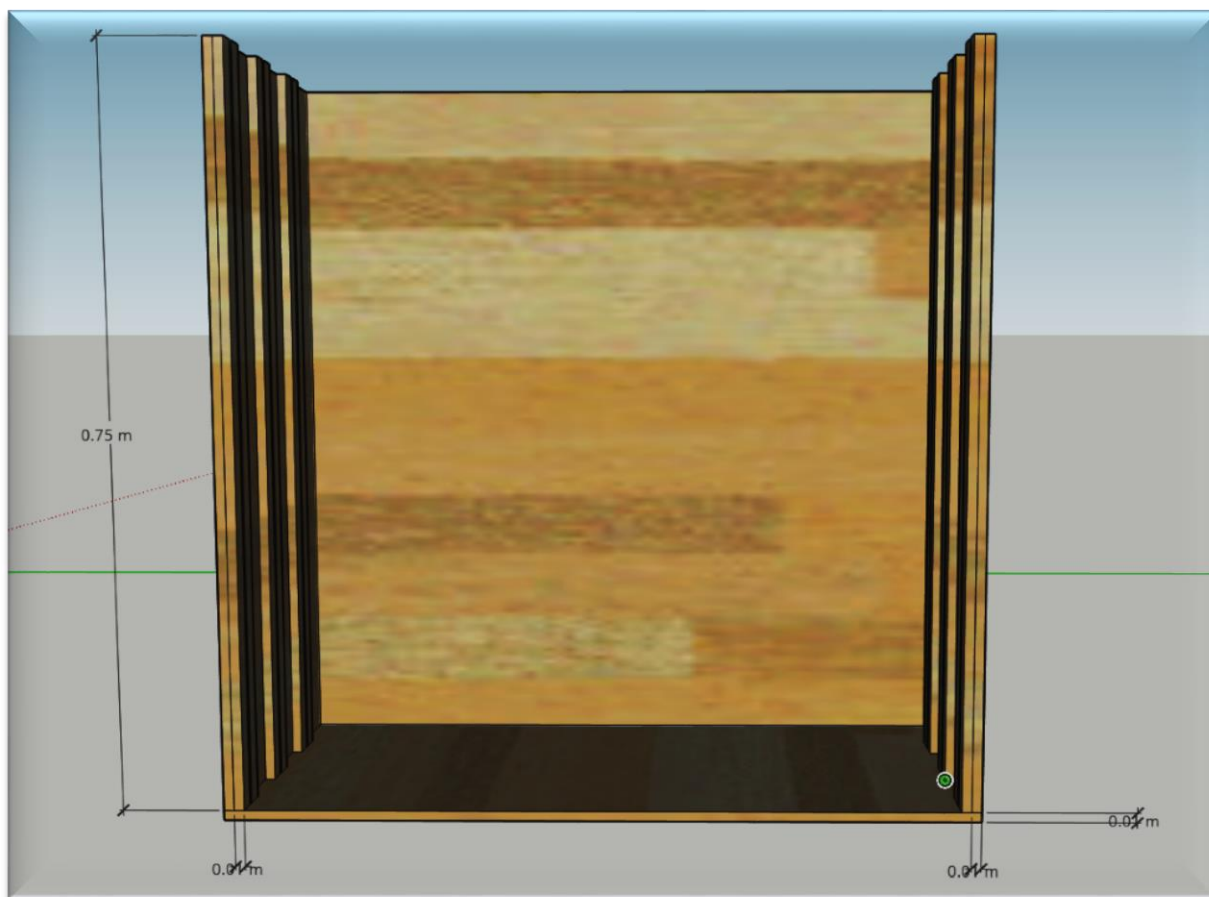
Slika 4.6. prikazuje primjerenu izvedbu konstrukcije kućišta pri kojoj je bilo bitno osigurati da unutrašnjost kućišta ima navedene dimenzije (0.75m x 0.75m x 0.31m), dok je vanjski dio nešto širi zbog same debljine ploha.

Slika 4.7. prikazuje odnos elemenata u unutrašnjosti kućišta, koje sadrži 12 daščica dugih 0.75 m, grupiranih po tri para sa svake strane i učvršćenih ljepilom za drvo. Naime, njima je stvoren utor za plohu pleksiglasa koja će ovisno o mjerenju biti pomična na 0.1 m, 0.2 m i 0.3 m od stražnje plohe. Širina svake daščice iznosi 0.02 m, a njihova je međusobna udaljenost, odnosno veličina utora, 0.005 m. Razlog tomu je širina pleksiglasa koja iznosi 0.003 m pa 0.002 m praznog prostora omogućava njegovu pomičnost.



**Slika 4.7.** Izgled kućišta s dimenzijama

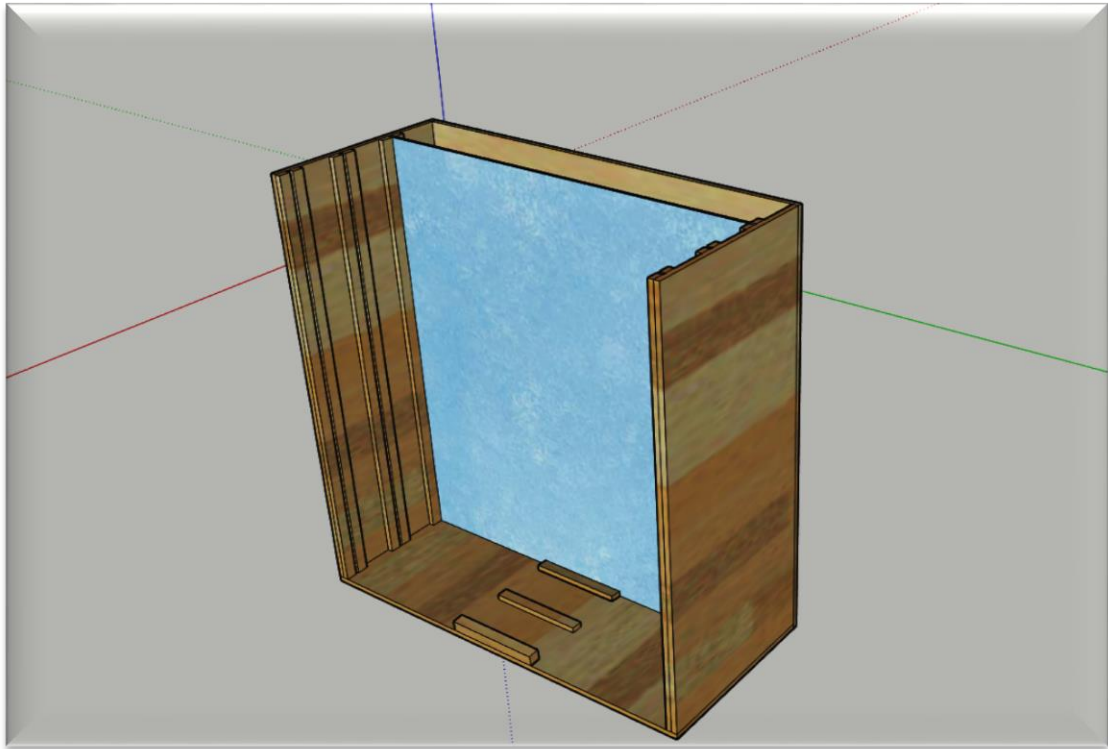
Slika 4.8. prikazuje bokocrt konstrukcije kao i debljinu korištenog materijala. Na svakom dijelu gdje je upotrijebljen iveral debljina materijala je jednaka i iznosi 0.01 m. Takvom se konstrukcijom s jedne strane osigurala stabilnost, a s druge strane postignuta je jednostavnost rukovanja (sastavljanje, prenošenje, podešavanje, itd.).



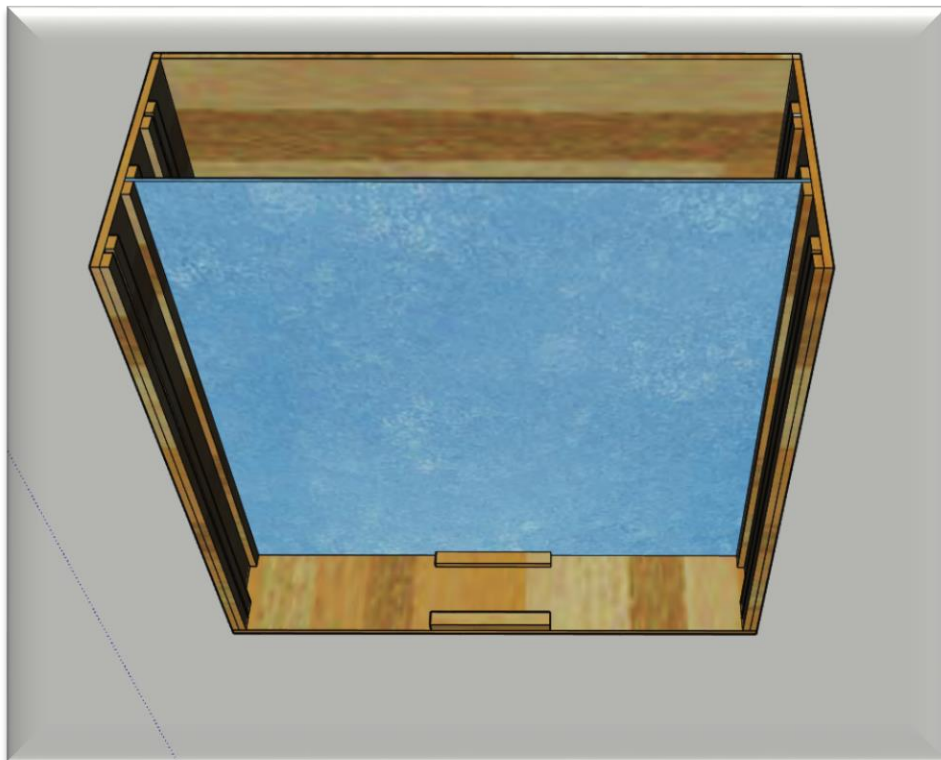
**Slika 4.8.** Izgled kućišta

Slika 4.9. prikazuje izgled konstrukcije u slučaju mjerenja vrijednosti apsorpcije elektromagnetskog zračenja pri debljini biomaterijala od 0.1 m. Biomaterijal se umeće s gornje otvorene strane, a prozirnost pleksiglasa s prednje strane pomaže da se izbjegnu praznine u biomaterijalu ispunjene zrakom te da prostor bude što više ispunjen biopodlogom.

Također se mogu primijetiti daščice na donjoj plohi. Svrha takvih daščica je osigurati da ploha pleksiglasa bude ravna i nepomična. To je važno zato što bi inače volumen biomaterijala pri umetanju i natiskivanju gurao stjenku od pleksiglasa prema van i izbacivao je iz utora. Daščice su lijepljene ljepilom za drvo i postavljene su u ravnini s bočnim daščicama. Pri mjerenju apsorpcije elektromagnetskog zračenja pri prolasku kroz biopodlogu debljine 20 cm, konstrukcija izgleda kao na slici 4.10.



**Slika 4.9.** *Izgled kućišta pri umetanju biomaterijala debljine 10 cm*



**Slika 4.10.** *Izgled kućišta pri umetanju biomaterijala debljine 20 cm*

Izradom konstrukcije kućišta postiglo se da sve biopodloge imaju stalne dimenzije i oblik kvadra, što je omogućilo uspoređivanje izmjerenih vrijednosti njihove apsorpcije elektromagnetskog zračenja.

Kako bi se mjerni materijal mogao staviti u odnos te međusobno uspoređivati, potrebno je koristiti jednak volumen u svakom mjerenju:

$$V = a \cdot b \cdot c \quad , \quad (6-1)$$

gdje je  $a$  visina,  $b$  širina te  $c$  duljina mjernog okvira. Prema jednadžbi (6-1) slijedi:

$$V = 0.75 \cdot 0.30 \cdot 0.75 \quad (6-2)$$

$$V = 0.16875 \text{ m}^3 \quad (6-3)$$

$$V = 0.16875 \text{ m}^3 = 168.75 \text{ dm}^3 \quad (6-4)$$

Kad su izračunate potrebne količine svake pojedine kulture, one su dopremljene u laboratorij s poljoprivrednih gospodarstava, od svake kulture ukupno  $180 \text{ dm}^3$ .

#### **4.2.4. Vaga**

Osim zadanog volumena, bilo je potrebno osigurati jednake mase u svakom od odjeljaka, kako bi odjeljci biopodloge od 0.1 m, 0.2 m i 0.3 m bili međusobno usporedivi. S obzirom da stolne vage (kuhinjske) nisu bile stabilne niti davale odgovarajuću preciznost mjerenja, kao najbolje rješenje pokazala se digitalna vaga (Slike 4.11.), koja je prenosiva, mjeri do 3 decimale i ima ovjes na koju je bilo moguće objesiti biomaterijal. Vaga je imala opciju tariranja i promjene mjerne jedinice.



**Slika 4.11.** *Digitalna vaga*[34]

Kako bi se točnost pri mjerenju povećala, za svaki je odjeljak mjernog okvira od 0.1 m, osigurana masa kulture od 3.80 kg (+/- 0.01 kg). Vrijednost od 3.80 kg dobivena je na način da smo jedan odjeljak mjerne kutije popunili kulturom te ju naknadno izvagali. To je značilo da je za cijeli mjerni okvir potrebno osigurati približno 11.4 kg biomaterijala, budući da ga čine 3 odjeljka, od kojih u svaki stane po 3.80 kg. Mjerna konstrukcija izvedena je na način prikazan na slici 4.12.



**Slika 4.12.** *Mjerna konstrukcija za određivanje mase kultura*

## 4.2.5. Spektralni analizator

Mjerenje je provedeno radiofrekvencijskim spektralnim analizatorom N9914A *FieldFox Handheld*, koji je prikazan na slici 4.13. Frekvencijski interval na kojem operira ovaj uređaj iznosi od 300 kHz do 6.5 GHz.



**Slika 4.13.** RF analizator [35]

Mjerni instrument ima dva priključka od kojih je svaki koaksijalnim kabelom priključen na jednu od antena. Pomoću njega bilježe se vrijednosti parametra  $S_{21}$ , odnosno gubici u frekvencijskom opsegu od 300 kHz do 5 GHz. Mjerenje na ovakav način davalo je brze rezultate koji su pohranjeni na prenosivu memoriju (*USB stick*) priključenu u sam mjerni instrument. Pri svakom mjerenju

spremljena je fotografija zaslona uređaja (*screenshot*), koji je sadržavao grafički prikaz rezultata mjerenja. Upravo taj uređaj izabran je zbog brojnih prednosti: jednostavno kalibriranje pomoću programa *QuickCal*; precizna mjerenja spektra bez potrebe za zagrijavanjem; istovremeno mjerenje četiriju S parametara; mjerenje DTF i TDR jednakim postupkom; mogućnost proširenja opcija; relativno laka prenosiva konstrukcija od samo 3 kg, itd.

### **4.3. Tijek mjerenja apsorpcije pojedinih kultura**

Mjerenje je izvršeno u laboratoriju za mjerenje jakosti visokofrekvencijskih elektromagnetskih polja u sklopu Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Laboratorij je prilagođen za potrebe istraživanja na način da je obložen kompozitnim apsorberima kojima se smanjuje utjecaj refleksije te neželjenog zračenja izvana. Kao što je prikazano na slici 4.14 raspored dijelova mjerne opreme precizno je postavljen, a kako bi se pogreške pri mjerenju svele na minimum, udaljenosti među instrumentima su nakon svakog mjerenja ponovno provjeravane. Nakon što su stvoreni uvjeti za rad, u laboratorij je postavljen instrument za mjerenje kolika je apsorpcija, odnosno koliki su gubici elektromagnetskog zračenja koje je nakon prolaska kroz biomaterijal došlo do prijemne antene.





**Slika 4.14.** *Prikaz mjerne opreme*

Antena je postavljena na visinu od 111,5 cm od poda na stalak čije je tronožno postolje fiksirano ljepljivom trakom kako bi se osigurala statičnost. Udaljenost od vrha antene, kako predajne tako i prijamne, do kućišta s biopodlogom iznosila je 26,5 cm. Konstrukcija kućišta postavljena je na stol oko 65 cm od poda.

Nakon što su antene pravilno postavljene, priključene su na mjerni instrument N9914A *FieldFox Handheld* RF analizator.

Nastupilo je vaganje uz pomoć konstrukcije za mjerenje mase, koja je načinjena je od dvaju panoa, drvenog štapa te metalnog ovjesa, kao što je vidljivo na slici 4.15. Kulture istih masa su razvrstane su u crne PVC vreće.



**Slika 4.15.** *Proces određivanja mase biomaterijala*

Nakon vaganja, slijedio je proces popunjavanja izrađene konstrukcije kućišta određene debljine kao što je prikazano na slici 4.16. Pri tom su postupku nošene zaštitne maske zbog toga što su kulture bile usitnjene, a da sitni dijelovi biljaka (prašina) ne bi ulazili u respiratorni sustav i otežavali disanje.



**Slika 4.16.** *Unošenje biomaterijala u pregradu kućišta*

Kako bi biomaterijal unutar odjeljka bio što ravnomjernije raspoređen, bilo je potrebno dodatno pritiskanje odozgo s vrha nakon otprilike svakog postavljenog kilograma biomaterijala. Slika 4.17. prikazuje popunjenost određenog odjeljka.



**Slika 4.17.** Izgled biomaterijala debljine 20 cm

Nakon tog koraka, biopodloga u konstruiranom kućištu izložena je elektromagnetskom zračenju različite frekvencije. Pritom su provedena mjerenja i snimljeno je 200 uzoraka u intervalu od 300 kHz do 5 GHz koji su prikazivali gubitke S21 (zračenje preneseno od ulaza antene 1 do ulaza antene 2). Posebnom opcijom na RF analizatoru dobio se i graf pojedinog mjerenja koji je spremljen na prijenosnu memoriju (*USB stick*).

Osim mjerenja gubitaka za suhe biopodloge, mjereni su gubici biopodloga nakon što im je dodana voda. U tom su slučaju sva mjerenja izvedena pri debljini biomaterijala od 30 cm mase 11.4kg, pri čemu se samo mijenjao udio vlage. Postupak je, u odnosu na suhu biopodlogu, bio nešto

komplikiraniji jer je bilo potrebno vlagu ravnomjerno rasporediti po cijelom volumenu od 0.16875 dm<sup>3</sup>. Mjerena je apsorpcija pojedine kulture u tri slučaja – ako je biopodlozi dodana 1 l, 2 l ili 6 l vode. Drugim riječima, nakon dodavanja jedne litre vode u biomaterijal, u sljedećem je mjerenju dodana još jedna litra te su u trećem mjerenju dodane još četiri litre vode. Dijeljenjem volumena vode s konstantnom masom biomaterijala moguće je izraziti vlažnost. Pa tako biopodloga s 1 l, 2 l, 6 l vode redom imaju sljedeće iznose vlažnosti: 0.0881/kg, 0.1751/kg, 0.5261/kg. Nakon mjerenja bilo je potrebno provjeriti jesu li svi podaci ispravno pohranjeni u memoriju računala, te kao takvi uzeti su na daljnju obradu.

## **5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA**

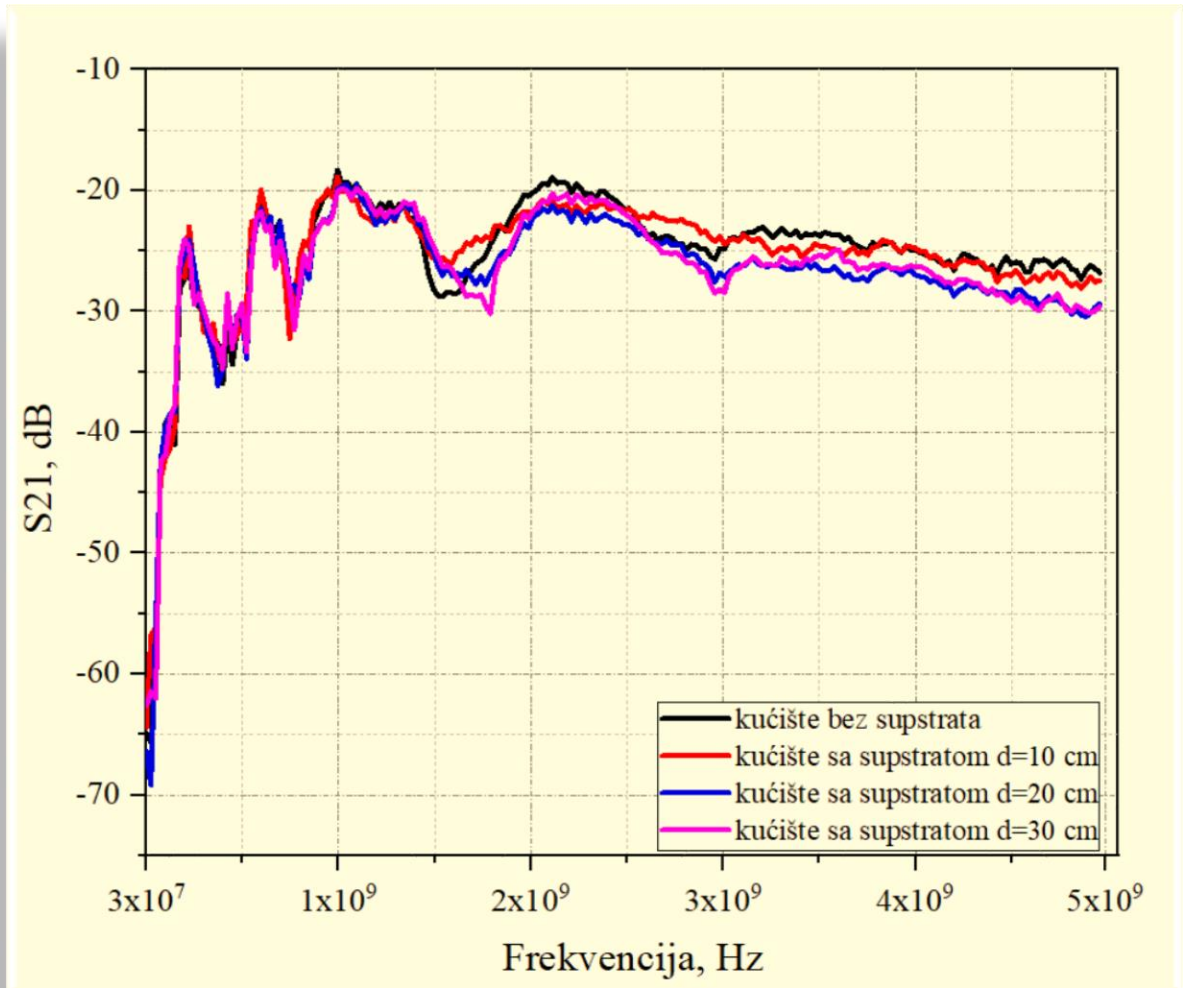
Rezultati istraživanja apsorpcijskog svojstva različitih biljnih kultura (slama soje, slama pšenice, djetelina) dobiveni su mjerenjem gubitaka energije. Podatci dobiveni mjerenjem obrađeni su na način da su stavljeni u odnos gubici uzrokovani istom kulturom različitih debljina, nakon čega je uslijedila usporedba triju različitih debljina uzorka s različitim biomaterijalom. Također su mjereni gubici uzrokovani različitim doziranjem vlage te je provedena usporedba gubitaka uzrokovanih različitim biomaterijalom pri istoj količini vlage. U nastavku su prezentirani rezultati sistematizirani u te četiri cjeline.

### **5.1 Gubici uzrokovani istom kulturom različite debljine**

#### **5.1.1. Soja**

Na grafu koji prikazuje apsorpciju elektromagnetskog zračenja ovisno o debljini biomaterijala soje (Slika 5.1.), vidljivo je kako nema značajnijih promjena u intervalu od 300 kHz do 1.52 GHz, dok na višim frekvencijama dolazi do zamjetnog gubitka. Točnije, na frekvenciji od 1.82 GHz, gubitak za debljinu od 30 cm iznosi -30.20 dB, što je ujedno i najveći postignuti gubitak u slučaju soje. Za debljinu biomaterijala od 20 cm gubitak iznosi -26.87 dB, a za debljinu 10 cm gotovo da nema promjene s obzirom na referentnu krivulju (krivulja praznog kućišta). Na frekvenciji 1.55 GHz referentna krivulja pokazuje da mjerna konstrukcija uzrokuje više gubitaka nego konstrukcija s umetnutim biomaterijalom, a taj gubitak iznosi -28.69 dB. Za istu frekvenciju vrijednosti gubitka za debljinu od 20 cm iznosi -26.25 dB, a za debljinu 10 cm i 30 cm vrijednost ne pada niže od -25.39 dB.

Na frekvenciji 2 GHz najveća apsorpcija vidljiva je za debljinu 20 cm, -23.09 dB, nakon čega slijedi -22.28 dB za debljinu od 30 cm, a najveća vrijednost na ovoj frekvenciji iznosi -21.73 dB za debljinu od 10 cm.



**Slika 5.1.** Gubici u odnosu na debljinu materijala slame soje od 300 kHz do 5 GHz

Na frekvencijama od 2.50 GHz do 3.19 GHz bilježi se porast gubitaka pogotovo za debljinu 30 cm. Za spomenuti interval najviše gubitaka može se primijetiti na frekvenciji 3.03 GHz gdje S21 za debljinu 30 cm pada na -28.47 dB, za debljinu od 20 cm na -27.15 dB, a za 10 cm -24.46 dB. Posljednja vrijednost ujedno odgovara vrijednosti referentne krivulje.

Najveći pomak s obzirom na referentnu vrijednost (-26.52 dB) može se očitati na frekvenciji 4.85 GHz gdje je gubitak za 30 cm jednak onom od 20 cm i iznosi -29.99 dB, dok je za 10 cm -27.88 dB.

### 5.1.2. Pšenica

Graf na slici 5.2. predstavlja ponašanje elektromagnetskih valova s obzirom na uzorak biomaterijala pšenice različitih debljina. U intervalu od 300 kHz do 1.35 GHz nema promjena u odnosu na referentnu vrijednost. Najveća apsorpcija zabilježena je u intervalu od 1.35 GHz do 2 GHz, a najveća apsorpcija s obzirom na referentnu vrijednost događa se na intervalima od 1.69 GHz do 1.89 GHz, 3.3 GHz do 3.5 GHz te na višim frekvencijama, odnosno od 4.5 GHz do 5 GHz. Najveća apsorpcija događa se pri debljini biomaterijala od 20 cm i 30 cm.

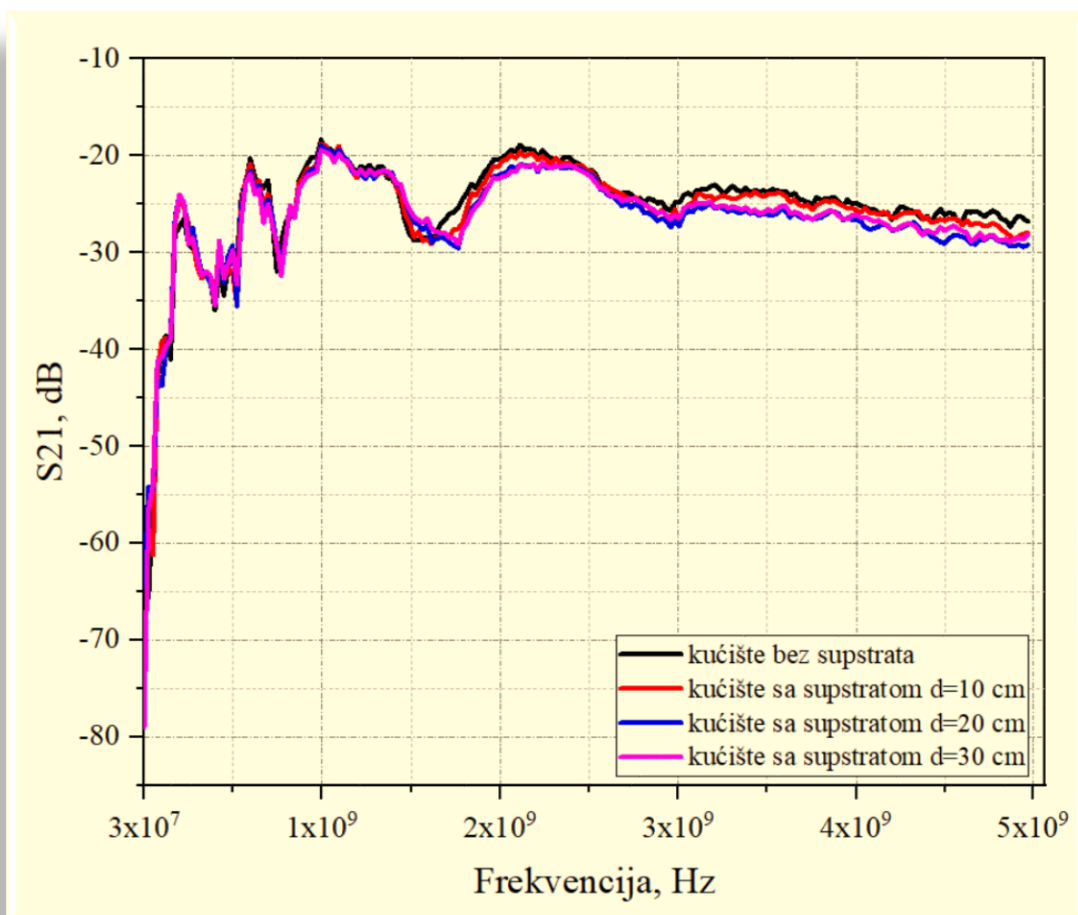
Gubitak od -29.52dB najveći je gubitak u slučaju pšenice, a ostvaren je na frekvenciji 1.79 GHz za debljinu od 20 cm. Na istoj frekvenciji dobivena je vrijednost -29.13 dB za debljinu od 30 cm te -27.59 dB za debljinu od 10 cm.

Gubitak pri frekvenciji 2 GHz za debljinu 10 cm, 20 cm i 30 cm redom iznosi -21.17 dB, -22.18 dB i -22.27 dB, gdje referentna vrijednost iznosi -19.40 dB. Apsorpcija vidljiva pri 2.14 GHz, gdje je referentna vrijednost -18.91 dB, za 10 cm materijala je -19.66 dB, a za 20 cm i 30 cm je jednaka i iznosi -20.92 dB.

Na frekvenciji 3.01 GHz, S21 doseže najveće gubitke za debljinu 10 cm to je -25.55 dB, za 20 cm -26.79 dB, te za 30 cm je -26.13 dB. S obzirom na referentnu vrijednost, značajnije odstupanje vidljivije je pri 3.56 GHz gdje je referentna vrijednost -23.45 dB. Za debljinu 30 cm vrijednost izražena u decibelima je -25.77 , za 20 cm to je -26.17 dB te -23.97 dB za 10 cm.

Na najvišoj mjerenoj frekvenciji, u intervalu od 4.5 GHz do 5 GHz, najviše gubitaka se postiže pri korištenju biomaterijala debljine 20 cm, za 2.90 dB više apsorbirane energije u odnosu na gubitak uzrokovan praznim kućištem.





*Slika 5.2. Gubici u odnosu na debljinu biomaterijala slame pšenice od 300 kHz do 5 GHz*

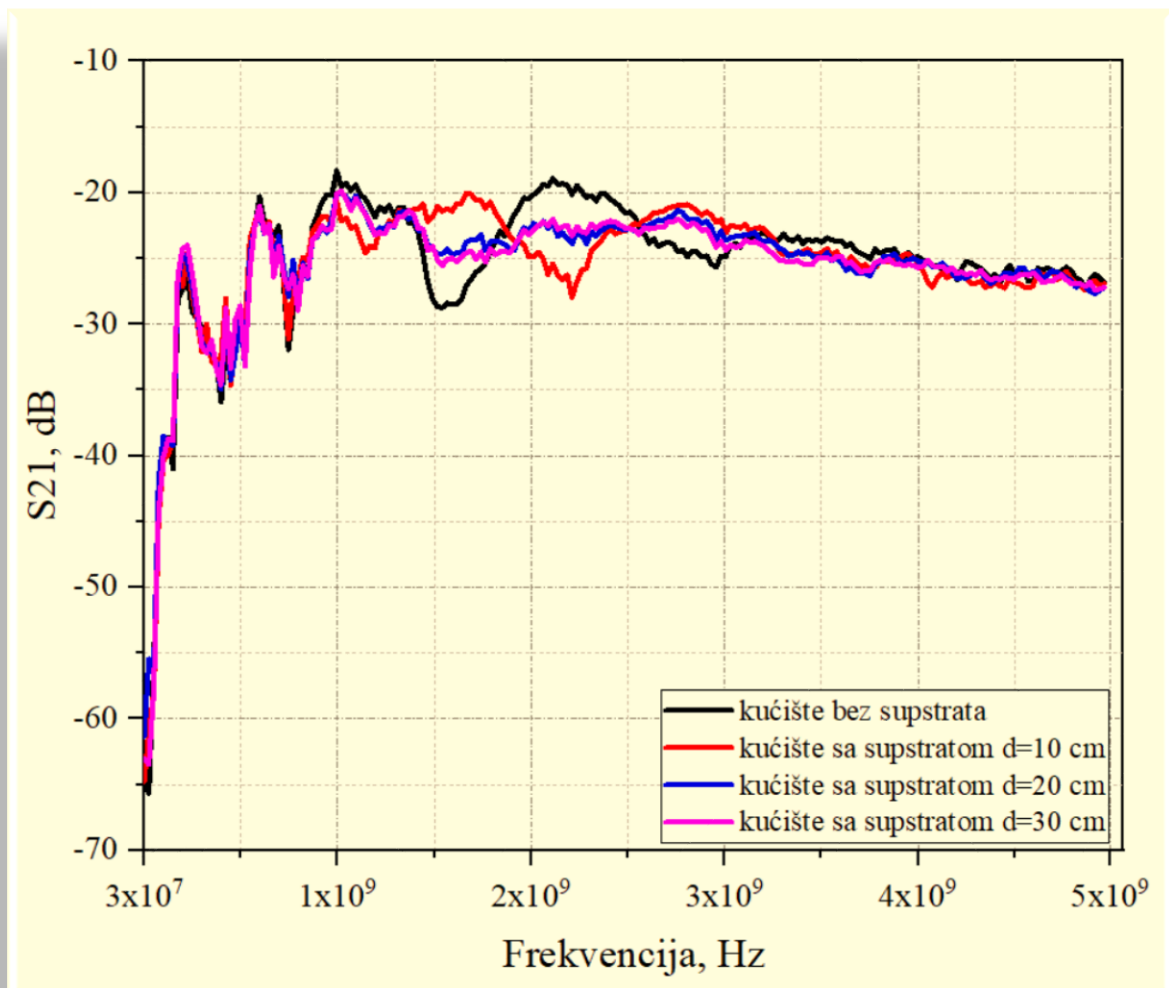
### 5.1.3. Djetelina

Rezultati dobiveni korištenjem kulture djeteline (Slika 5.3) najviše odstupaju od očekivanja, budući da se na određenim frekvencijama postiže bolja apsorpcija bez dodavanja biomaterijala. Radi se o frekvenciji u intervalu od 1.40 GHz do 1.84 GHz, pri čemu referentna vrijednost iznosi -28.40 dB, a vrijednosti gubitka počevši od biomaterijala s najmanjim volumenom je redom -21.21 dB, -24.30 dB, -25.09 dB).

Slična je pojava zamjetna i u intervalu frekvencije od 2.59 GHz do 3.29 GHz, pri kojoj je izmjerena referentna vrijednost od -25.67 dB, a gubici primjenom biomaterijala iznose za 10cm debljine -

22.27 dB, 20 cm debljine -23.57 dB i 30 cm debljine -24.15 dB. Takva se pojava može objasniti mogućom pogreškom pri mjerenju, ali izglednija je spoznaja da djetelina kao biomaterijal na spomenutim frekvencijama djeluje povoljno na elektromagnetske valove, odnosno ne suzbija.

Na nižim frekvencijama (od 300 kHz do 0.89 GHz), krivulje izmjerenih vrijednosti gubitaka preklapaju se s referentnom krivuljom, nakon čega slijedi promjena koja pokazuje kako biomaterijal najmanjeg volumena uzrokuje najveće gubitke. To je posebno izraženo na frekvenciji 1.17 GHz, gdje debljina biomaterijala od 30 cm uzrokuje jednak gubitak kao i materijal debljine 20 cm te iznosi -21.65 dB, a najmanji volumen kulture pokazuje gubitak od -24.62 dB, dok referentna vrijednost iznosi -20.47 dB.



Slika 5.3. Gubici u odnosu na debljinu materijala djeteline od 300kHz do 5GHz

Dio crvene krivulje koji predstavlja najveće gubitke u sustavu prilikom korištenja djeteline nalazi se na 2.24 GHz, a iznosi -27.969 dB. Na istoj frekvenciji plava krivulja ima vrijednost -23.88 dB, ljubičasta -23.30 dB, a referentna krivulja, koja je označena crnom bojom, ima vrijednost -20.142 dB. Na 3.16 GHz najbolje svojstvo gubitaka u odnosu na referentnu vrijednost izraženo je kod debljine biomaterijala od 30 cm i zadržava ga do frekvencije 3.53 GHz. Pri frekvenciji od 3.38 GHz poprima vrijednost -25.21 dB za razliku od preostalih dviju debljina istih gubitaka -24.74 dB te crne krivulje na -23.67 dB.

Pri višim frekvencijama, od 4.03 GHz do 4.78 GHz, biomaterijal debljine 10 cm pokazuje najbolje gubitke u odnosu na preostale krivulje. Nakon 4.77 GHz dolazi ponovno do neznatnih gubitaka kao i na nižim frekvencijama. Na 4.95 GHz najviše gubitaka pokazuje plava krivulja -27.71 dB (debljina 20 cm), zatim ljubičasta -27.41 dB (debljina 30 cm) te crvena -26.66 dB (debljina 10 cm). Referentna vrijednost na spomenutoj frekvenciji iznosi -26.211 dB.

## **5.2 Usporedba gubitaka uzrokovanih različitim kulturama jednakih debljina**

### **5.2.1. Debljina 10 cm**

U slučaju uspoređivanja izmjerenih gubitaka različitih biomaterijala (slama soje, slama pšenice, djeteline) debljine 10 cm, u intervalu od 300 kHz do 0.89 GHz, kulture ne utječu na smanjenje elektromagnetskih valova (Slika 5.4.).

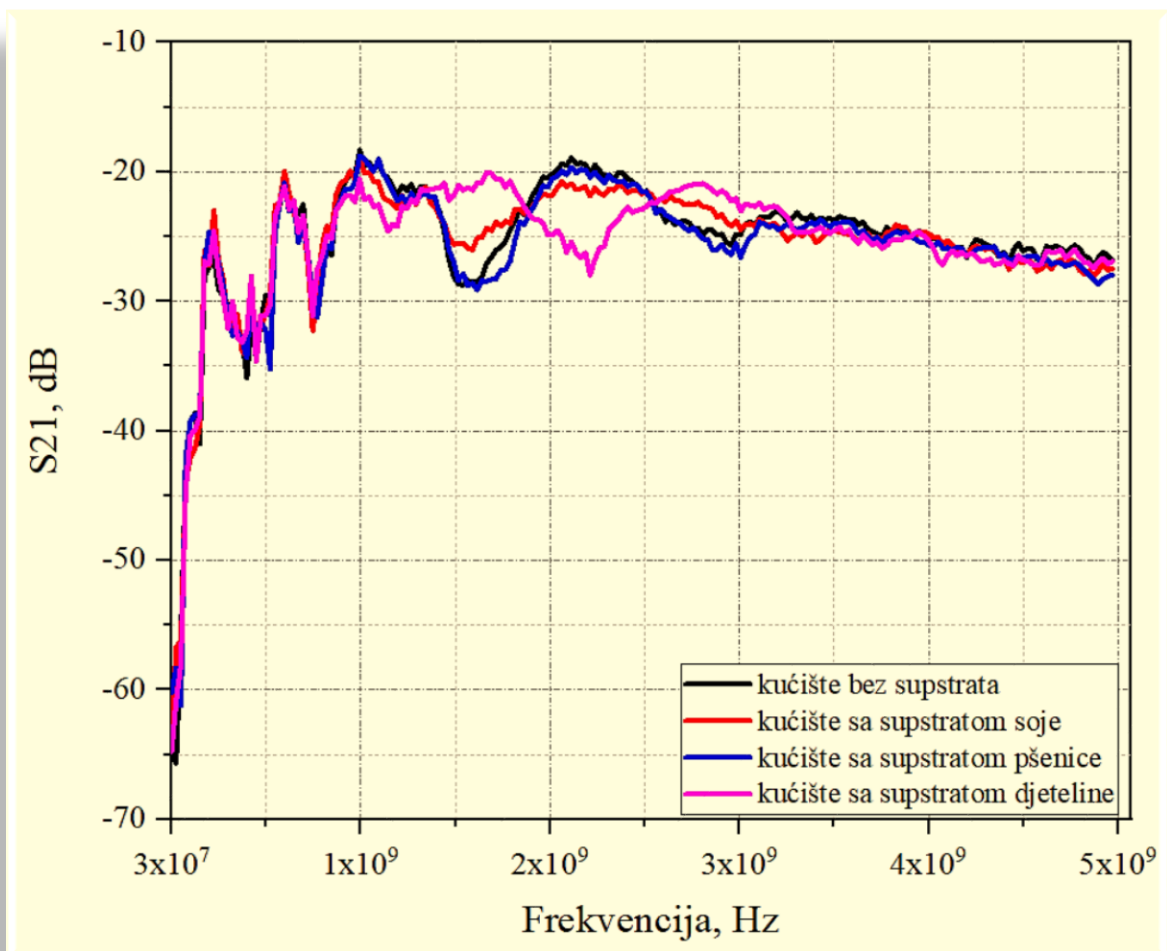
Od 0.89 GHz do 1.35 GHz najveći gubitak uzrokuje uzorak djeteline te soje dok pšenica gotovo ima jednake vrijednosti kao referentna krivulja. U spomenutom intervalu najveći gubitak iznosi -24.62 dB (djetelina), slijede zatim soja s -22.23 dB i pšenica -20.79 dB, a referentna vrijednost je -20.47 dB. U intervalu od 1.35 GHz do 1.91 GHz kultura pšenice uzrokuje gubitke, za razliku od uzorka soje i djeteline čije vrijednosti imaju manje gubitke nego što je uzrokovalo samo kućište.

Od 1.92 GHz do 2.56 GHz najviše apsorpcije dogodilo se korištenjem uzorka djeteline (-27.97 dB), slijede zatim soja (-21.86 dB), pšenice (-20.44 dB) te kućište s 20.14 dB. Pri frekvenciji od

2.57 GHz do 3.1 GHz bolju apsorpciju pokazuje krivulja pšenice dok su djetelina i soja pokazale manje gubitke nego samo kućište.

Nakon 3.1 GHz apsorpcija svih kultura s obzirom na referentnu vrijednost je izrazito mala, te nema značajnog odstupanja od referentne vrijednosti. U intervalu od 3.29 GHz do 3.5 GHz apsorpcija je najbolja kod uzorka soje gdje su pri 3.4 GHz gubici soje, djeteline, pšenice te kućišta redom -25.45 dB, -24.48 dB, -24.14 dB, -23.88 dB.

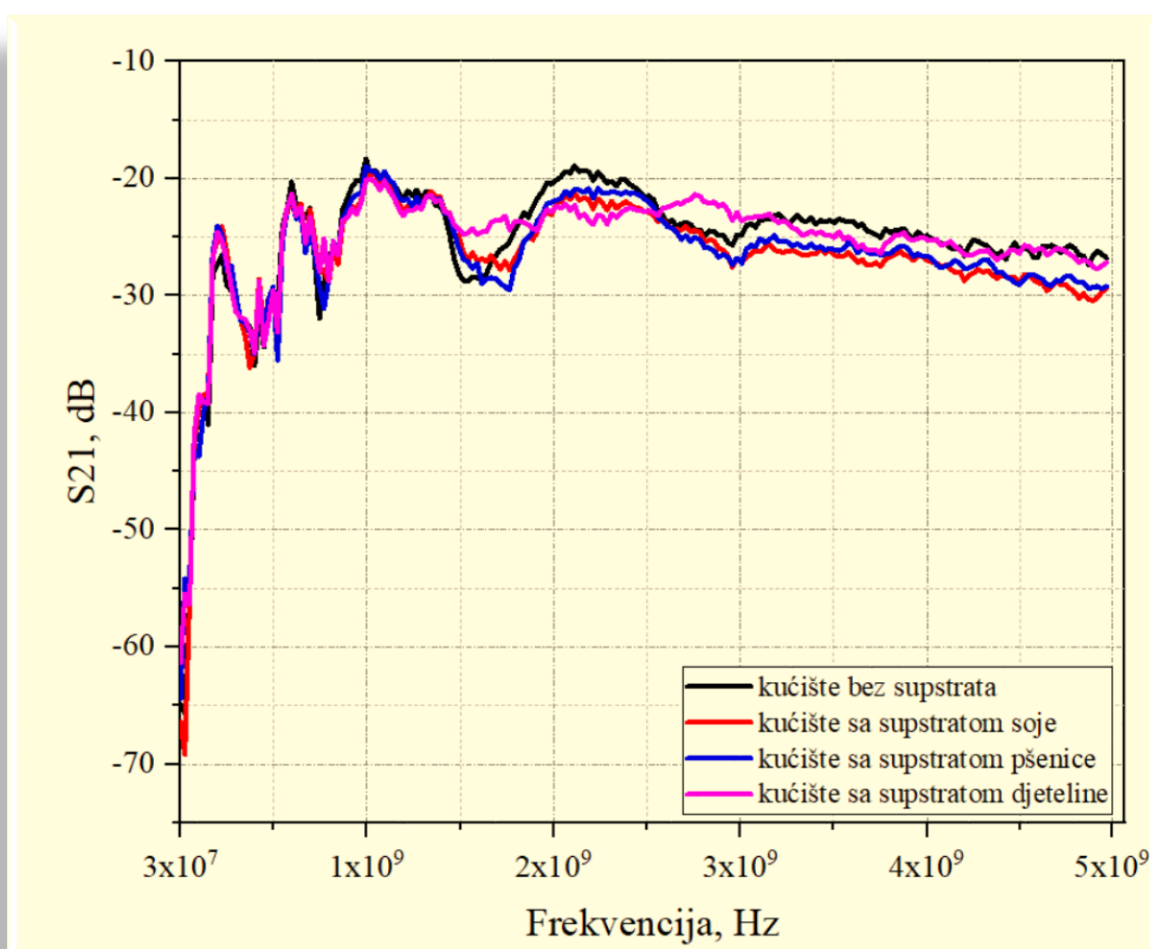
-27.19 dB su gubici uzorka djeteline pri 4.1 GHz, a na istoj frekvenciji kućište stvara gubitke jednake kao i kultura soje te iznosi -25.61 dB. Pri 4.92 GHz najbolje apsorbira pšenica zatim soja te djetelina.



*Slika 5.4. Gubici u odnosu na biomaterijala pri debljini od 10 cm*

## 5.2.2. Debljina 20 cm

Na grafu sa slike 5.5, u frekvencijskom opsegu od 300 kHz do 1.47 GHz, sve se kulture debljine 20 cm ponašaju u skladu s referentnom krivuljom tj. kućištem. U dijelu do 1.94 GHz vidljiva je apsorpcija na frekvenciji 1.79 GHz gdje je najbolji rezultat pokazala pšenica -29.52 dB te soja -27.82 dB, a djetelina je pak lošija -24.37 dB u odnosu na kućište -25.39 dB.



*Slika 5.5. Gubici u odnosu na biomaterijala pri debljini od 20 cm*

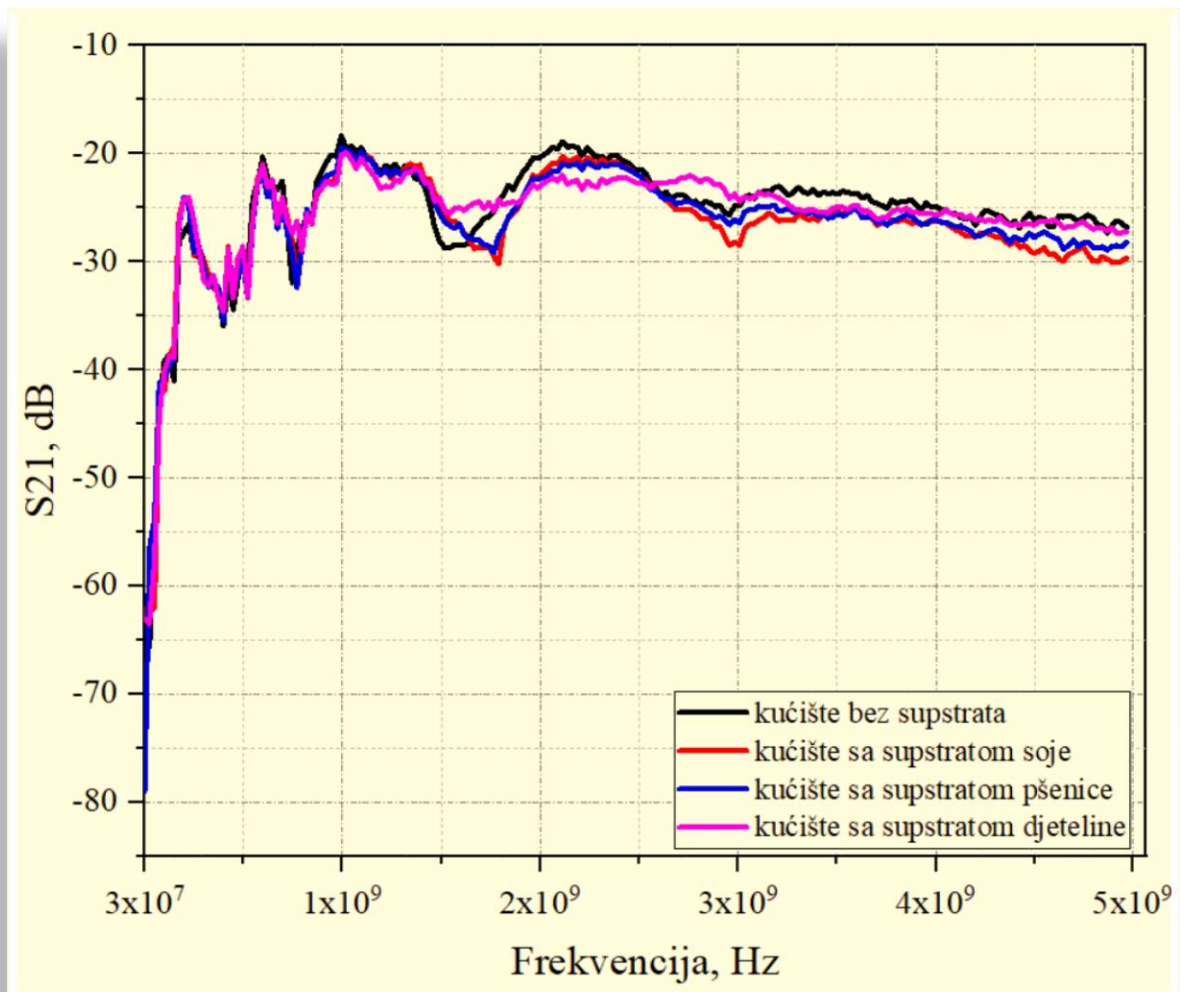
Od 2 GHz do 2.59 GHz najveće gubitke izazvala je biokultura djeteline (-23.23 dB), te redom soje (-22.09 dB), pšenice (-21.25 dB), pri čemu je gubitak kućišta -19.91 dB. Na 3 GHz pšenica i soja pokazuju jednaku vrijednost gubitaka -27.36 dB. S21 kućišta iznosi -25.67 dB, a djetelina daje manji otpor elektromagnetskom zračenju no referenca, i iznosi -23.57 dB.

Od 3 GHz do 3.8 GHz najviše gubitaka stvara soja, zatim pšenica te djetelina. Konkretno, pri frekvenciji 3.68 GHz S21 za soju iznosi -26.92 dB, za pšenicu -25.64 dB te djetelinu -25.64 dB za razliku od referentne krivulje koja ima postiže vrijednost na danoj frekvenciji -23.89 dB. Od 4 GHz pa nadalje djetelina pokazuje vrlo slične rezultate kao i crna krivulja, dok pšenica i soja upijaju nešto bolje elektromagnetsku energiju. Za primjere, možemo uzeti rezultate dobivene na frekvenciji 4.8 GHz, referentna krivulja poprima vrijednost -26.52 dB, a kulture djeteline, pšenice i soje redom iznose -27.185 dB, -28.89 dB te -30.24 dB.

### **5.2.3. Debljina 30 cm**

Na frekvenciji od 0.20 GHz do 0.25 GHz svi biomaterijali imaju manje gubitke no što je to u slučaju referentne krivulje. Od 0.90 GHz do 1.5 GHz na grafu sa slike 5.6 primjećuje se slaba apsorpcija, a na frekvenciji 1.22 GHz pojavljuju se najveći gubici u ovom intervalu pa tako djetelina doseže vrijednost gubitka od -23.23 dB, dok sve ostale kulture zajedno s referentnom vrijednošću iznose -21.91 dB. Od 1.5 GHz do 2 GHz djetelina najlošije prikazuje svojstvo apsorpcije, za razliku od preostalih dviju kultura koje svoj vrhunac dosežu na 1.82 GHz (soja -30.20 dB, pšenica -27.65 dB). U intervalu od 2 GHz do 2.61 GHz krivulje kultura prikazuju dosta dobre rezultate apsorpcije od kojih djetelina nadmašuje pšenicu i soju.

Od zadnje navedene frekvencije do 3.63 GHz neke kulture dosta dobro pridonose gubicima poput soje na frekvenciji 3.03 GHz -28.47 dB te pšenice -26.43 dB gdje referentna vrijednost iznosi -24.83 dB. Kultura djeteline je pak nešto više iznad reference, -24.38dB. U frekvencijskom opsegu od 3.6 GHz do 4.4 GHz krivulje pšenice i soje gotovo se preklapaju sve do 4.4 GHz nakon čega uzorak soje znatno više uzrokuje gubitaka nego preostale kulture s obzirom na referentnu vrijednost. Konkretno, na frekvenciji 4.67 GHz vrijednosti S21 za soju, pšenicu, djetelinu te kućište redom iznosi -29.95 dB, -28.85 dB, -26.85 dB, -25.86 dB.



*Slika 5.6. Gubici u odnosu na biomaterijale pri debljini od 30 cm*

U slučaju mjerenja gubitaka suhих kultura dolazi se do sljedećih konstatacija. Kod uzoraka soje najviše gubitaka uočeno je pri debljini od 20 i 30 cm materijala, te se krivulje koje prikazuju njihove gubitke tijekom cijelog mjernog frekvencijskog opsega (600 kHz do 6 GHz) međusobno isprepliću na način da su vrijednosti parametara S21 vrlo slične, ali zato značajno odudaraju od krivulje koja predstavlja gubitke uzrokovane materijalom debljine 10 centimetara.

Kod kulture pšenice dogodila se ista situacija. Najmanju apsorpciju pokazala je kultura najmanje debljine dok uzorci preostalih dvaju debljina pokazuju slične rezultate, te u ovisnosti o frekvenciji

jedan uzorak uvijek dolazi do izražaja, iako se konstantno međusobno isprepliću i neznatno razlikuju.

Najveće iznenađenje pokazala je kultura djeteline, koja se ne ponaša u skladu s pretpostavkama da deblji uzorak dovodi do veće apsorpcije. U ovom slučaju, promatrajući referentnu krivulju, dobiveni su rezultati koji govore da su veći gubici pri određenim frekvencijama stvoreni samim kućištem nego što su stvoreni dodavanjem materijala te također, da na nekim dijelovima spektra uzorak manje debljine uzrokuje veće gubitke nego deblji materijal.

#### 5.2.4. Analiza rezultata

Kada se paralelno promotre rezultati svih kultura može se primijetiti da su im gubici jednaki gubicima koje postiže prazno kućište na frekvenciji manjoj od 0.6 GHz. Razlog tomu jest taj što antena radi na najmanjoj frekvenciji od 0.6 GHz. U ovisnosti o frekvenciji, različite kulture reagiraju različito, kao što je prikazano tablicom 5.1. Najbolju apsorpciju, gledajući cijeli spektar, pokazao je biomaterijal djeteline, dok je najlošiji rezultat dao uzorak pšenice.

**Tablica 5.1.** Prikaz ponašanja kultura debljine 10 cm u intervalu od 0.6 GHz do 5GHz

Debljina uzorka 10 cm		
Frekvencijski interval (GHz)	Najveća apsorbcija	Najmanja apsorbcija
0.6-1	Djetelina	Pšenica
1-1.5	Djetelina	Pšenica
1.5-2	Pšenica	Djetelina
2-2.5	Djetelina	Pšenica
2.5-3	Pšenica	Djetelina
3-3.5	Soja	Pšenica
3.5-4	Djetelina	Soja
4-4.5	Djetelina	Soja
4.5-5	Soja	Djetelina



Iz tablice 5.2. vidljivo je kako u frekventijskom opsegu od 0.6 GHz do 1.5 GHz kulture djeteline i soje imaju jednake vrijednosti, no gledajući ponašanje kultura kroz cijeli spektar najviše gubitaka uzrokovala je kultura soje, za razliku od djeteline, koja se kod debljine uzorka od 20 cm pokazala kao najlošiji apsorber.

*Tablica 5.2. Prikaz ponašanja kultura debljine 20 cm u intervalu od 0.6 GHz do 5 GHz*

Debljina uzorka 20 cm		
Frekvencijski interval (GHz)	Najveća apsorbcija	Najmanja apsorbcija
<b>0.6-1</b>	Djetelina(Soja)	Pšenica
<b>1-1.5</b>	Djetelina(Soja)	Pšenica
<b>1.5-2</b>	Pšenica	Djetelina
<b>2-2.5</b>	Djetelina	Pšenica
<b>2.5-3</b>	Pšenica	Djetelina
<b>3-3.5</b>	Soja	Djetelina
<b>3.5-4</b>	Soja	Djetelina
<b>4-4.5</b>	Soja	Djetelina
<b>4.5-5</b>	Soja	Djetelina

U slučaju kada se ispituje ponašanje elektromagnetskih valova tijekom prolaska kroz debljinu uzorka od 30 cm, iz tablice 5.3. se primjećuje kako biomaterijal soja apsorbira najviše energije, dok je uzorak djeteline pokazao najlošija svojstva u ulozi apsorbera.

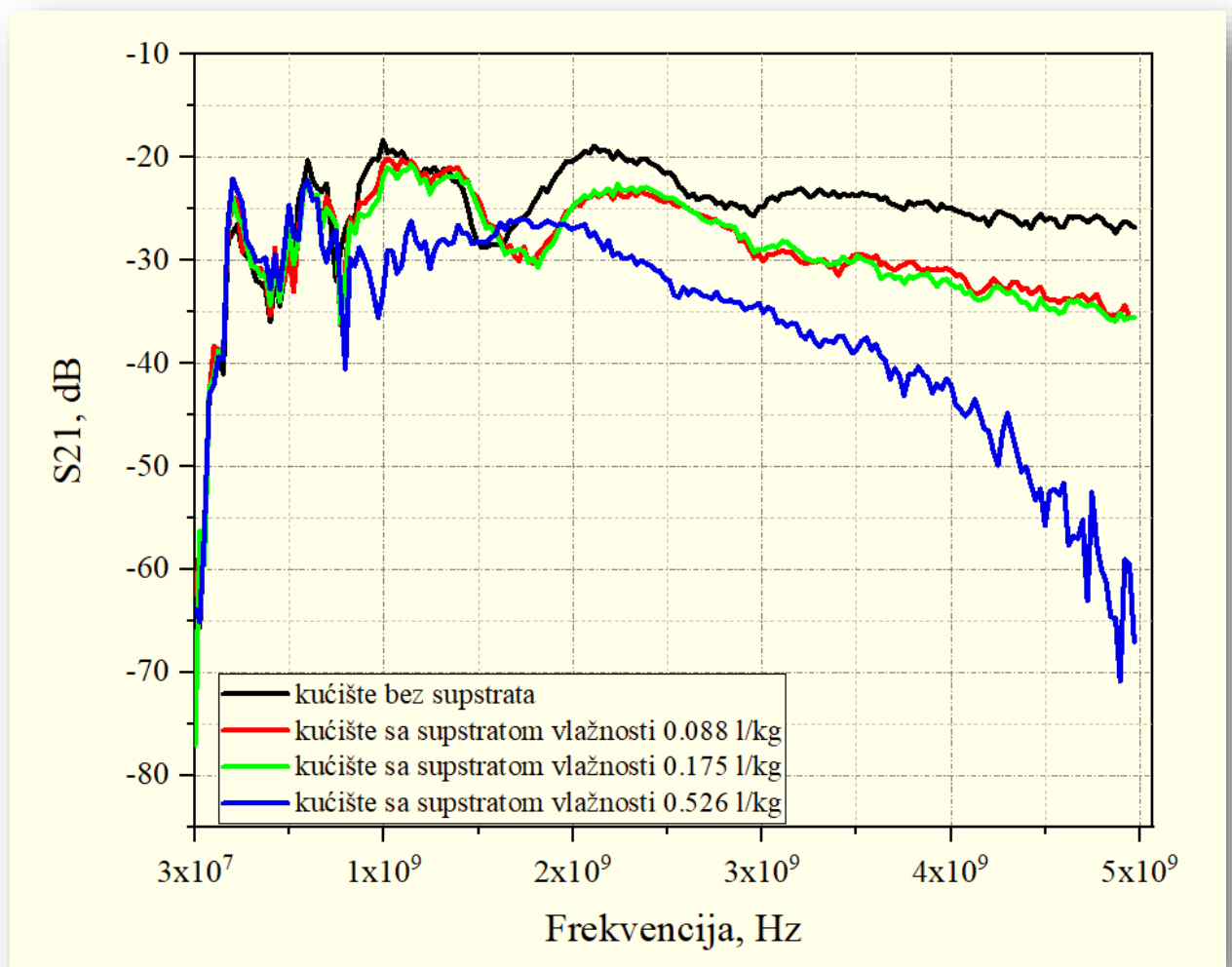
**Tablica 5.3.** Prikaz ponašanja kultura debljine 30 cm u intervalu od 0.6 GHz do 5 GHz

Debljina uzorka 30 cm		
Frekvencijski interval (GHz)	Najveća apsorbcija	Najmanja apsorbcija
<b>0.6-1</b>	Djetelina	Pšenica
<b>1-1.5</b>	Djetelina	Soja
<b>1.5-2</b>	Soja	Djetelina
<b>2-2.5</b>	Djetelina	Soja
<b>2.5-3</b>	Soja	Djetelina
<b>3-3.5</b>	Soja	Djetelina
<b>3.5-4</b>	Soja	Djetelina
<b>4-4.5</b>	Soja	Djetelina
<b>4.5-5</b>	Soja	Djetelina

## 5.3 Gubici uzrokovani istom kulturom različite količine vlažnosti

### 5.3.1. Soja

Iz grafa na slici 5.7. vidljivo je kako s porastom frekvencije rastu i gubici koje najviše stvara biokultura s najvećim količinom vlažnosti. U intervalu od 0.83 GHz do 1.62 GHz, s obzirom na referentnu vrijednost (-20.22 dB), najbolji rezultat uočava se na frekvenciji 0.99 GHz, gdje plava krivulja pokazuje vrijednost -35.56 dB, zelena -24.14 dB, crvena -22.58 dB. Nedosljednost uzorka s vlažnostima 0.088 l/kg i 0.175 l/kg, prisutna je od 1.40 GHz do 1.62 GHz, gdje su gubici manji nego što pokazuje referentna vrijednost, a od 1.62 GHz do 1.77 GHz ista pojava događa se i s uzorkom soje čija je vlažnost 0.526 l/kg. Ono što je još neuobičajeno jest da, od 1.64 GHz do 1.9 GHz, soja s manjom vlažnošću uzrokuju više gubitaka. Konkretno, na frekvenciji 1.84 GHz kultura s dvjema litrama vode stvara gubitke -30.66 dB, kultura s jednom litrom -29.31 GHz te kultura sa šest litara -26.75 dB gdje referentna vrijednost iznosi -24.48 dB. Od 1.97 GHz do 3.63 GHz crvena i zelena krivulja gotovo jednake vrijednosti. Na višim frekvencijama rezultati pokazuju ono što se i očekivalo, odnosno da proporcionalno vlažnošću rastu gubici. Najveća apsorpcija dogodila se na 4.93 GHz. Uzorak soje s najviše vlage ima vrijednosti  $S_{21} = -70.80$  dB, a preostala dva uzorka imaju jednaku vrijednost -35.16 dB, dok je referentna vrijednost -26.62 dB.



*Slika 5.7. Gubici uzrokovani kulturom slame soje različite količine vlažnosti*

Prvi gubici javljaju se na 0.57 GHz. Do spomenute frekvencije nema nikakvog utjecaja kulture na rasprostiranje elektromagnetskih valova, štoviše apsorpcija je manja kad se rabi vlažan biomaterijal. Takva pojava uočava se na frekvenciji 0.23 GHz gdje je referentna krivulja -27.33 dB. Soja s vlažnošću 0.088 l/kg i 0.175 l/kg doseže istu vrijednost -23.94 dB, a u slučaju dodavanja 6 l vode (vlažnost 0.526 l/kg) očitava se gubitak od -22.07 dB. Na 0.83 GHz plava krivulja pokazuje -40.52 dB, nakon čega slijedi soja s 2 l vode (-31.78 dB), pa onda soja s 1 l vode (-30.49 dB) te referentna vrijednost -(26.94 dB).

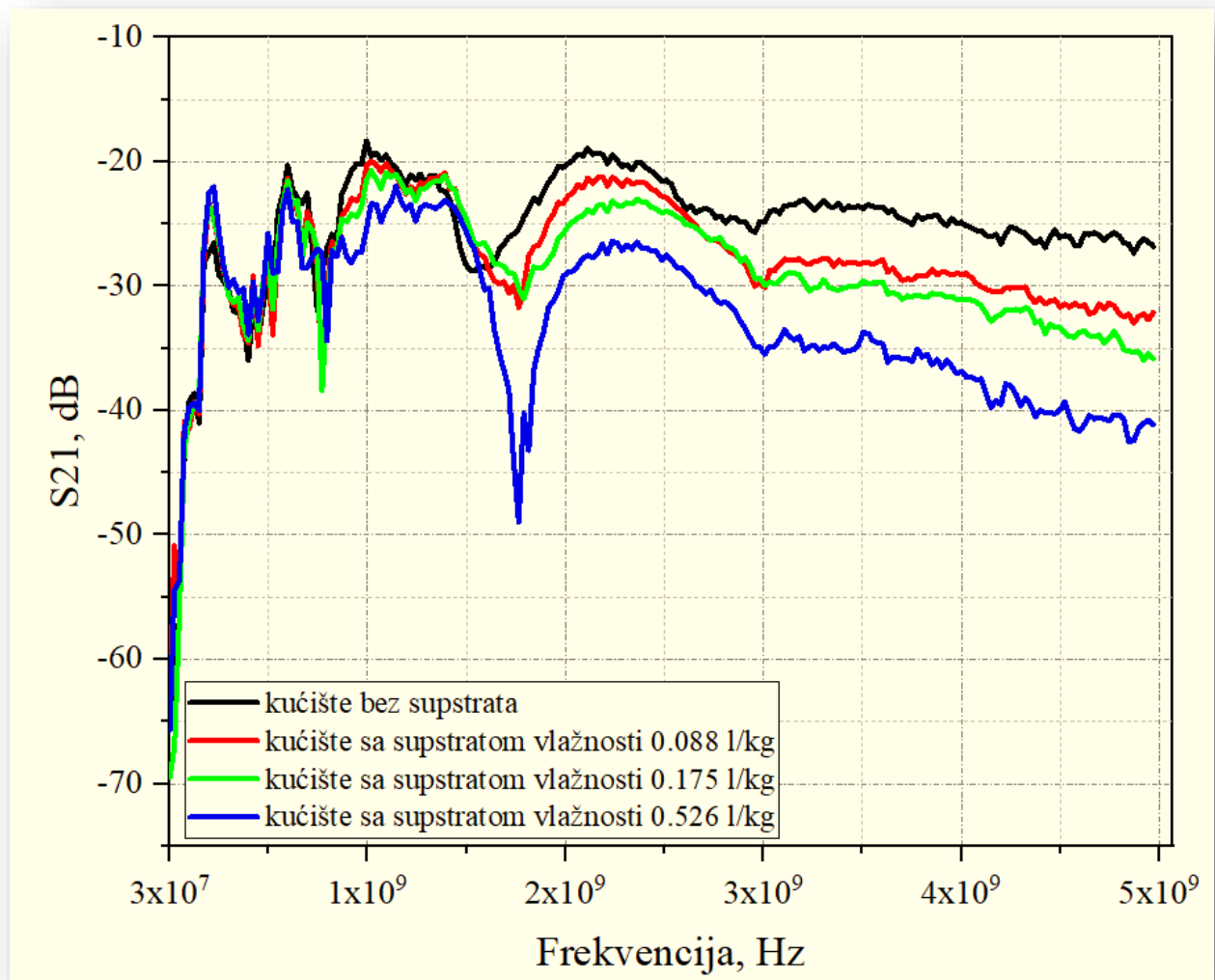
### 5.3.2. Pšenica

Odstupanje od referentne vrijednosti -27.38 dB, moguće je zamijetiti na 0.63 GHz, a na frekvenciji 0.80 GHz pšenica tretirana s jednom i dvjema litrama vode pokazuje najviše gubitaka, čak -38.42 dB u odnosu na referentnu vrijednost (Slika 5.8). Na istoj frekvenciji uzorak pšenice s najviše vlage stvara manje gubitke nego što uzrokuje kućište (-28.94 dB), čak -27.38 dB, ali zato na 0.82 GHz pokazuje najviše gubitaka u usporedbi s preostalim trima krivuljama. U intervalu od 0.87 GHz do 1.60 GHz, najbolju apsorpciju pokazuje plava krivulja vrijednosti -28.11 dB na 0.95 GHz. Na istoj frekvenciji zelena, crvena te crna krivulja dosežu redom sljedeće vrijednosti: -24.19 dB, -22.97 dB, -20.72 dB. Takve vrijednosti prate pretpostavku da će uzorak s više vlage uzrokovati veće gubitke.

Od posljednje spomenute frekvencije do 2 GHz najbolje rezultate apsorpcije pokazuje biomaterijal s najvećim udjelom vlage. Na frekvenciji 1.79 GHz doseže vrijednost -48.95 dB, što predstavlja ujedno i najveći gubitak u cijelom sustavu, s obzirom na referentnu vrijednost od -25.39 dB. Na istoj frekvenciji dolazi do najvećeg odmaka od referentne vrijednosti jer uzorak s najvećom vlažnošću 0.526 l/kg uzrokuje više gubitaka (-31.71 dB) nego uzorak s vlažnosti od 0.175 l/kg (-30.21 dB). Nakon 2 GHz ponašanje krivulja proporcionalno je postotku vlažnosti, odnosno kod veće vlažnosti prisutniji su veći gubici, koji porastom frekvencije također rastu. Na dijelu od 2.69 GHz do 3.04 GHz, crvena i zelena krivulja gotovo se preklapaju. Na 5 GHz iznos referentne vrijednosti je -27.35 dB od čega odstupaju vrijednosti uzoraka s 0.088 l/kg (-32.96 dB), 0.175 l/kg (-35.31 dB) te 0.526 l/kg (-42.43 dB).

Na nižim frekvencijama vlaga nema nikakvog utjecaja na smanjenje prodora elektromagnetskih valova. Na frekvenciji 0.15 GHz dolazi do neznatne apsorpcije svih triju promatranih uzoraka, te neovisno u udjelu vlage, svi uzorci imaju jednake vrijednosti. Prema grafu za frekvencije od 0.18 GHz do 0.57 GHz sve tri promatrane krivulje nalaze se blago iznad referentne krivulje, što govori kako se u tom frekvencijskom opsegu događa manje apsorpcije kod uzoraka tretiranih određenom količinom vode nego što je to slučaj kod praznog kućišta. Na 0.25 GHz referentna vrijednost iznosi -26.51 dB, uzorak tretiran s jednom i dvije litre stvara gubitke -24.45 dB. Plava krivulja pokazuje najmanje gubitaka tj. -22.03 dB. Izraženije gubitke s obzirom na referentnu krivulju pokazuje

uzorak na 0.73 GHz s -28.52 dB, uzorak vlažnosti 0.175 l/kg doseže -24.91 dB, uzorak s najmanje vlage -24.04 dB te kućište na -22.56 dB.

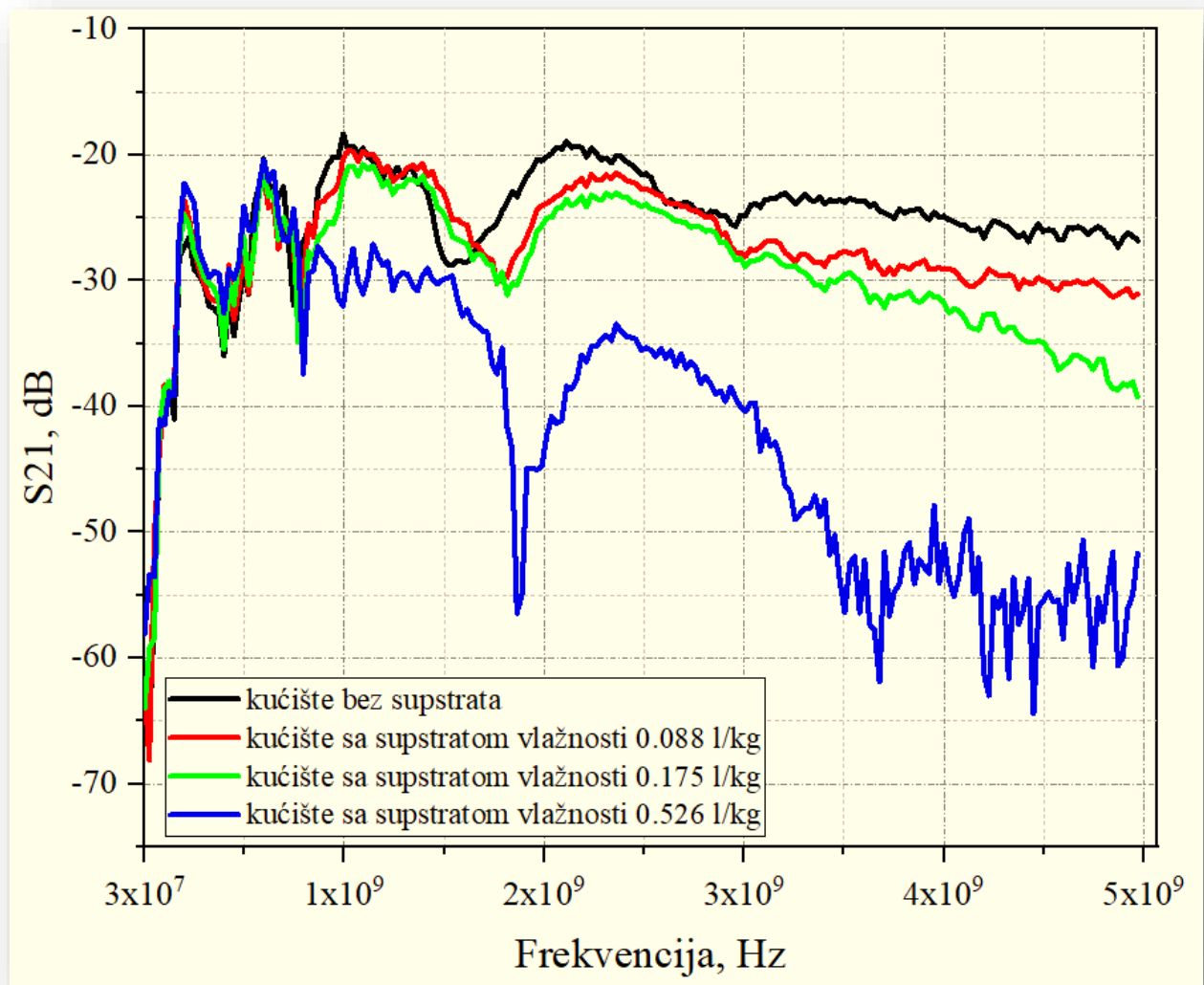


*Slika 5.8. Gubici uzrokovani kulturom slame pšenice različite količine vlažnosti*

### 5.3.3. Djetelina

Mjerenje apsorpcije vlažnog biomaterijala djeteline pokazuje razlike u odnosu na referentnu krivulju. Najviše gubitaka uzrokuje uzorak vlažnosti 0.526 l/kg, zatim slijedi uzorak s 0.175 l/kg te na kraju uzorak s vlažnošću 0.088 l/kg bez obzira na frekvencijski raspon. Krivulje na grafu sa

slike 5.9. potvrđuju da voda može značajno smanjiti prodor elektromagnetskih valova jer ima izraženija svojstva apsorbera u usporedbi sa suhim biomaterijalom. Primjećuju se gubici na frekvenciji od 0.85 GHz. Od spomenute frekvencije do 1.57 GHz najveća apsorpcija, s obzirom na vrijednost kućišta (-18.34 dB), dogodila se na frekvenciji 1.024 GHz kada je gubitak iznosio 31.97 dB, koji je uočen kod uzorka s najvećom vlažnosti, -22.13 dB za uzorak sa srednjom važnosti, te -20.28 dB za uzorak s najmanjom vlažnosti.



*Slika 5.9. Gubici uzrokovani kulturom djeteline različite količine vlažnosti*

U frekvencijskom intervalu od 1.57 GHz do 2.39 GHz, najveća vrijednost S21 nalazi se na frekvenciji 1.89 GHz, na kojoj djetelina s 1 l vode pokazuje vrijednost -27.80 dB, djetelina s 2 l - 30.36 dB, a djetelina s 6 l pak , -56.45 dB, što je veće od vrijednosti kućišta -23.32 dB.

Od 2.42 GHz do 3.06 GHz na grafu je vidljiv konstantan porast gubitaka u odnosu na referentnu krivulju, odnosno nema izraženih, iznenadnih gubitaka. I na ovom dijelu grafa gubici rastu proporcionalno s količinom vode u uzorku. U preostalom dijelu grafa, s obzirom na vrijednosti kućišta, sve tri karakteristike uzrokuju značajne gubitke, također proporcionalno količini vode u uzorku. Kako se frekvencija povećava, uzorci djeteline s 0.088 l/kg i 0.175 l/kg uzrokuju više gubitaka.

Na 5 GHz vrijednost S21 za zelenu krivulju je -39.23 dB, za crvenu -31.04 dB, što u ovom intervalu predstavlja ujedno i najveću apsorpciju za spomenute uzorke. Uzorak s 0.526 litara vode po kilogramu, najviše gubitaka uzrokuje pri frekvenciji 4.48 GHz, gdje gubici dosežu vrijednost - 64.48 dB. Na istoj frekvenciji referentna vrijednost iznosi -26.02 dB.

Na nižim frekvencijama vlaga nema nikakvog utjecaja na smanjenje prodora elektromagnetskih valova. Prema grafu (Slika 5.9.), sve tri promatrane krivulje nalaze se blago iznad referentne krivulje, iz čega je vidljivo kako se u tom frekvencijskom opsegu događa manje apsorpcije kod uzoraka tretiranih određenom količinom vode nego što je to u slučaju samog kućište. Na 0.25 GHz referentna vrijednost iznosi -26.51 dB, a uzorak vlažnosti 0.175 l/kg stvara gubitke -25.57 dB. Crvena krivulja na danoj frekvenciji pokazuje -25.11 dB, dok plava krivulja pokazuje najmanje gubitaka tj. -23.02 dB.

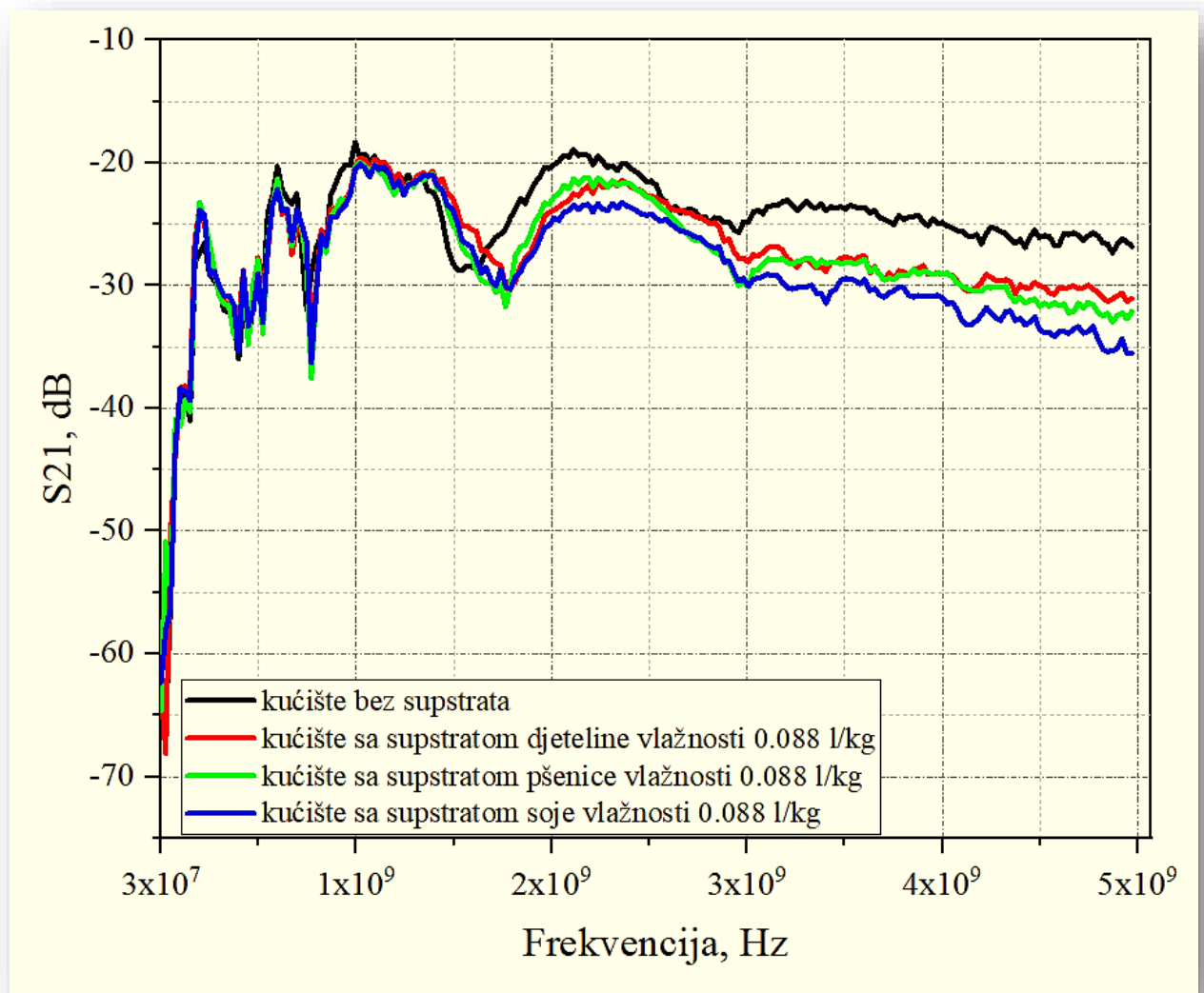


## **5.4 Usporedba gubitaka uzrokovanih različitim kulturama jednake vlažnosti**

### **5.4.1. Vlažnost 0.088 l/kg**

Kako je vidljivo na slici 5.10., u frekvencijskom okviru od 1.84 GHz do 2.47 GHz najbolju apsorpciju pokazao je uzorak soje, nakon čega slijedi uzorak djeteline te, kao najlošija kultura za suzbijanje elektromagnetske energije, pšenica. Međutim nakon spomenute frekvencije pa sve do 3 GHz, najlošije rezultate dala je crvena krivulja, dok zelena i plava krivulja daju približno jednake vrijednosti.

Nakon 3 GHz pa sve do 4.2 GHz, krivulja koja predstavlja uzorak djeteline i pšenice imaju približno jednake vrijednosti, dok najviše gubitaka uzrokuje kultura soje. U intervalu od 4.2 GHz do 5 GHz, krivulja koja predstavlja kulturu djeteline stvara najmanje gubitaka (-31.30 dB), a najviše gubitaka zabilježeno je kod uzorka soje. Ujedno je to i najveći gubitak u cijelom sustavu (-35.51 dB), s obzirom na referentnu vrijednost (-26.43 dB) pri frekvenciji 4.98 GHz.



*Slika 5.10. Gubici u odnosu na različiti biomaterijal pri vlažnosti 0.088 l/kg*

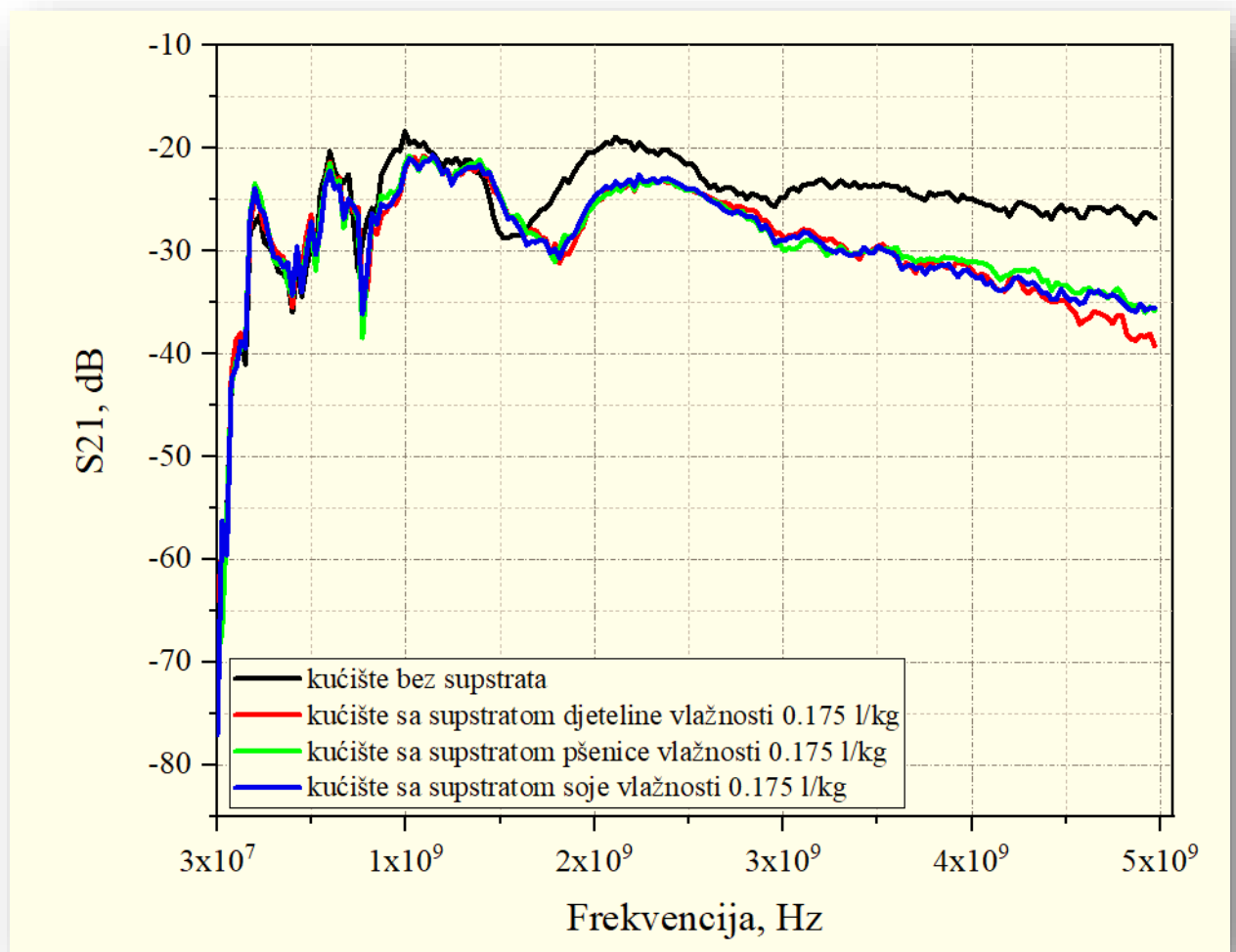
Na grafu (Slika 5.10.) se može uočiti kako se sve tri vrste biomaterijala ponašaju gotovo identično sve do 1.40 GHz. Na frekvencijama 0.15 GHz, 0.48 GHz, 0.55 GHz, 0.80 GHz pšenica uzrokuje neznatno više gubitaka nego ostale kulture. Od 1.40 GHz do 1.69 GHz uzorci djeteline, pšenice te soje pokazuju manje svojstvo apsorpcije elektromagnetskih valova nego što je uzrokovalo samo kućište bez biokultura. Uzorak djeteline uzrokuje najmanje gubitaka, a uzorak pšenice najviše. U frekvenzijskom opsegu od 1.69 GHz do 1.84 GHz, uzorak pšenice pokazao se kao najbolji apsorber, dok je djetelina najlošiji.

### 5.4.2. Vlažnost 0.175 l/kg

Promatrajući graf sa slike 5.11., može se zaključiti na prvi pogled da krivulje poprimaju vrlo slične vrijednosti, a do veće razlike dolazi tek pri višim frekvencijama.

Na frekvenciji od 1.89 GHz veće gubitke pokazuje kultura djeteline. Od 2.66 GHz do 3.36 GHz najlošije svojstvo pokazuje djetelina dok preostale dvije kulture imaju jednake vrijednosti, a od 3 GHz do 3.26 GHz najviše gubitaka uzrokuje kultura pšenice. U intervalu od 3.53 GHz do 5 GHz zelena krivulja, koja predstavlja slamu pšenicu, pokazuje najlošije rezultate u usporedbi s preostalim dvjema kulturama. Najviše je gubitaka ostvareno kulturom djeteline na 4.5 GHz do 5 GHz (-39.23 dB), dok je referentna vrijednost iznosila tek -29.81 dB. Ukoliko ove rezultate usporedimo s prethodnim grafom (Slika 5.10.), dolazi se do zaključka kako su veće razlike u ponašanju kultura koje su izložene elektromagnetskom zračenju izražene kod uzoraka vlažnosti 0.088 l/kg.

Na nižim frekvencijama soja i pšenica pokazuju nešto bolje rezultate nego djetelina. To je vidljivo u frekvencijskom opsegu od 0.10 GHz do 0.15 GHz . Nakon toga slijedi interval do 0.55 GHz, u kojem se svi uzorci ponašaju približno jednako. Neznatno više gubitaka prouzročila je kultura soje, dok pšenica i djetelina poprimaju gotovo jednake vrijednosti. To se događa od 0.55 GHz do 0.85 GHz, nakon čega slijedi interval u kojem najviše apsorpcije uzrokuje uzorak djeteline, pa nakon toga uzorak soje, te naposljetku, pšenice.



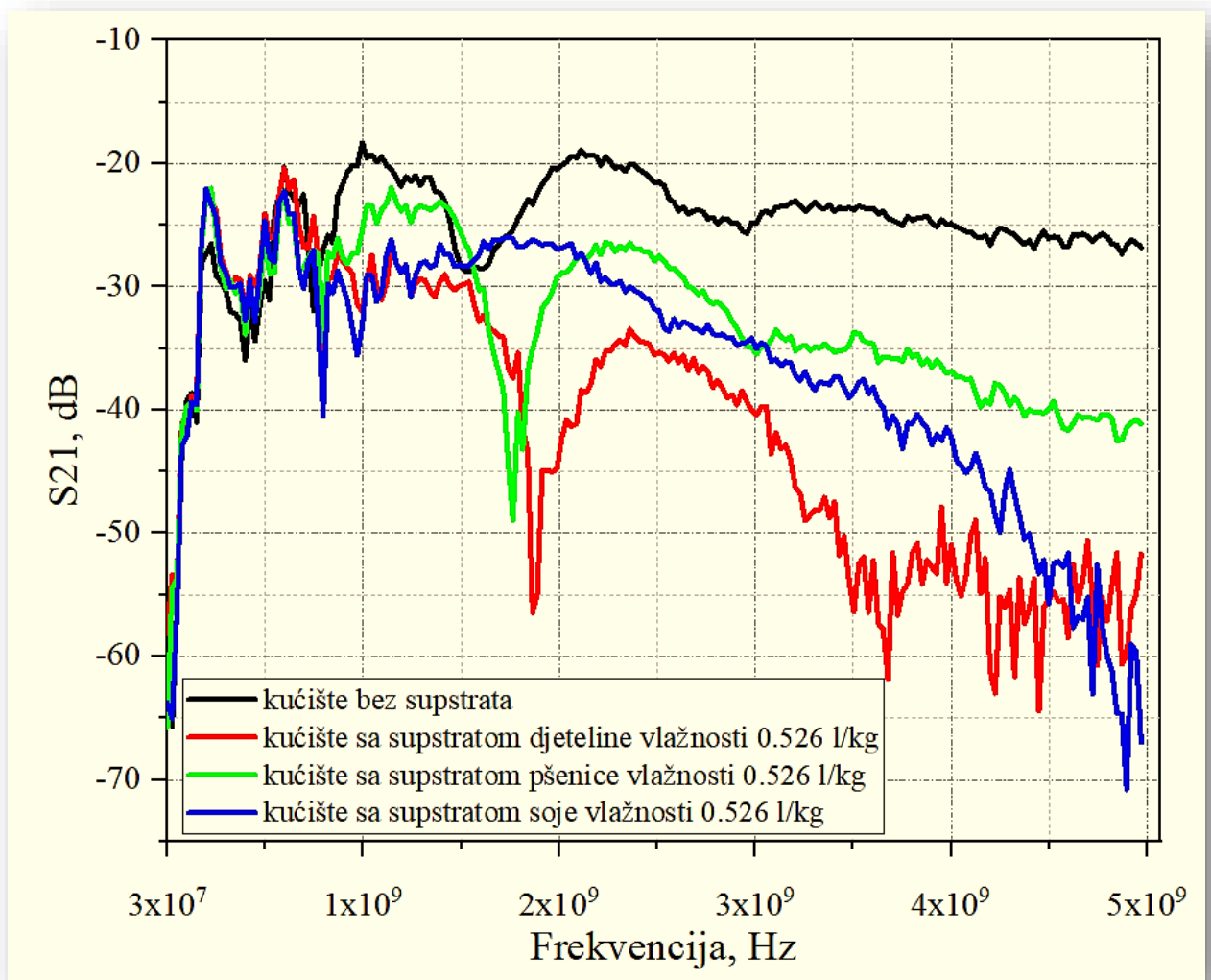
*Slika 5.11. Gubici u odnosu na različiti biomaterijal pri vlažnosti 0.175 l/kg*

### 5.4.3. Vlažnost 0.526 l/kg

Najviše razlike u apsorpciji elektromagnetske energije uzrokovale su kulture kojima je dodano 6 l vode, odnosno čija je vlažnost 0.526 l/kg. Ovisno o frekvenciji, gubici uzrokovani pojedinim kulturama su se povećali, odnosno smanjili (Slika 5.12.). U frekvencijskom opsegu od 1.84 GHz do 2.17 GHz uzorak soje pokazuje najmanju apsorpciju, dok uzorak djeteline pokazuje vrlo velike gubitke -54.9 dB na frekvenciji 1.91 GHz. Na istoj frekvenciji gubici pšenice, soje te kućišta redom iznose -33.78 dB, -26.38 dB, -22.43 dB.

U intervalu od 2.19 GHz do 3.01 GHz najviše vrijednosti S21 zabilježene su kod uzorka djeteline, zatim soje, te se najlošijim apsorberom pokazala pšenica. Na frekvenciji 3.03 GHz pšenica pokazuje neznatno više gubitaka nego soja, nakon čega djetelina (do frekvencije 4.65 GHz), kao najbolji materijal koji je uzrokovao najviše gubitaka. U intervalu od zadnje spomenute frekvencije do 5 GHz, najveću vrijednost S21 pokazuje kultura soje, što je ujedno i najbolja apsorpcija u cijelom sustavu - čak -70.80 Db, dok je referentna vrijednost -26.62 dB.

Ukoliko ovaj graf usporedimo s grafovima na slikama 5.10. i 5.11., zaključuje se kako s količinom vlažnosti, kao i s frekvencijom, rastu i gubici. No, niti jedna kultura ne pokazuje konstantne rezultate su oni različiti za svaku kulturu, ovisno o frekvenciji i svojstvu upijanja vode.



*Slika 5.12. Gubici u odnosu na različiti biomaterijal vlažnosti 0.526 l/kg*

Na frekvencijama nižima od 0.60 GHz ponašanje je triju kultura vrlo slično te se njihove vrijednosti apsorpcije nalaze iznad referentne krivulje pa, prema tome, ne pokazuju nikakav utjecaj na prostiranje elektromagnetske energije do prijemne antene. Od 0.60 GHz do 0.80 GHz soja i pšenica uzrokuju više gubitaka od djeteline. Od 0.83 GHz do 1.44 GHz uzorak pšenice stvara najmanje gubitaka u odnosu na ostale dvije kulture, od kojih soja pokazuje najveću apsorpciju do 1.27 GHz, a od spomenute frekvencije do 1.67 GHz značajnije vrijednosti S21 pokazuje kultura djeteline.

Na frekvenciji 1.60 GHz vidljiva je velika promjena za djetelinu i pšenicu. Naime, do 1.82 GHz najviše gubitaka pokazuje crvena krivulja, nakon čega slijedi zelena, te plava. U ovom intervalu najviše se apsorpcije dogodilo na frekvenciji 1.79 GHz, gdje djetelina poprima vrijednost za parametar S21 -48.95 dB, pšenica -37.38 dB, te soja -26.13 dB, pri čemu je referentna vrijednost kućišta -25.39 dB.

#### **5.4.4. Analiza rezultata**

Osim suhog biomaterijala, mjereni su bili rezultati za uzorke tretirane vodom u tri različita slučaja: uz dodatak jedne litre (vlažnosti 0.088 l/kg), dvije litre (vlažnosti 0.175 l/kg), te šest litara (vlažnosti 0.526 l/kg), dok je obujam biomaterijala bio konstantan (168.75 dm<sup>3</sup>, mase 11.4 kg). Vlažnost značajno utječe na rasprostiranje elektromagnetskih valova. Veći postotak vlage uzrokovat će veću apsorpciju, koja je proporcionalna frekvenciji, što znači da se na većoj frekvenciji uočavaju veći gubici.

Pri usporedbi različitih biomaterijala iste vlažnosti, tablica 5.4. prikazuje kako uzorak soje stvara najviše apsorpcije. Suprotan je slučaj s djetelinom koja se na najvećem broju frekvencija pokazala kao najlošiji apsorber. Kultura pšenice i djeteline se uglavnom od jednog djela grafa na slici 5.10. međusobno se isprepliću, iako malo lošije rezultate daje djetelina.

**Tablica 5.4.** Prikaz ponašanja kultura vlažnosti 0.088 l/kg u intervalu od 0.6 GHz do 5 GHz

Vlažnost 0.088 l/kg		
Frekvencijski interval (GHz)	Najveća apsorpcija	Najmanja apsorpcija
<b>0.6-1</b>	Pšenica	Djetelina
<b>1-1.5</b>	Soja	Djetelina
<b>1.5-2</b>	Pšenica	Djetelina
<b>2-2.5</b>	Soja	Pšenica
<b>2.5-3</b>	Soja	Djetelina
<b>3-3.5</b>	Soja	Djetelina
<b>3.5-4</b>	Soja	Djetelina
<b>4-4.5</b>	Soja	Djetelina
<b>4.5-5</b>	Soja	Djetelina

Promatrajući rezultate koji su dobiveni primjenom 2 l vode (vlažnosti 0.175 l/kg) na odgovarajuće uzorke, uočava se kako se kulture međusobno mnogo ne razlikuju do frekvencije 4.5 GHz, budući da je kroz cijeli spektar vidljiva izrazito mala razlika u količini apsorpcije. Ipak, zbog razlike u nekoliko mdB, najviše gubitaka stvorila je kultura djeteline, a najmanje kultura pšenice, što je naznačeno u tablici 5.5.



**Tablica 5.5.** Prikaz ponašanja kultura vlažnosti 0.175 l/kg u intervalu od 0.6 GHz do 5GHz

Vlažnost 0.175 l/kg		
Frekvencijski interval (GHz)	Najveća apsorbcija	Najmanja apsorbcija
<b>0.6-1</b>	Pšenica	Djetelina
<b>1-1.5</b>	Soja	Pšenica
<b>1.5-2</b>	Djetelina	Soja
<b>2-2.5</b>	Djetelina	Soja
<b>2.5-3</b>	Soja	Djetelina
<b>3-3.5</b>	Pšenica	Djetelina
<b>3.5-4</b>	Soja	Pšenica
<b>4-4.5</b>	Djetelina	Pšenica
<b>4.5-5</b>	Djetelina	Pšenica

Ako se analizira graf sa slike 5.12., čiji su rezultati prikazani u tablici 5.6., postaje očigledno koja kultura najviše apsorbira elektromagnetsko zračenje. Na čitavom spektru izmjerenih rezultata, krivulja djeteline jasno se izdvaja kao ona koja prikazuje najviše gubitaka, odnosno najveću apsorpciju. Suprotno tomu, pšenica se kroz cijeli frekvencijski spektar pokazala kao najmanje učinkovit apsorber.

**Tablica 5.6.** Prikaz ponašanja kultura vlažnosti 0.526 l/kg u intervalu od 0.6 GHz do 5 GHz

Vlažnost 0.526 l/kg		
Frekvencijski interval (GHz)	Najveća apsorbcija	Najmanja apsorbcija
<b>0.6-1</b>	Soja	Pšenica
<b>1-1.5</b>	Djetelina	Pšenica
<b>1.5-2</b>	Djetelina	Soja
<b>2-2.5</b>	Djetelina	Pšenica
<b>2.5-3</b>	Djetelina	Pšenica
<b>3-3.5</b>	Djetelina	Pšenica
<b>3.5-4</b>	Djetelina	Pšenica
<b>4-4.5</b>	Djetelina	Pšenica
<b>4.5-5</b>	Soja	Pšenica

## 6. ZAKLJUČAK

Istraživanju se pristupilo s namjerom mjerenja apsorpcije elektromagnetskog zračenja u biopodlogama. Cilj je rada bio ispitati apsorpcijska svojstva suhog biomaterijala (slame soje, slame pšenice i velike djeteline) različite debljine, kao i vlažnog biomaterijala (slame soje, slame pšenice i velike djeteline) s različitim obujmom vode. Zadatci kojima se dolazi do toga cilja odnosili su se na uspostavu mjernog postava i na mjerenje gubitaka elektromagnetskog zračenja prolaskom kroz biopodloge u kontroliranim laboratorijskim uvjetima kako bi se posredno moglo zaključivati o apsorpciji tih materijala.

U tu je svrhu osmišljen mjerni postav kojega su činile dvije Vivaldi antene, od kojih je jedna bila u svojstvu predajnika, a druga prijemnika elektromagnetskog zračenja. Između njih je bilo postavljeno kućište s biopodlogama koje je, za potrebe ovoga istraživanja, posebno konstruirano na taj način da omogućuje modificiranje debljine materijala i da bude nepropusno za tekućinu. Za ujednačavanje mase biomaterijala korištena je digitalna vaga s ovjesnom. Čitav je postav bio izoliran od okolnih zračenja upotrebom kompozitnog apsorbera visokih frekvencija.

Provedba mjerenja odvijala se na način da je biopodloga izložena elektromagnetskom zračenju iz predajne antene, a na prijemnoj anteni su mjereni gubici koje je pokazala pojedina biopodloga. Mjerenje je provedeno radiofrekvencijskim spektralnim analizatorom tipa N9914A *FieldFox Handheld*, koji ima mogućnosti grafičkog prikaza rezultata. Provedeno je ukupno 19 mjerenja na frekvencijama u rasponu od 300 kHz do 5 GHz, što odgovara radiovalovima na spektru elektromagnetskog zračenja. Od toga je bilo 9 mjerenja sa suhim kulturama (mjerenje 3 različite kulture s tri različite debljine: 10 cm, 20 cm, 30 cm), i 9 mjerenja vlažnih kultura (mjerenje 3 kulture s različitom količinom dodane vode: 1 l, 2 l i 6 l), te jedno mjerenje rezultata koje ostvaruje kućište bez umetnutih biopodloga, a koji su postavljeni kao referentne vrijednosti.

Mjerenje je izvedeno u frekvencijskom opsegu od 300 kHz do 5 GHz, ali samo opseg od 600 MHz do 5 GHz je moguće analizirati budući da dio opsega od 300 kHz do 600 MHz nije pokriven opsegom rada antene. Iz tog se razloga, svi rezultati dobiveni na frekvencijama nižim od 600 MHz nisu smatrani relevantnima za daljnju obradu.

Iz rezultata mjerenja apsorpcije u analiziranim biomaterijalima može se zaključiti slijedeće: apsorpcija EM energije je veća kod debljih materijala. Razlika u apsorpciji jasno je vidljiva između

kulture debljine 10 cm i 20 cm, dok je između 20 cm i 30 cm razlika jedva primjetna. Izuzetak je djetelina koja pokazuje nerealne rezultate (najveća apsorpcija pri 10 cm; manja apsorpcija nego što je samo kućište uzrokovalo).

Nadalje, kod usporedbe gubitaka uzrokovanih različitim kulturama jednakih debljina, rezultati su sljedeći. Najviše gubitaka stvorio je materijal djeteline pri 10 cm, dok je za debljine 20 i 30 cm to bila soja. Nasuprot tomu, pri debljini materijala 10 cm, pšenica je pokazala najmanju apsorpciju, a djetelina pri 20 cm i 30 cm.

Svi su materijali uz dodavanje vode postigli veću apsorpciju, zahvaljujući svojstvu vodljivosti nedestilirane vode. Naime, nepročišćena voda zbog velike količine elektrolita, predstavlja kemijski spoj koji pokazuje dostatnu vrijednost koeficijenta provodnosti  $\kappa$ , da bi ju se svrstalo u vodljivi materijal s gubicima. U takvim materijalima dolazi do gubitka energije što za posljedicu ima smanjenje amplitude, pa samim time i veću apsorpciju. Isto se dogodilo pri našem mjerenju apsorpcije svih kultura kojima je dodana voda. Kultura soje pokazala se najboljim apsorberom pri vlažnosti 0.088 l/kg, za razliku od djeteline koja je u preostala dva slučaja (0.175 l/kg i 0.526 l/kg) uzrokovala najviše gubitaka u materijalu. Nakon nanošenja 1 l vode na kulturu, najmanje je elektromagnetske energije apsorbirala djetelina, dok pri 2 l i 6 l, mjesto najlošijeg apsorbera, zauzela je pšenica.

Apsorpcija EM energije u opsegu od 600 MHz do 5 GHz raste sa porastom frekvencije za sve biopodloge kao i za obje vlažnosti. Nadalje, kod svih kultura zamjetan oblik krivulja S21 je oblik sa periodičkim propadima (povećanje apsorpcije) što sugerira destruktivnu interferenciju za određene valne duljine EM vala. Ipak, za konačni zaključak o tome bilo bi potrebno detaljno analizirati dobijene podatke kao i provesti dodatna mjerenja.

## 7. LITERATURA

- [1] I. Cindrić, Djelovanje elektromagnetskog polja na organizam čovjeka (završni rad). Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, 2015.
- [2] D. Poplašen, V. Brumen, D. Bućan, Djelovanje elektromagnetskog zračenja na ljudski organizam, Sigurnost: časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini, br. 4, sv. 57, 2015, str. 371-374
- [3] I. Trošić, I. Pavičić, I. Bušljeta, M. Mataušić-Pišl, S. Milković-Kraus, Djelovanje radiofrekvencijskog pojasa neionizirajućeg elektromagnetskog zračenja na razini stanice, Arhiv za higijenu rada i toksikologiju, br. 1, sv. 61, 2010, str. 45-51.
- [4] M. Kurepa, J. Purić, Osnovi fizike: elektromagnetizam-optika-fizika atoma-jezgra, IRO „Naučna knjiga“, Beograd, 1987.
- [5] M. Heald, J. Marion, Classical Electromagnetic Radiation, Dover PUblications, Inc., Mineola, 2012.
- [6] B. Popović, Elektromagnetika, Akademska misao, Beograd, 2004.
- [7] P. Kulišić, V. Lopac, Elektromagnetske pojave i struktura tvari, Školska knjiga, Zagreb, 2003.
- [8] C. Calzoni, Non-Seismic Methods on Shallow Water Environments (doktorska disertacija), Politecnico di Torino, Torino, 2008.
- [9] Z. Haznadar, Ž. Štih, Elektromagnetizam 1, Školska knjiga, Zagreb, 1997.
- [10] J. Z. Hasenhörl, R. Bradvica, B. Hrpka, Tehnička kultura 4, Alfa, Zagreb, 2004.
- [11] C. Levis, J. Johnson, F. Teixeira, Radiowave Propagation; Physics and Applications, John Wiley& Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
- [12] C. Haslett, Essentials of Radio Wave Propagation, Ofcom, London, UK, 2007.

- [13] V. Henč-Bartolić, P. Kulišić, Valovi i optika, Zagreb, 2004.
- [14] B. Mušič, A. Žnidaršič, P. Venturini, Electromagnetic absorbing materials, Informacije MIDEM, br. 2, sv. 41, str. 92-96, 2011
- [15] Z. Haznadar, Ž. Štih, Elektromagnetizam 2, Školska knjiga, Zagreb, 1997.
- [16] D. Howard, Electromagnetic Radiation Absorption, Study.com, Alberta, 2018.
- [17] E.F. Knott, Radar Cross Section Measurements, SciTech Publishing Inc., Raleigh, SAD, 2006.
- [18] F. Costa, A. Monorchio, G. Manara, Theory, design and perspectives of electromagnetic wave absorbers, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, br.2, sv. 5, str. 67-74, 2016.
- [19] S. Sharma, A. Kumar, D. Kaur, Cavity perturbation measurement of complex permittivity of dielectric material at microwave frequencies, International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences, br. 1, sv. 4, str. 116-120, 2013.
- [20] B. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [21] N. Hakla, S. Ghosh, K. V. Srivastava, A Broadband Circuit Analog Absorber using Resistively Loaded Square Loops, IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), 2017.
- [22] F. Che Seman, R. Cahill, V.F. Fusco, G. Goussetis, Design of Salisbury screen absorber using frequency selective surfaces to improve bandwidth and angular stability performance, IET Microwaves, Antennas and Propagation, br. 2, sv. 5, str. 149– 156, 2011.
- [23] A. Sudarić, M. Vratarić, Značenje, dostignuća i trendovi u oplemenjivanju soje u Poljoprivrednom institutu Osijek, Sjemenarstvo, br. 3-4, sv. 25, str. 207-216, 2008.
- [24] Fotografija sojine slame, Preuzeto sa <https://www.halooglasi.com/poljoprivreda/seno-slama-detelina/sojina-slama/5425635335023> (12.5.2020).
- [25] A. Kilickan, Pneumatic conveying. characteristics of soya bean, Oxidation Communications, br. 2, sv.41, str. :270-282, 2018.

- [26] S. Košutić, D. Filipović, Z. Gospodarić, S. Husnjak , R. Zimmer, I. Kovačev, Usporedba različitih sustava obrade tla u proizvodnji soje i ozime pšenice u Slavoniji, Agronomski glasnik: glasilo Hrvatskog agronomskog društva, (br.5), (sv. 68), str. 381- 392, 2006.
- [27] M. Čehić i Z. Omerčević, Prirodni materijali za toplinsku izolaciju zidova, 11th International Scientific Conference on Production Engineering DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF PRODUCTION, sv. 11, str.217 -222, Bihać, 2017.
- [28] S. Klarić, S. Džidić, M. Popovac-Roso, Slama – građevinski materijal historije i budućnosti, održive arhitekture i konstruktorskog inženjerstva, 3rd International Scientific Meeting E-GTZ, sv. 3, 217-224, Tuzla, 2016.
- [29] Fotografija slme pšenice. Preuzeto sa <https://pixnio.com/cs/krajiny/trava/psenice-seno-susena-trava-travy-letni> (12.5.2020).
- [30] T. Čupić, M. Tucak; S. Popović, Proučavanje lokalnih populacija lucerne u svrhu stvaranja nove oplemenjivačke germplazme, Poljoprivreda, br. 2, sv. 14, str.46-51, 2008.
- [31] Fotografija lucerne. Preuzeto sa <https://llh.hessen.de/tier/rinder/fuetterung-rinder/kleegras-und-luzerne-als-proteinergaenzung-fuer-milchkuehe/> (12.5.2020.)
- [32] Fotografija Vivaldi antene. Preuzeto sa [http://rfspace.com/RFSPACE/Antennas\\_files/UWB2.pdf](http://rfspace.com/RFSPACE/Antennas_files/UWB2.pdf) (12.5.2020).
- [33] Primjer grafa Vivaldi antene. Preuzeto sa: <https://antennatestlab.com/antenna-examples/example-3-vivaldi-antennas-rfspace> (12.5.2020.)
- [34] Fotofrafija ručne vage. Preuzeto sa <https://www.ebay.com/itm/Handheld-Portable-Digital-Scale-For-Luggage-Grocery-Travel-Flee-Market-etc-/392195852849> (12.5.2020.)
- [35] Fotografija spektralnog analizatora. Preuzeto sa <https://www.keysight.com/de/pdx-x201924-pn-N9914A/fieldfox-handheld-rf-analyzer-65-ghz?cc=DE&lc=ger> (12.5.2020.)

## SAŽETAK

Predmet ovoga rada su apsorberi elektromagnetskog (EM) zračenja zasnovani na biopodlogama. Zadatak je bio utvrditi kako se različiti biomaterijali (soja, pšenica, djetelina) ponašaju u ulozi apsorbera EM zračenja na način da se izravno mjere gubici pri zračenju kroz njih u frekvencijskom opsegu od 300 kHz do 5 GHz, tj. parametra S21. Za tu je svrhu konstruiran mjerni postav koji se sastojao od dvije Vivaldi antene, prilagodljivog kućišta s biomaterijalom, digitalne vage i radiofrekvencijskog mjernog uređaja za analizu spektra, a mjerenja su provedena u laboratoriju za mjerenje jakosti visokofrekvencijskih elektromagnetskih polja. Rezultati su pokazali da debljina biomaterijala proporcionalno utječe na veličinu apsorpcije EM zračenja, pri čemu je djetelina najbolji apsorber kod debljine od 10 cm ( $S_{21} = -27.97$  dB), a kod 20 cm i 30 cm je to soja ( $S_{21} = -30.45$  dB/ $-30.20$  dB). Osim toga, veća vlažnost materijala uzrokuje veću apsorpciju EM zračenja, pri čemu se najboljim apsorberom pokazala soja ( $S_{21} = -35.52$  dB vlažnosti 0.088 l/kg, odnosno djetelina vlažnosti 0.175 l/kg/0.526 l/kg ( $S_{21} = -39.23$  dB/ $-64.43$  dB).

**Ključne riječi:** apsorpcija elektromagnetskog zračenja, bioapsorber, konstrukcija kućišta, parametar S21, radiovalovi.



## ABSTRACT

The study explores bio-materials as the absorbers of electromagnetic (EM) radiation. The aim was to determine how different plants (soybean, wheat, lucerne) behave in the role of RF absorbers by directly measuring radiation losses when exposing them to frequency ranging from 300 kHz to 5 GHz, ie the parameter S21. For that purpose, an experimental setup for laboratory measurements was constructed and it consisted of two Vivaldi antennas, a adaptable enclosed case with biomaterial, a digital scale and an RF spectrum analyser. The measurements were performed in a laboratory designed for measuring the high-frequency electric-field strengths. The results suggest that the thickness of the biomaterial proportionally affects the magnitude of EM radiation absorption, with lucerne being the best absorber at the material thickness of 10 cm (S21= -27.97 dB),. In case of thicker biomaterial (20-30 cm), the soybean is the plant that causes the biggest absorption (S21=-30.45 dB/-30.20 dB). In addition, higher humidity of the material causes higher absorption of EM radiation, with the best absorber being soybean (S21= -35.52 dB), with the addition of 1 l of water), or lucerne (S21=-39.23 dB/-64.43 dB), with the addition of 2 l / 6 l of water)

**Keywords:** absorption of EM radiation, bio-absorber, case construction, parameter S21, radiowaves.

## ŽIVOTOPIS

Maja Varga studentica je Diplomskog sveučilišnog studija Elektrotehnika, smjer Komunikacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Prethodno je na istom fakultetu stekla stupanj sveučilišne prvostupnice inženjerke elektrotehnike (smjer: Komunikacije i informatika). Aktivna je članica međunarodne udruge za razmjenu studenata tehničkih znanosti. IAESTE (engl. International Association for the Exchange of Students for Technical Experience), u čijoj je organizaciji boravila u Saveznoj Republici Njemačkoj kroz dvije akademske godine. Ondje je stekla iskustva u području istraživanja i razvoja senzora korištenih u automobilske industriji, a bila je angažirana i u području razvoja električnih strojeva i pogona na Institutu za elektrotehniku u sklopu Sveučilišta tehničkih znanosti u Dresdenu. U budućnosti se namjerava posvetiti daljnjem usavršavanju u struci.