

# Utjecaj dielektričnog plašta konusnog oblika izrađenog od drveta na koeficijent refleksije S11 kružne otvor antene.

---

Šifner, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:819026>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

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**

**Utjecaj dielektričnog plašta na koeficijent refleksije  $S_{11}$   
otvor antene napajane valovodom kružnog presjeka**

**Diplomski rad**

**Antonio Šifner**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Antonio Šifner
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Računarstvo
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D1328R, 07.10.2022.
<b>JMBAG:</b>	0236227460
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Slavko Rupčić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	prof. dr. sc. Davor Vinko
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Utjecaj dielektričnog plašta konusnog oblika izrađenog od drveta na koeficijent refleksije S11 kružne otvor antene.
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Utjecaj dielektričnog plašta izrađenog od drveta u obliku konusa različitih veličina na koeficijent refleksije S11 kružne otvor antene smještene na planarnoj uzemljenoj površini.
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	17.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	27.09.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	02.10.2024.



**FERIT**

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

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 02.10.2024.

**Ime i prezime Pristupnika:**

Antonio Šifner

**Studij:**

Sveučilišni diplomski studij Računarstvo

**Mat. br. Pristupnika, godina upisa:**

D1328R, 07.10.2022.

**Turnitin podudaranje [%]:**

13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj dielektričnog plašta konusnog oblika izrađenog od drveta na koeficijent refleksije S11 kružne otvor antene.**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Vanja Mandrić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada.....</b>	<b>2</b>
<b>2. ANTENE I PARAMETRI ANTENA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Antene .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Parametri antene.....</b>	<b>5</b>
2.2.1. Polarizacija antene .....	5
2.2.2. Dijagram zračenja .....	6
2.2.3. Ulazna impedancija.....	7
2.2.4. S parametri.....	8
2.2.5. $S_{11}$ parametar - koeficijent refleksije .....	9
2.2.6. VSWR .....	10
<b>3. OTVOR ANTENE.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Otvor antena napajana valovodom kružnog presjeka .....</b>	<b>11</b>
3.1.1. Valovod .....	12
<b>4. SIMULACIJA RADA KRUŽNE OTVOR ANTENE.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1. Ansys HFSS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2. Izvršavanje simulacija .....</b>	<b>18</b>
<b>5. ANALIZA REZULTATA.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1. Rezultati simulacija <math>S_{11}</math> parametra kružne otvor antene .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2. Analiza rezultata simulacija i mjerenja parametra <math>S_{11}</math> konusa i valjka .....</b>	<b>24</b>
<b>5.3. Dijagram zračenja antene .....</b>	<b>26</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>30</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>31</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>33</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>34</b>

## 1. UVOD

Antena je ključna komponenta u bežičnim komunikacijskim sustavima, koja emitira i prima magnetska i električna polja postavljena pod pravim kutom, u obliku ravnih valova koji se šire prostorom. Ti valovi se zovu elektromagnetski valovi i emitiraju se iz antene koja elektromagnetsku energiju vođenu kroz valovode pretvara u prostorni ravni val.

Antene se prilagođavaju obliku površine na koju su postavljene. Često se prilagođavaju površini zbog elektromagnetskih obilježja, a i zbog tehničkih zahtjeva.

Otvor antene omogućavaju širenje elektromagnetske energije, koja se obično nalazi u kružnim valovodima. U ovom radu promatra se antena s kružnim otvorom na koju je nadovezan valovod sa kružnim presjekom na planarnoj ili ravnoj površini.

Rad se sastoji od 6 poglavlja. Na početku diplomskog rada govorit će se o anteni i njezinim parametrima kao što su dijagram zračenja, ulazna impedancija, koeficijent refleksije  $S_{11}$ , te VSWR (eng. *Voltage Standing Wave Ratio*).

U središnjem dijelu govorit će se o programu u kojem su se radile simulacije koji se zove Ansys HFSS i kako on funkcionira. Zatim će se prikazati kako su se simulacije izvršavale u tom programu.

Na samom kraju diplomskog rada prikazati će se dobiveni rezultati simulacija koji se dobiveni korištenjem Ansys HFSS programa, te će se onda vršiti analiza samih rezultata. Na kraju samog rada iznosi se zaključak i sažetak koji su napisani na hrvatskom i engleskom jeziku.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

Diplomski rad vrši analizu antene napajane valovodom kružnog presjeka smještene na planarno uzemljenoj površini, te se istražuje kakav utjecaj na  $S_{11}$  parametar ima dielektrični plašt izrađen od drveta. Ovo istraživanje promatra utjecaj geometrijskih parametara na  $S_{11}$  parametar. Geometrijski parametri koji se koriste uključuju širinu, visinu i oblik plašta. Za određivanje utjecaja dielektričnog plašta na  $S_{11}$  parametar potrebno je izvršiti simulacije i provjeriti ih mjerenjem.

Potrebno je izraditi plašteve konusnog i valjkastog oblika. Konus i valjak izrađeni su od drvenog materijala čija je relativna dielektrična permitivnost iznosila 2. Za konus, duljine korištene za osnovicu ili bazu bile su 61 mm, 90 mm i 120 mm, dok se za visinu konusa koriste duljine od 24 mm, 54 mm i 88 mm. Za valjak, duljine korištene za osnovicu ili bazu također su 61 mm, 90 mm i 120 mm, dok se za visinu valjka koriste duljine od 26 mm, 34 mm, 54 mm i 94 mm.

Simulacije za izračun koeficijenta refleksije  $S_{11}$  provode se na anteni unutarnjeg promjera od 120 mm. Frekvencijsko područje (eng. *frequency sweep*) koje se koristi za proučavanje  $S_{11}$  koeficijenta refleksije kreće se između 1 GHz i 2.2 GHz. Nakon uspješnih simulacija pomoću Ansys HFSS programa, moguće je očitati minimalnu vrijednost  $S_{11}$  za sve dimenzije dielektričnog plašta te analizirati vrijednost rezonantne frekvencije i karakteristike antene i plašta pri kojima se postižu najbolji rezultati.

Cilj diplomskog rada je istražiti utjecaj geometrijskih parametara dielektričnog plašta na promjenu karakteristika antene, kako bi ona što bolje zračila te imala manji gubitak prilikom refleksije.

## 2. ANTENE I PARAMETRI ANTENA

U ovom poglavlju diplomskog rada govorit će se općenito o antenama i njihovim glavnim parametrima. Razumijevanje ključnih parametara antene kao što su  $S_{11}$  parametar bitno je za odabir optimalne antene za praktičnu primjenu.

### 2.1. Antene

Antena je uređaj koji se koristi za pretvorbu elektromagnetske energije. Antena služi prilagodbi valovoda i slobodnog prostora. Također, antena energiju koju zrači usmjerava prema okolnom prostoru [1].

Antene su proizvedene korištenjem provodljivih ili dielektričnih materijala, dizajnirane su sa željenim zračenjem ili značajkama prijema i korištenje prikladnih sklopova za spajanje na vanjski priključak za ulaz/izlaz (I/O) veza. Ulaz/izlaz se može koristiti za pobuđivanje antene iz izvora radio-frekvencijskog signala ili za spajanje bilo kojeg radio-frekvencijskog signala koji prima antena do izlaza opterećenje, kada radi kao odašiljač ili prijammnik. Ovisno o pojedinoj primjeni i zahtjevima, antena može biti vrlo jednostavnog oblika, poput komad metalne žice ili šipke koji se koristi u automobilskom ili kućnom radiju, ili može biti mnogo složenijeg oblika i veličine za sofisticiranije primjene u bežičnoj komunikaciji i radaru [2].

Antene se dijele na [1]:

1. Yagi-antene
2. Otvor kao izvor zračenja (otvoreni valovod, lijevak-antena, prorez antena)
3. Reflektor-antene
4. Leća-antene
5. Širokopojasne antene
6. Helikoidne antene
7. Mikrotrakaste antene



Yagi-antene su antene kod kojih se umjesto napajanja niza dipola, samo jedan dipol se napaja koji se zove aktivni dipol, a svi ostali dipoli se zove parazitni koji se u svom nožištu kratko spajaju. Kod tih antena se struja u parazitnim dipolima pojavljuje pod utjecajem zračenja aktivnog dipola.

Kod otvora kao izvora zračenja dijagram zračenja se odredi ako se pretpostavi da na jednoj zamišljenoj ravnini površina otvora služi kao izvor zračenja. Elektromagnetsko polje je po cijeloj ravnini, koja je određena otvorom, zanemarivo malo osim na samoj površini otvora. Otvor može biti u obliku pravokutnika ili kružnice. Tipični oblici takvih antena su otvoreni valovod, ljevak-antena i prorez antena. U ovom radu se koristi otvoreni valovod sa otvorom kružnog presjeka odnosno u obliku kružnice.

Reflektor antene se dijele na ravni, kutni i parabolni reflektor. Kod ravnog reflektora, reflektor je idealna vodljiva ploha. Kod kutnog reflektora upotrebljavaju se dvije reflektorske površine koje se sijeku pod nekim kutom  $\alpha$ , a izvor se stavi u simetralnu ravninu. Kod parabolnog reflektora ploha reflektora je površine rotacijskog paraboloida ili parabolnog cilindra.

Leće-antene su antene koje se koriste radi velike usmjerenosti zračenja, ali za razliku od reflektora imaju manje izraženo zračenje u poluprostor. Dijele se na dielektrične i metalne.

Širokopolasne antene su antene koje su frekvencijski neovisne, te mogu biti istokutne i logaritmički periodske.

Helikodne antene su antene koje se sastoje od jedne zavojnice postavljene okomito u vodljivu plohu i napajane koaksijalnim vodom. Tim antenama se postiže relativno visoko frekvencijsko područje.

Mikrotrakaste antene se sastoje od dviju međusobno paralelnih vodljivih površina između kojih se nalazi sloj dielektričnog supstrata. Donja vodljiva ploha je uzemljena a gornji vodič, koji služi kao radijator je zapravo pločica određenog oblika i veličine. Takve antene imaju više takvih pločica koje su povezane mikrotrakastim vodovima odakle i dolazi sam naziv. Ovisno o obliku pločice mogu biti mikrotrakaste antene s pravokutnom pločicom i mikrotrakaste antene s kružnom pločom [1].

## 2.2. Parametri antene

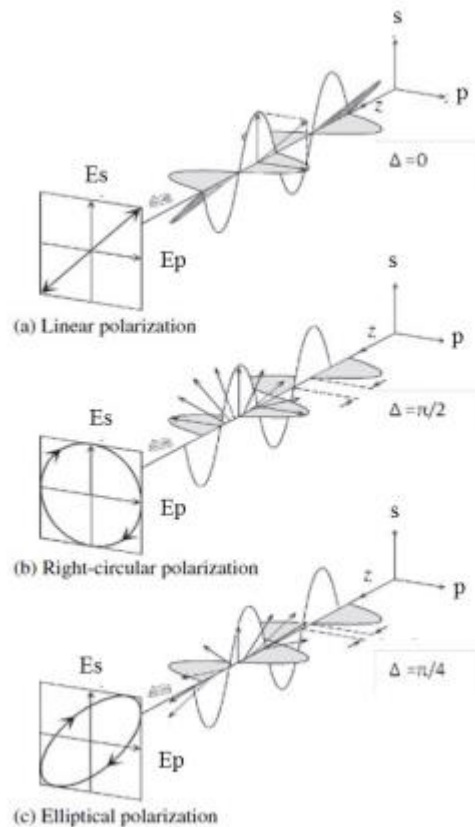
### 2.2.1. Polarizacija antene

Važno svojstvo elektromagnetskog vala je njegova polarizacija, veličina koja opisuje orijentaciju električnog polja [3]. Promatranjem elektromagnetskog polja antene uočava se da vektori električnog i magnetskog polja uvijek se nalaze u ravnini koja se nalazi okomito smjeru širenja vala. Polarizacija vala je definirana kao krivulja koja opisuje vektor električnog polja koji se nalazi u nekoj ravnini. Pod polarizacijom antene podrazumijevamo smjer maksimalnog zračenja u kojem se širi polarizacija vala [1].

Postoje eliptična, linearna i kružna polarizacija (Slika 2.1). Najopćenitiji slučaj polarizacije je eliptična polarizacija kod koje vrh vektora električnog polja opisuje elipsu što znači da vektor mijenja i veličinu i kutnu brzinu ovisno o vremenu. Eliptična polarizacija određena je pomoću 3 veličine: količnikom velike i male osi ili aksijalnim odnosom, smjerom velike osi u odnosu na odabrani koordinatni sustav, smjerom rotacije gledano u smjeru širenja vala. Dva eliptično polarizirana vala imaju ortogonalne polarizacije ako su im aksijalni odnosi jednaki, velike osi okomite jedna na drugu i ako im je suprotan smjer rotacija.

Linearnu polarizaciju opisuje to što joj je smjer vektora električnog polja uvijek konstantan, a mijenja mu se samo veličina. Pošto se smjer linearne polarizacije definira u odnosu na Zemljinu površinu, razlikuju se dvije polarizacije: horizontalna i vertikalna. Kod nižih frekvencija koristi se vertikalna polarizacija, dok kod viših može horizontalna ili vertikalna. Dva linearno polarizirana vala imaju ortogonalne polarizacije ako im vektori električnog polja čine u prostoru pravi kut.

Kod kružne polarizacije veličina vektora električnog polja ostaje konstantna, a mijenja mu se smjer konstantnom kutnom brzinom. Pri kružnoj polarizaciji razlikuje se lijeva i desna polarizacija, ovisno o tome rotira li se vektor električnog polja kao desni ili lijevi vijak gledano u smjeru širenja vala. Kružna polarizacija se primjenjuje ako se želi ostvariti veza između dvaju pokretnih objekata koji mogu imati bilo kakvu orijentaciju u prostoru. Dva kružno polarizirana vala imaju ortogonalne polarizacije im je smjer rotacije suprotan [1].



Slika 2.1. Vrste polarizacije elektromagnetskog vala, izvor: [4]

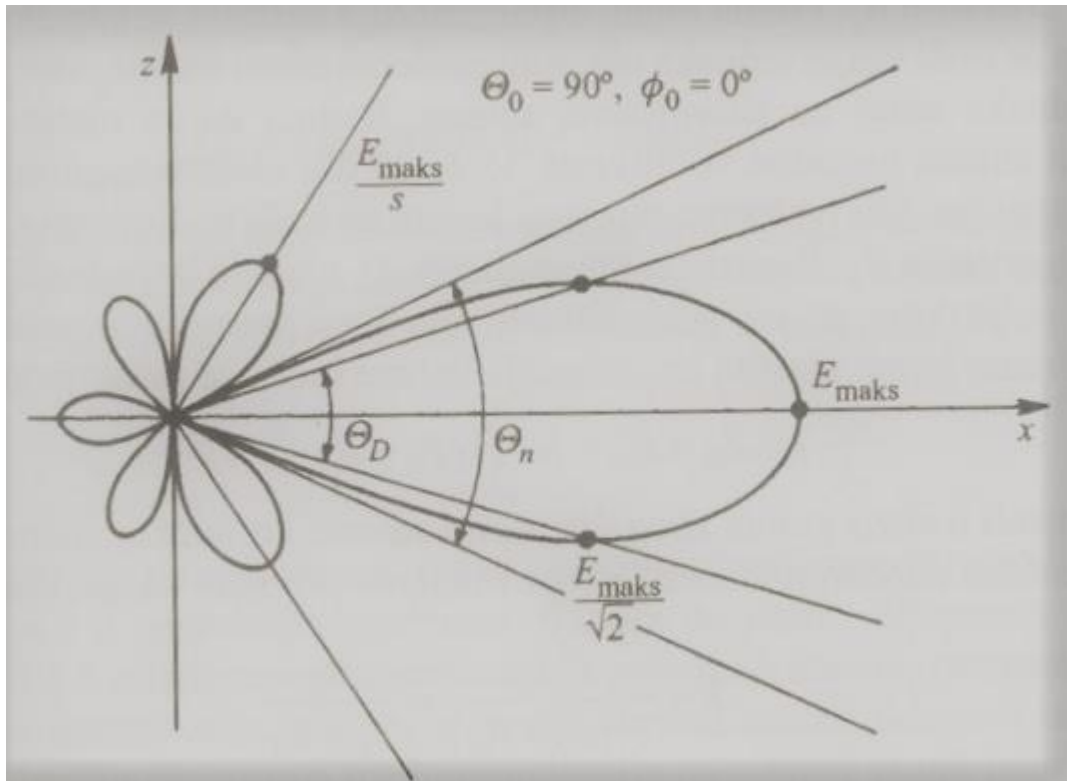
### 2.2.2. Dijagram zračenja

Dijagram zračenja antene definiran je kao "matematička funkcija ili grafički prikaz svojstava zračenja antene kao funkcije prostornih koordinata. U većini slučajeva, dijagram zračenja određen je u području dalekog polja i predstavljen je kao funkcija usmjerenih koordinata, uključujući gustoću toka snage, intenzitet zračenja, jakost polja, fazu usmjerenosti ili polarizaciju" [5]. Dijagram zračenja se izražava u decibelima (dB) ili brojčano.

Kod dijagrama zračenja smjer maksimalnog zračenja se presjeca ravninama koje su položene okomito. Te dvije ravnine su E-ravnina i H-ravnina. U E-ravnini leži vektor električnog polja, a u H-ravnini leži vektor magnetskog polja.

Karakteristične veličine dijagrama zračenja su kut usmjerenosti, širina snopa i faktor potiskivanja sekundarnih latica. Kut usmjerenosti  $\theta_D$  (Slika 2.2.) u vertikalnom, odnosno  $\Phi_D$  u horizontalnom dijagramu zračenja predstavlja kut oko glavnog smjera zračenja unutar kojeg zračna snaga ne pada ispod polovice one snage koja se zrači u glavnom smjeru. Kut usmjerenosti kod dijagrama zračenja je jednak jakosti polja u smjeru maksimalnog zračenja podijeljenoj s  $\sqrt{2}$ . Širina snopa  $\theta_N$  u

vertikalnom, odnosno  $\Phi_N$  u horizontalnom dijagramu predstavlja kut između prvih nultočaka s jedne i s druge strane maksimalnog zračenja, taj kut omeđuje glavnu laticu. Faktor potiskivanja latica s definira se kao odnos između jakosti polja u smjeru maksimalnog zračenja i onog u smjeru maksimuma najveće sekundarne latice.



Slika 2.2. Skica vertikalnog dijagrama zračenja, izvor: [1]

### 2.2.3. Ulazna impedancija

Ulazna impedancija definirana je kao "impedancija koju predstavlja antena na svojim terminalima ili omjer napona i struje na paru terminala ili omjer odgovarajućih komponenti električnog i magnetskog polja u točki" [5]. Ako se antena nalazi u slobodnom prostoru tako da su svi objekti smješteni na velikoj udaljenosti onda je riječ o impedanciji antene. Kako odašiljačka antena zrači u prostor, gubitak snage može se predstaviti otporom koji je dio omske komponente impedancije antene, a naziva se otporom zračenja  $R_Z$ . Ekvivalentan otpor na kojem se troši ta disipirana snaga naziva se otporom gubitka  $R_d$ .  $R_A$  predstavlja otpor antene, a  $X_A$  njenu reaktanciju. S obzirom na sve navedeno impedancija antene se može napisati izrazom [1]:

$$Z_A = R_A + jX_A = R_Z + R_d + jX_A \quad (2-1)$$

Zbog disipacije antene definira se faktor iskorištenja  $k$ . On predstavlja odnos zračne snage i ukupne prividne snage što je prikazano sljedećom jednačinom:

$$k = \frac{I^2 R_Z}{I^2 (R_Z + R_d)} = \frac{R_Z}{R_Z + R_d} \quad (2-2)$$

Omska i reaktivna komponenta impedancije antene mijenjaju se s frekvencijom. Zato što se impedancija sustava sporije mijenja s frekvencijom nego impedancija antene, postoji ograničeno frekvencijsko područje unutar kojeg je antena prilagođena na impedanciju sustava sa zadovoljavajućim odnosom stojnih valova. To frekvencijsko područje se zove širina pojasa antene. Ulazna impedancija ne ovisi samo o vlastitoj impedanciji nego i o strujama drugih antena i o međuiimpedancijama.

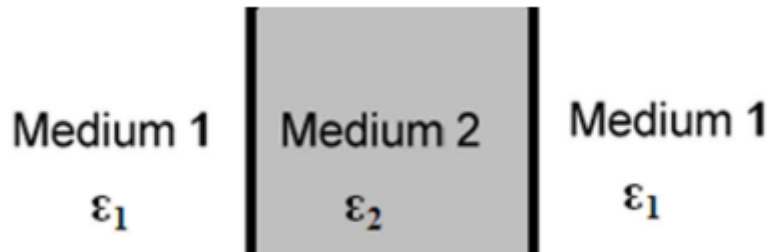
#### **2.2.4. S parametri**

S parametri, ili parametri raspršenja, koriste se za kvantifikaciju refleksije i za opisivanje odnosa između ulaznih i izlaznih priključaka u strujnim krugovima. Oni su korisni jer omogućuju prikazivanje ponašanja u obliku valova, umjesto napona i struja. S parametri pokazuju koliki se dio vala reflektira ili prenosi kada naiđe na određeni uređaj.

Kada se promatra točke u sustavu. Svaka točka će imati jednu ulaznu priključnicu i jednu izlaznu priključnicu. Ako u sustavu postoje dvije takve točke onda postoje četiri S parametra. Ti parametri su  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ . Svaki od tih parametara predstavlja količinu snage koja se reflektira. Kod  $S_{11}$  parametar prikazuje se refleksija izlazne priključnice prve točke u odnosu na ulaznu priključnicu te iste prve točke. Kod  $S_{12}$  parametra prikazuje se refleksija izlazne priključnice druge točke u odnosu na ulaznu priključnicu prve točke, analogno tome gledaju se i  $S_{21}$  i  $S_{22}$ .

### 2.2.5. $S_{11}$ parametar - koeficijent refleksije

Refleksije elektromagnetskih valova javljaju se na granicama ravnine neusklađenosti. Ravninom neusklađenosti (Slika 2.3.) smatra se granica dvaju medija s različitim dielektričnim svojstvima, odnosno medija s različitim permitivnostima.



Slika 2.3. Granica neusklađenosti između dielektričnih medija, izvor:[6]

Interakcija elektromagnetskog vala na ravninama neusklađenosti dovodi do refleksije i prijenosa valova na granici medija, što se prikazuje koeficijentom refleksije  $\Gamma$  i koeficijentom transmisije  $\tau$  [6].  $S_{11}$  parametar je koeficijent refleksije i definiran je kao omjer reflektirane snage prema ulaznoj snazi. Vrijednosti  $S_{11}$  parametra su izražene u decibelima (dB) i negativne su, jer pokazuju gubitke snage zbog refleksije. Ukupni koeficijent refleksije za oba medija se može prikazati jednadžbom [7]:

$$S_{11} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\Gamma_1(1 - e^{j2k_2d})}{1 - \Gamma_1^2 e^{j2k_2d}} \quad (2-3)$$

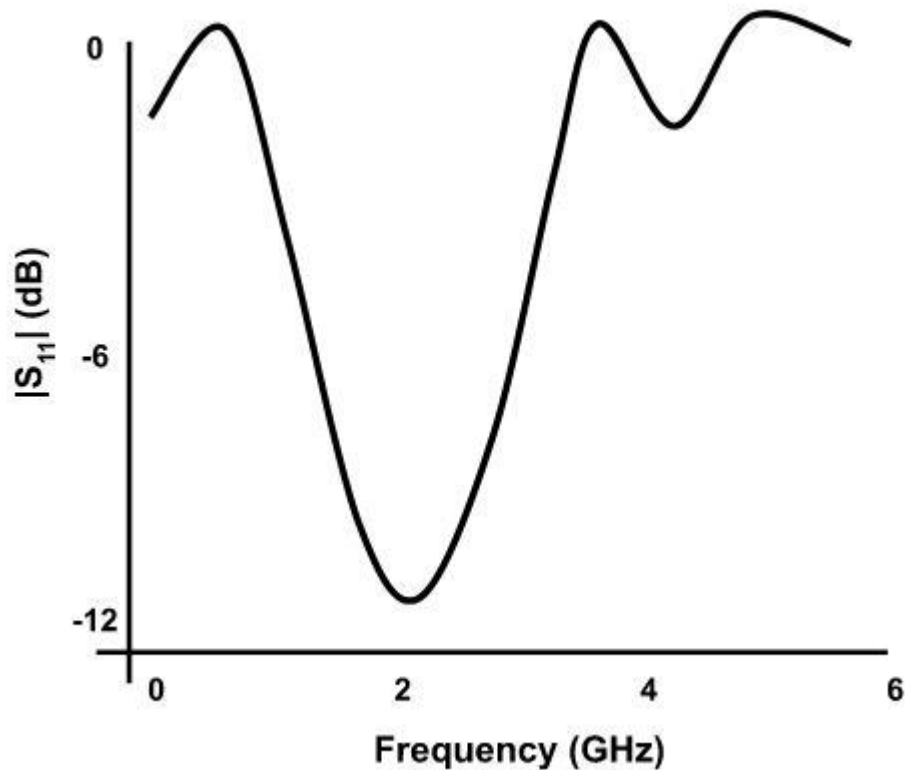
Valni broj drugog medija može se napisati kao:

$$k_2 = \sqrt{\epsilon_r k_1} \quad (2-4)$$

gdje je:

- $E_r$  – upadni val
- $E_i$  – reflektirani val
- $\Gamma_1$  - koeficijent refleksije prvog medija
- $S_{11}$  - ukupni koeficijent refleksije
- $d$  - debljina dielektrične ploče
- $k_1$  - valni broj prvog medija

Prema slici 2.4. može se vidjeti ovisnost koeficijent refleksije antene pri različitim frekvencijama. Za postizanje takvog grafa treba se izvršiti simulacija kako bi se onda vidjelo pri kojim frekvencijama koeficijent refleksije je najniži. U ovom primjeru vrijednost  $S_{11}$  parametra pri rezonantnoj frekvenciji teži -12 dB.



Slika 2.4. Dvodimenzionalni graf koji prikazuje ovisnost  $S_{11}$  parametra o frekvenciji [8].

### 2.2.6. VSWR

VSWR označava omjer vala napona kada je njegova vrijednost u maksimumu i minimumu. i označava kvalitetu usklađivanja impedancije.

$$VSWR = \frac{|U|_{MAX}}{|U|_{MIN}} \quad (2-5)$$

Pošto je VSWR funkcija koeficijenta refleksije može se izraziti sljedećom jednačbom [9]:

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2-6)$$

gdje je  $\Gamma$  koeficijent refleksije odnosno  $S_{11}$  parametar.

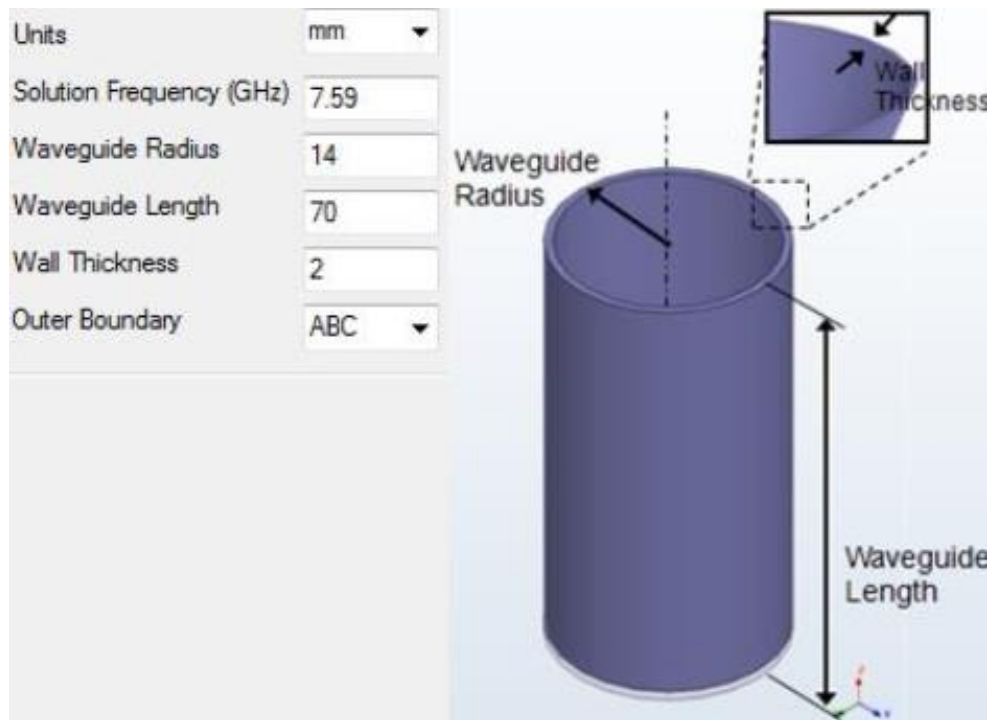
### 3. OTVOR ANTENE

Otvor antene se odnosi na prednji dio antene iz kojeg elektromagnetski valovi izlaze ili ulaze. Otvor antene može biti različitih oblika i dizajna, ovisno o specifičnim primjenama i zahtjevima. Zbog svojih jedinstvenih geometrijskih svojstava, otvor antene pružaju mogućnost postizanja značajnog dobitka, što ih čini poželjnima u situacijama gdje su velike frekvencije i smanjene dimenzije antene od ključne važnosti. Naime, za postizanje visokog dobitka, dimenzije otvora antene moraju biti jednake ili veće od valne duljine elektromagnetskog vala. To uvjetuje da se ove antene primarno koriste u mikrovalnom području frekvencija, gdje valne duljine iznose svega nekoliko centimetara. U otvor antene spadaju i valovodne antena. Za praktični dio diplomskog rada koristila se valovodna antena kružnog presjeka.

#### 3.1. Otvor antena napajana valovodom kružnog presjeka

Otvor antena napajana valovodom kružnog presjeka je vodljivi cilindar kroz koji se prenose elektromagnetski valovi koji zrače unutar njega. Prijenos signala u valovodima smanjuje rasipanje energije. Signal ide duž vodiča, ograničavajući njegove granice. Najčešće se koriste u opremi kao što su radari, koji trebaju rotirajuću antenu [10]. Na slici 3.1. se vidi geometrija valovodne antene kružnog presjeka. Dimenzije su prikazane u milimetrima (mm) te se može vidjeti radijus valovoda (eng. *Waveguide Radius*), duljina valovoda (eng. *Waveguide Length*) i debljina plašta valovoda (eng. *Wall Thickness*).





*Slika 3.1. Geometrija kružnog valovoda, izvor: [9]*

### **3.1.1. Valovod**

Valovodi su mediji koji se koriste za usmjeravanje i širenje elektromagnetskih valova od jedne točke do druge. Općenito se koriste za prijenos visoko frekventnih valova kao što su mikrovalovi, radio valovi, infracrveni valovi i slično. Za niskofrekventne valove koji su manji od 1 MHz, koriste se paralelne prijenosne linije ili koaksijalni kabeli. Najčešći tip valovoda je šuplja vodljiva metalna cijev koja prenosi radio valove visoke frekvencije. Na slici 3.2. je prikazan izgled valovoda u stvarnom svijetu, te u ovom primjeru je prikazan valovod s kružnim presjekom.



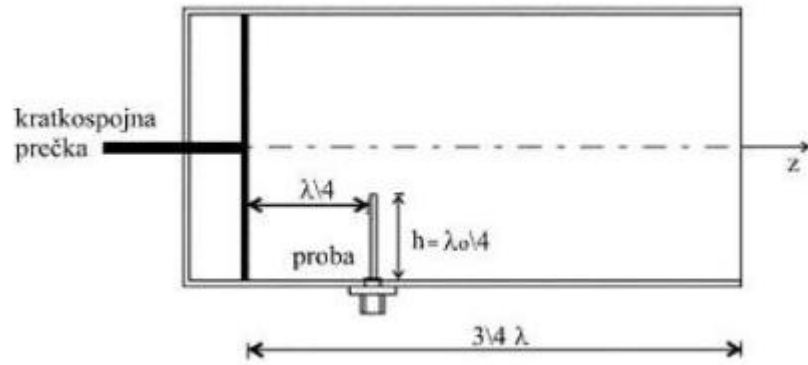
*Slika 3.2. Fizički primjer valovodne antena kružnog presjeka, izvor: [11]*

U ovom radu se koristi koaksijalna linija za pobudu valovoda, pri čemu je spoj između koaksijalne linije i valovoda izveden pomoću sonde (eng. *probe*). Sonde predstavljaju oblik monopol antena koje se koriste za uvođenje elektromagnetskih valova iz koaksijalne linije u valovod.

Sonda se sastoji od produžetka središnjeg vodiča koaksijalne linije koji se uvodi unutar valovoda. Kada se elektromagnetski val prenosi kroz koaksijalnu liniju, sonda uvodi ovaj val u valovod gdje se on dalje propagira. Sonda generira električno polje koje je paralelno linijama sila maksimuma električnog polja unutar valovoda.

Položaj sonde unutar valovoda je ključan za učinkovitu pobudu. Da bi se postigla maksimalna učinkovitost, sondu je potrebno postaviti na lokaciju unutar valovoda gdje se nalaze maksimumi električnog polja. To je obično blizu zidova valovoda u blizini maksimuma stojećeg vala električnog polja.

Na slici 3.3. sonda se nalazi na udaljenosti od  $\lambda/4$  od kratkospojne prečke, s duljinom sonde  $h$ . Duljina samog valovoda iznosi  $3/4$  valne duljine ( $3/4 \lambda$ ) vala koji se propagira unutar valovoda. Ovaj položaj sonde osigurava da se postigne efikasna pobuda valovoda, minimizirajući refleksije i gubitke. U samom radu koristi se sonda unutar valovoda kružnog presjeka.



Slika 3.3. Geometrijski parametri sonda unutar valovoda kružnog presjeka, izvor:[12]

## 4. SIMULACIJA RADA KRUŽNE OTVOR ANTENE

Svrha ovog rada je prikazati kako dodavanje dielektričnog plašta izgrađenog od drveta, različitih dimenzija i oblika, utječe na zračenje antene uzemljene na planarnoj površini odnosno prikazati ovisnost  $S_{11}$  parametra o geometrijskim parametrima dielektričnog plašta.  $S_{11}$  parametar je ključan jer pokazuje koliko se energije izgubi kroz refleksiju što izravno utječe na performanse antene. Kroz koeficijenta refleksije moguće je također utvrditi unutar kojeg frekvencijskog područja antena radi efikasnije.

Za potrebe određivanja  $S_{11}$  parametra koristio se program Ansys HFSS. Verzija programa u kojoj su se radile simulacije je Ansys Electronics Desktop Student 2023 R2, koja je bila dostupna besplatno. Tijekom praktičnog dijela diplomskog rada izrađeni su konusni i valjkasti dielektrični plašteni različitih promjera i visina, kako bi se za svaki oblik mogla odrediti vrijednost koeficijenta refleksije  $S_{11}$ .

### 4.1. Ansys HFSS

Ansys HFSS je program za 3D elektromagnetsku simulaciju za projektiranje i simulaciju visokofrekventnih elektroničkih proizvoda kao što su antene, antenski nizovi, radio-frekventne ili mikrovalne komponente, interkonekcije velike brzine, filtri, konektori, IC paketi i tiskane ploče. Inženjeri diljem svijeta koriste program Ansys HFSS za dizajniranje visokofrekventne, brze elektronike koja se nalazi u komunikacijskim sustavima, naprednim sustavima pomoći vozaču (ADAS), satelitima i proizvodima interneta stvari (IoT) [13]. Glavni razlog zašto se HFSS koristi je zbog toga što on pruža programska rješenja koja omogućuju uštedu pri izradi projekta. Glavni razlog toga je zato što se na temelju testiranja simulacija može odrediti da li je isplativo nasataviti sa izgradnjom prototipa ili ne. Kada se pokrene program prikaže se logo Ansys Electronics (Slika 4.1.).



Slika 4.1. Ansys Electronics Desktop Student 2023 R2 logo

Ansys HFSS program nudi niz mogućnosti koje pomažu pri izvršavanju simulacija. Unutar sučelja HFSS-a (Slika 4.2.) se nalazi *Project Manager* koji služi kao alat za organizaciju i upravljanje različitim dijelovima projekta simulacije elektromagnetskih struktura. Korištenjem *Project Manager* u HFSS-u, inženjeri mogu efikasnije organizirati, upravljati i provoditi simulacije, što dovodi do bržeg i pouzdanijeg razvoja visokofrekventnih komponenti.

Ispod *Project Manager* s lijeve strane se nalazi dio koji se zove *Properties* koji služi za detaljno podešavanje i pregled različitih aspekata projekta. Ove postavke omogućavaju korisnicima da precizno definiraju karakteristike modela i simulacije. Preko *Properties* korisnik može definirati materijale, njihove dimenzije, postavke za generiranje mreže (eng. *mesh*) i slično.

Na donjem dijelu, ispod sekcije *Properties*, nalazi se *Message Manager* s lijeve strane i *Progress* s desne strane. *Message Manager* omogućava upravljanje i prikaz poruka koje se prikazuju kada korisnik crta nove modele ili vrši simulacije. Ovaj alat je važan jer pokazuje korisniku je li simulacija bila uspješna ili nije. Ako simulacija nije uspjela, daje objašnjenje zašto nije bila uspješna, čime korisnik može lakše pronaći uzrok problema i ispraviti greške. *Progress* je također važan jer daje korisniku uvid u trenutni status i detalje o procesu simulacije.

U sredini, odnosno najvećem dijelu sučelja, nalazi se prozor sa samim modelom. Na slici 4.2. nalazi se model antene na planarnoj površini s plaštem zračenja oko njega. Taj model antene se koristio prilikom izvođenja simulacija. Ispod i oko tog prozora nalaze se čvorovi preko kojih se može pristupiti podešavanju dijelova antene, kao i promjeni dimenzija i drugih postavki. Na

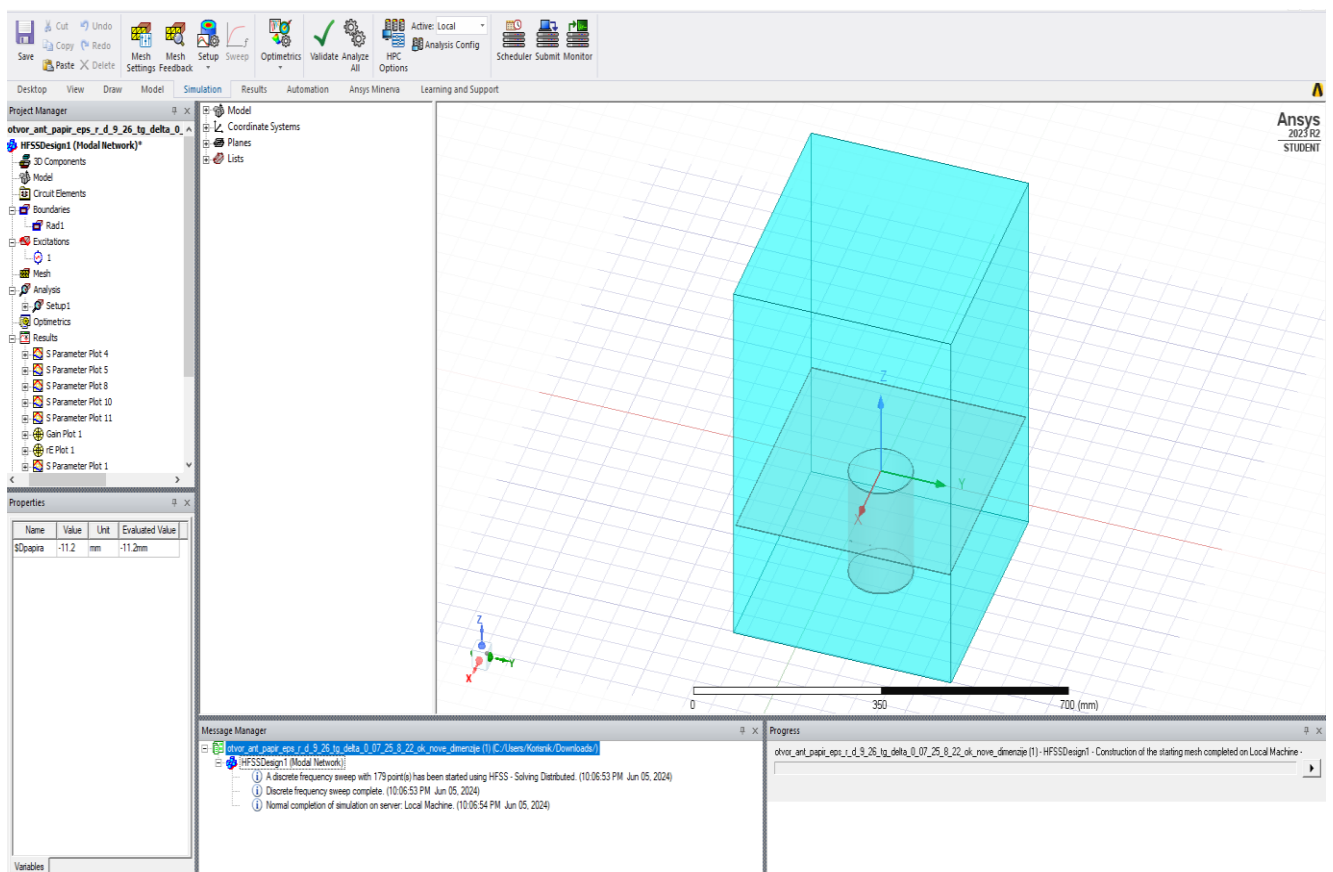
gornjem dijelu sučelja nalazi se alatna traka, u kojoj su, za potrebe ovog diplomskog rada, najviše korištene komponente *Draw*, *Model*, *Simulation* i *Results*.

*Draw* je sekcija koja se koristi za kreiranje i uređivanje geometrijskih modela. Ovo uključuje razne alate i funkcije koje omogućavaju korisnicima da definiraju oblik, veličinu i položaj elemenata unutar simulacije.

*Model* se koristi za kreiranje i uređivanje geometrijskih modela unutar simulacijskog okruženja. Ova sekcija omogućava korisnicima da precizno definiraju oblik, veličinu i položaj različitih elemenata koji čine njihov model.

Sekcija *Simulation* omogućava korisnicima postavljanje i pokretanje simulacija. Tamo se nalaze opcije kao *Setup*, *Validate* i *Analyze All* koje su se koristile primarno kod izvršavanja simulacija.

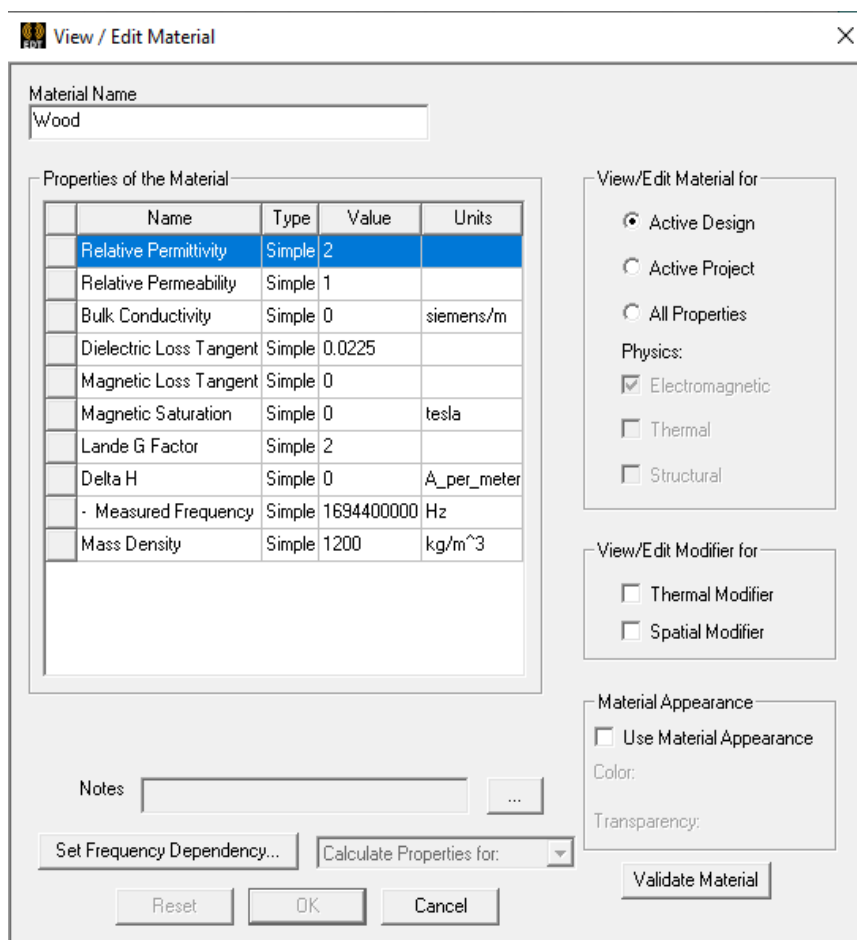
*Results* sekcija omogućava pregled i analizu rezultata simulacije. Ona se primarno koristi za prikazivanje grafičkog prikaza (eng. *plot*) rezultata.



Slika 4.2. Sučelje Ansys HFSS s antenom koja se koristila u diplomskom radu

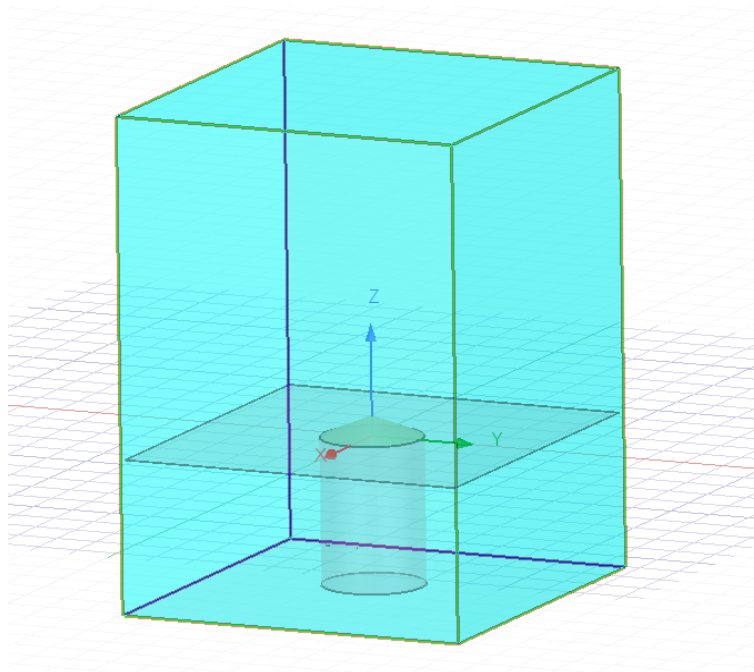
## 4.2. Izvršavanje simulacija

Antena ima kružni otvor promjera 120 mm i nalazi se na planarnoj odnosno ravnog podlozi dimenzija 450x423 mm i debljine 1 mm. Antena je pobuđena valovodom kružnog presjeka, a pobuda se ostvaruje probom duljine 36 mm i promjera 2 mm. Materijal od kojeg je izrađena antena je aluminij (eng. *aluminium*), dok je proba izrađena od bakra (eng. *copper*). Konus i valjak, koji su također dio modela, izrađeni su od drva. Budući da materijal "drvo" nije bio dostupan u popisu materijala unutar HFSS programa, bilo ga je potrebno ručno definirati. Na slici 4.3. prikazane su karakteristike drva (relativna permitivnost, relativna permeabilnost, dielektrični tangent gubitak i gustoća) koje su dodijeljene prilikom definiranja ovog materijala (eng. *wood*).

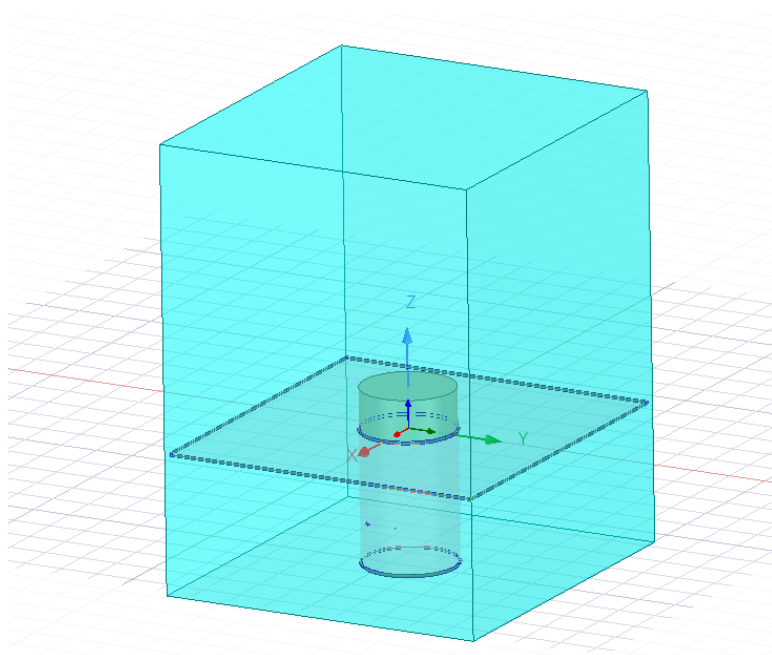


Slika 4.3. Karakteristike materijala drvo (eng. *wood*) u HFSS-u

Slike 4.4. i 4.5. prikazuju dielektrične plašte napravljene od konusa i valjka. Oba plašta su postavljena iznad kružnog otvora antene, a oko njih se nalazi područje zračenja oblika kocke (eng. *box*) dimenzija 460 x 580 mm. Na slici 4.4. se spominju dimenzije 61 x 24 što znači da je radijus baze konusa 61 mm i da je visina njegovog plašta 24 mm, dok se na slici 4.5. spominju dimenzije 61 x 54 što znači da je radijus baze valjka 61 mm , a njegova visina 54 mm.



*Slika 4.4. Konus dimenzija 61 x 24 mm koji se nalazi iznad kružnog otvora antene*

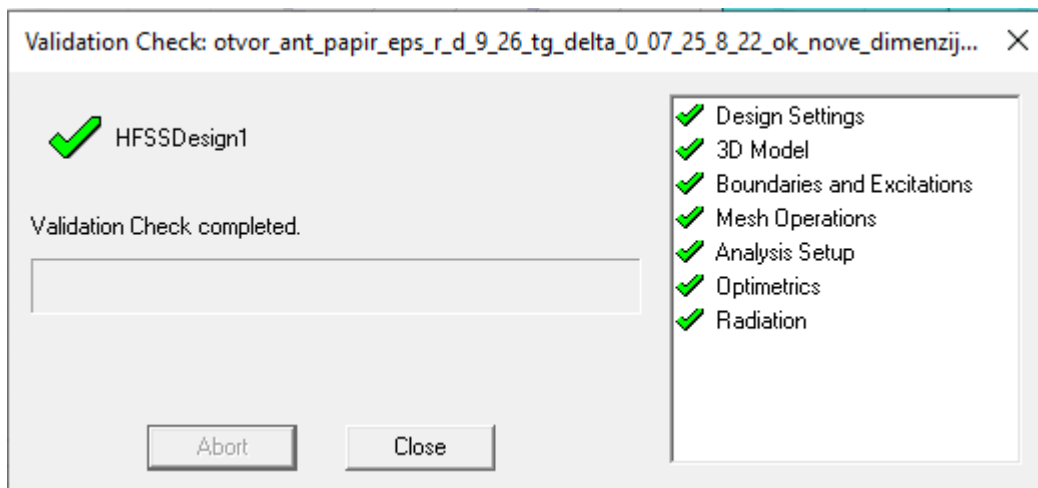


*Slika 4.5. Valjak dimenzije 61 x 54 mm koji se nalazi iznad kružnog otvora antene*



Za postavljanje frekvencije tijekom izvođenja simulacija korišten je *Solution Setup*, s frekvencijom postavljenom na 1.6994 GHz, što znači da bi koeficijent refleksije  $S_{11}$  trebao biti blizu te vrijednosti. Frekvencijski raspon (eng. *frequency sweep*) je postavljen od 1 GHz do 2.2 GHz, tako da se  $S_{11}$  koeficijent očituje unutar tog raspona.

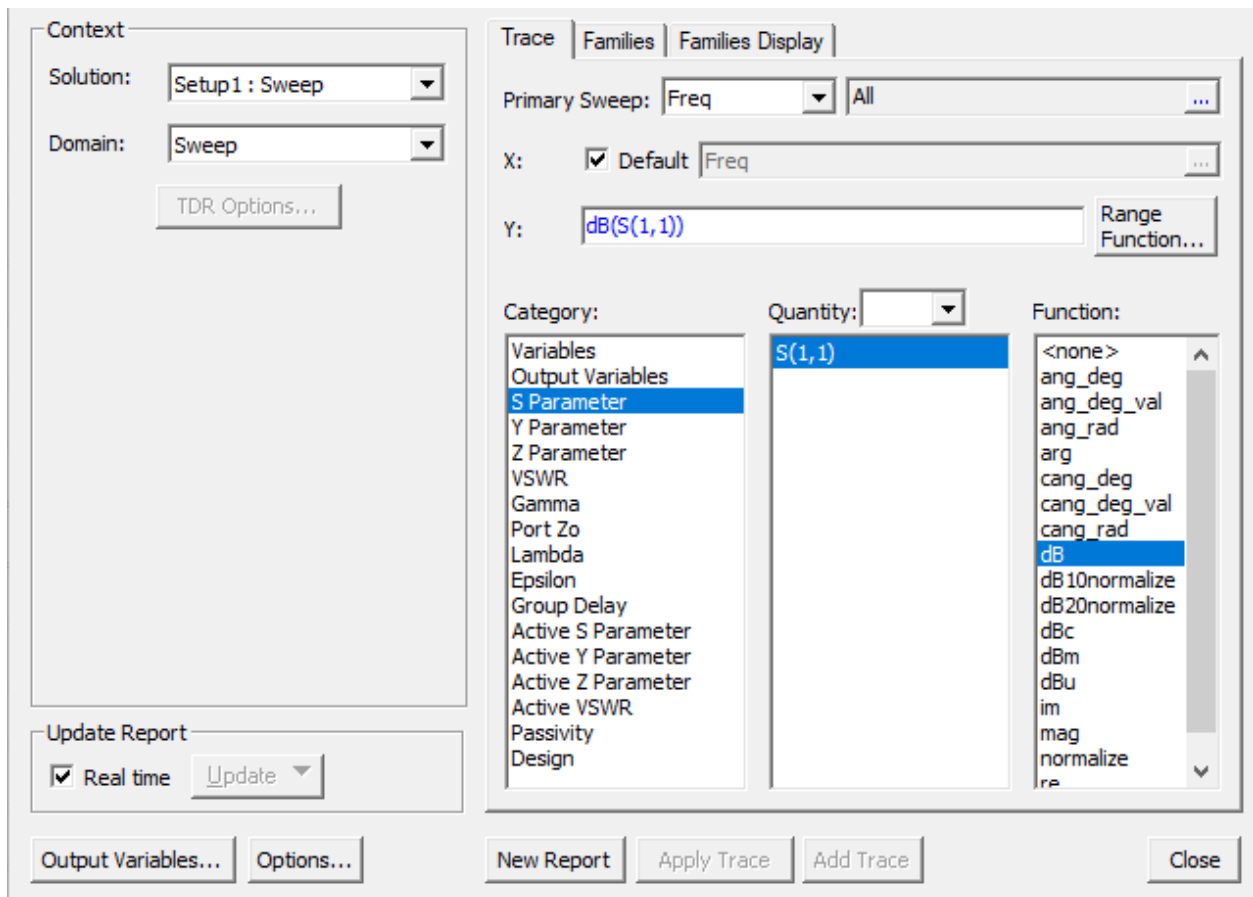
Prije pokretanja simulacije, potrebno je kliknuti na opciju *Validate* kako bi se provjerilo je li sve ispravno postavljeno (Slika 4.6.). Sve opcije trebaju biti označene kvačicama kako bi se omogućilo pokretanje simulacije. Ako je sve u redu, simulacija se pokreće odabirom opcije *Analyze All*.



Slika 4.6. Provjera validacije modela, frekvencija i radijacije

Nakon završetka simulacija, moguće je generirati rezultate  $S_{11}$  parametra. Unutar programa, to se postiže odabirom *HFSS => Results => Create Modal Solution Data Report => Rectangular Plot*. Otvara se prozor s različitim kategorijama rezultata. Za prikaz  $S_{11}$  parametra, odabire se kategorija *S Parameter* i pritisne opcija *New Report* (SI 4.7.).

Rezultati  $S_{11}$  parametra izraženi su u decibelima (dB), pri čemu vrijednosti uvijek imaju negativan predznak, jer je energija reflektiranog vala manja od energije upadnog vala.



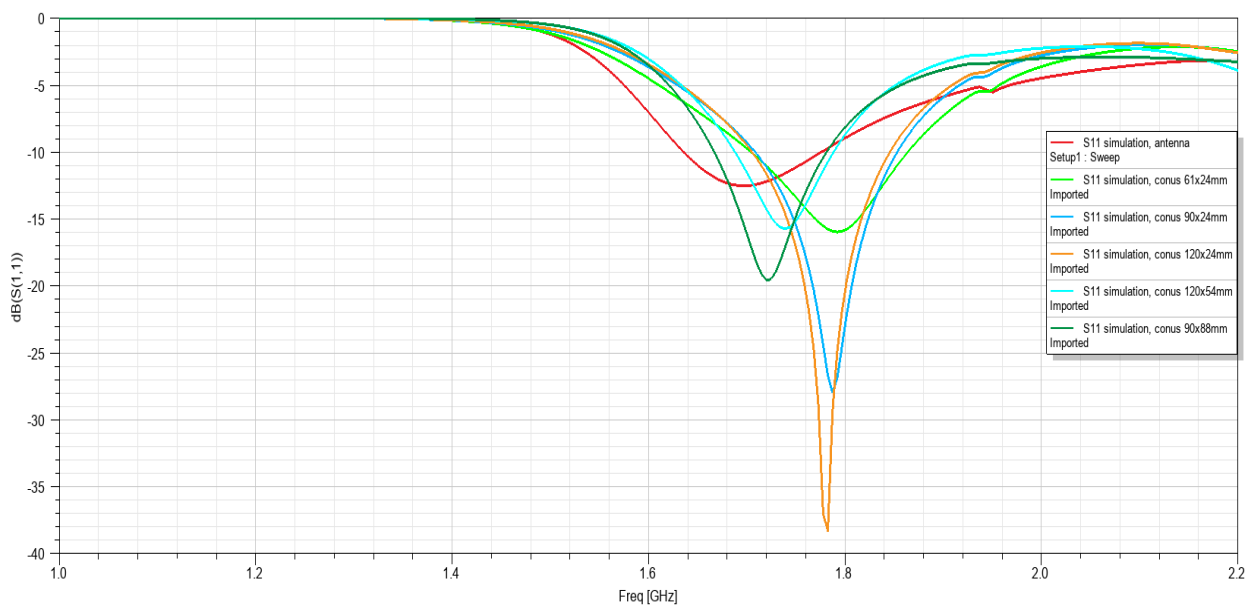
Slika 4.7. Prozor sa prikazom kategorija i funkcija parametra

## 5. ANALIZA REZULTATA

U programu Ansys HFSS analizirano je kako se koeficijent refleksije, odnosno  $S_{11}$  parametar, mijenja u odnosu na promjene geometrijskih parametara dielektričnog plašta. Elektromagnetski parametri, poput dielektrične permitivnosti se nisu uzimali u obzir, ostali su jednaki za sve plašteve, neovisno o njihovom obliku.

### 5.1. Rezultati simulacija $S_{11}$ parametra kružne otvor antene

Slika 5.1. prikazuje promjenu koeficijenta refleksije antene ( $S_{11}$ ) u ovisnosti o dimenzijama dielektričnog plašta. Crvena krivulja predstavlja antenu bez dielektrika, dok ostale krivulje prikazuju rezultate za antenu s dielektrikom u obliku konusa. Na grafu su vrijednosti  $S_{11}$  parametra prikazane u decibelima (dB) na osi ordinata, dok su frekvencije prikazane u gigahercima (GHz) na osi apscisa. Legenda povezuje boje krivulja s odgovarajućim dimenzijama konusa.



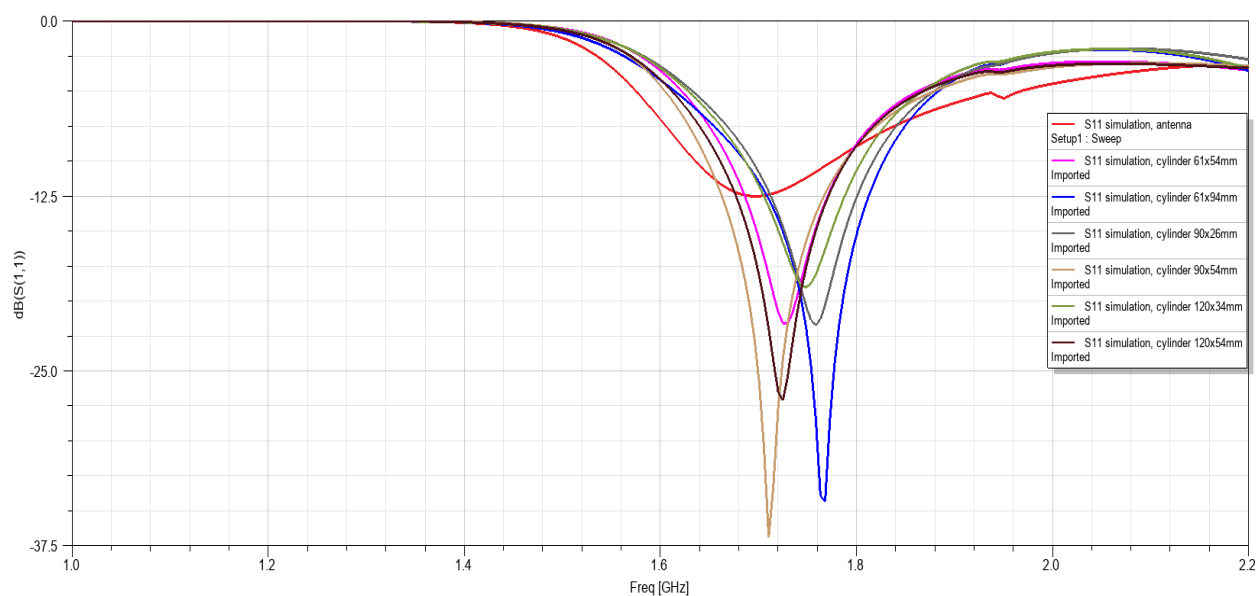
Slika 5.1. Rezultati simulacija antene sa dielektričnim plaštem konusnog oblika

Tablica 5.1. prikazuje detaljne informacije o pojedinim krivuljama sa slike 5.1. Prikazani su radijus, visina i volumen svakog plašta, kao i vrijednosti rezonantne frekvencije i  $S_{11}$  parametra dobivene simulacijom. Stupac s radijusom i visinom 0 mm odnosi se na antenu bez plašta. Svrha tablice je prikazati kako dimenzije dielektričnog plašta utječu na karakteristike antene.

Tablica 5.1. Brojčane vrijednosti dimenzija, frekvencije,  $S_{11}$  parametra i volumena antene sa dielektrikom oblika konusa

Radijus [mm]	0	61	90	120	120	90
Visina [mm]	0	24	24	24	54	88
Rezonantna Frekvencija [GHz]	1.6944	1.7920	1.7872	1.7824	1.7392	1.7200
Parametar $S_{11}$ [dB]	-12.5470	-15.9906	-27.9818	-38.3001	-15.7615	-19.5988
Volumen[cm <sup>3</sup> ]	0	93.518	203.575	361.911	814.3	746.442

Slika 5.2., slično kao slika 5.1., prikazuje promjenu koeficijenta refleksije antene ( $S_{11}$ ) u ovisnosti o dimenzijama dielektričnog plašta, s razlikom što je plašt ovdje u obliku valjka. Crvena krivulja prikazuje antenu bez plašta, dok ostale krivulje prikazuju rezultate za plašt valjkastog oblika. Vrijednosti  $S_{11}$  su izražene u decibelima (dB), a frekvencije u gigahercima (GHz). Legenda prikazuje povezanost boja krivulja s dimenzijama valjka.



Slika 5.2. Rezultati simulacija antene sa dielektričnim plaštem valjkastog oblika

Tablica 5.2., slično kao tablica 5.1., prikazuje karakteristike antene, a vrijednosti su uzete sa slike 5.2. Stupac s radijusom i visinom od 0 mm odnosi se na antenu bez dielektričnog plašta.

Tablica 5.2. Brojčane vrijednosti dimenzija, frekvencije,  $S_{11}$  parametra i volumena antene sa dielektrikom oblika valjka

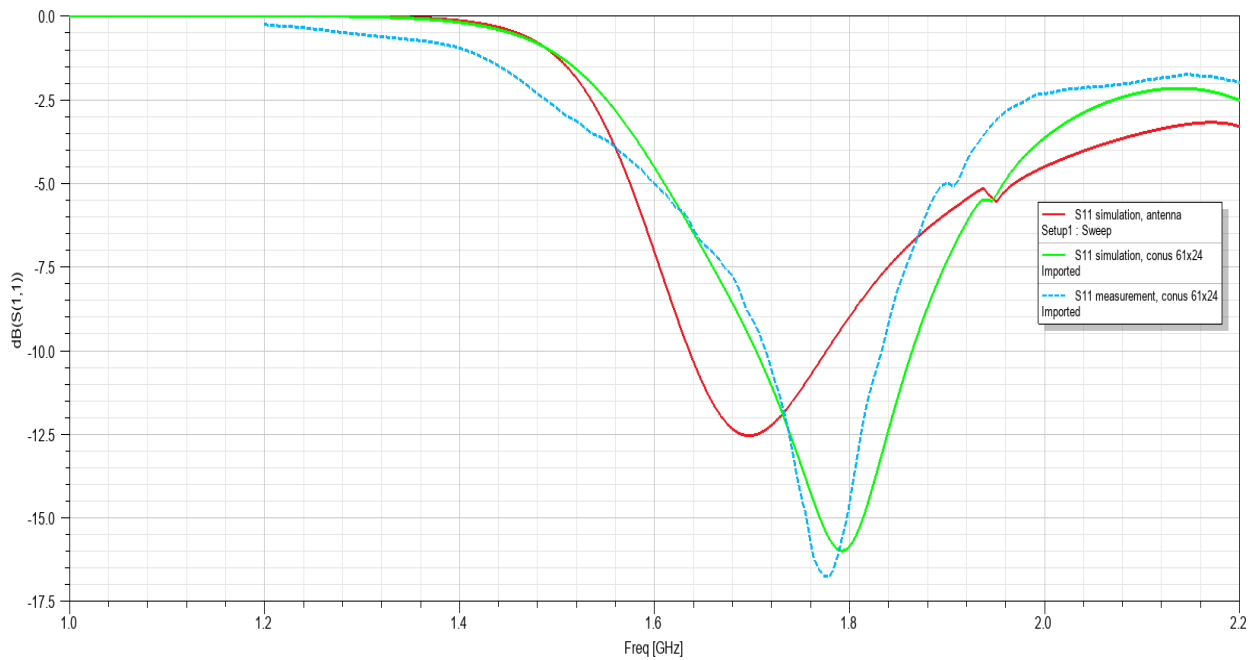
Radijus [mm]	0	61	61	90	90	120	120
Visina [mm]	0	54	94	26	54	34	54
Rezonantna Frekvencija [GHz]	1.6944	1.7296	1.7680	1.7584	1.7104	1.7488	1.7248
Parametar $S_{11}$ [dB]	-12.5470	-21.6457	-34.2992	-21.7374	-36.8929	-19.0487	-27.0977
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	0	631.252	1098.847	661.619	1374.132	1538.123	2442.902

## 5.2. Analiza rezultata simulacija i mjerenja parametra $S_{11}$ konusa i valjka

Da bi istraživanje imalo smisla, simulirane vrijednosti koeficijenta refleksije  $S_{11}$ , moraju biti potvrđene laboratorijskim mjerenjima. Ono što se mjerilo je  $S_{11}$  parametar za pojedine dimenzije dielektričnog plašta na anteni. Laboratorijska mjerenja  $S_{11}$  parametra su vršena za dielektrični plašt u obliku konusa radijusa 61 mm i visine 24 mm, te za dielektrični plašt u obliku valjka radijusa 61 mm i visine 54 mm.

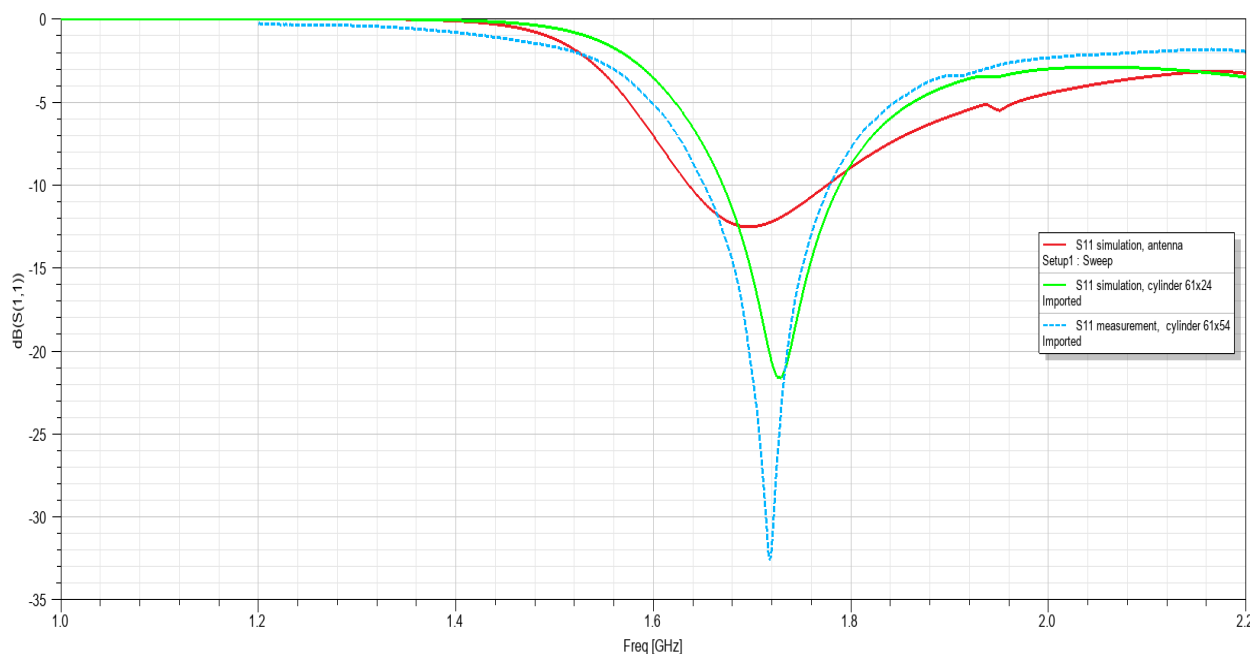
Slika 5.3. prikazuje simulirane i mjerene rezultate promjene  $S_{11}$  parametra antene s dielektrikom konusnog oblika. Krivulje označene punom linijom predstavljaju simulirane rezultate, dok isprekidana krivulja predstavlja izmjerene rezultate  $S_{11}$  parametra. Izmjerene krivulje pokazuju mali pomak prema nižim frekvencijama, što se može potvrditi time da je rezonantna frekvencija pri mjerenju iznosila 1,7760 GHz, dok je kod simulacije iznosila 1,7920 GHz. Pri mjerenju, vrijednost  $S_{11}$  parametra iznosila je -16,7532 dB, dok je kod simulacije iznosila -15,9906 dB, što ukazuje na to da je izmjerena vrijednost niža. Unatoč navedenim razlikama između simuliranih i izmjerenih vrijednosti može se reći da se krivulje koeficijenta refleksije podudaraju. Ovaj pomak može se objasniti činjenicom da simulirani modeli ne uzimaju u obzir brojne čimbenike prisutne u mjerenim modelima u laboratoriju. Na izmjerene rezultate utječu kalibracija mjernog uređaja, uvjeti u kojima se mjerenje izvodi, pogreška mjernog modela i slično. Kada se usporede simulirane vrijednosti antene bez plašta (crvena krivulja) i s plaštem (zelena krivulja), uočava se povećanje rezonantne frekvencije i smanjenje vrijednosti  $S_{11}$  parametra dodavanjem dielektričnog plašta

konusnog oblika. Taj porast rezonantne frekvencije i pad  $S_{11}$  parametra kod simulacije potvrđuje i mjerenje.



Slika 5.3. Analiza koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za antenu bez dielektričnog plašta i s dielektričnim plaštem od drveta u obliku konusa dimenzija 61 x 24 mm (simulacija i mjerenje)

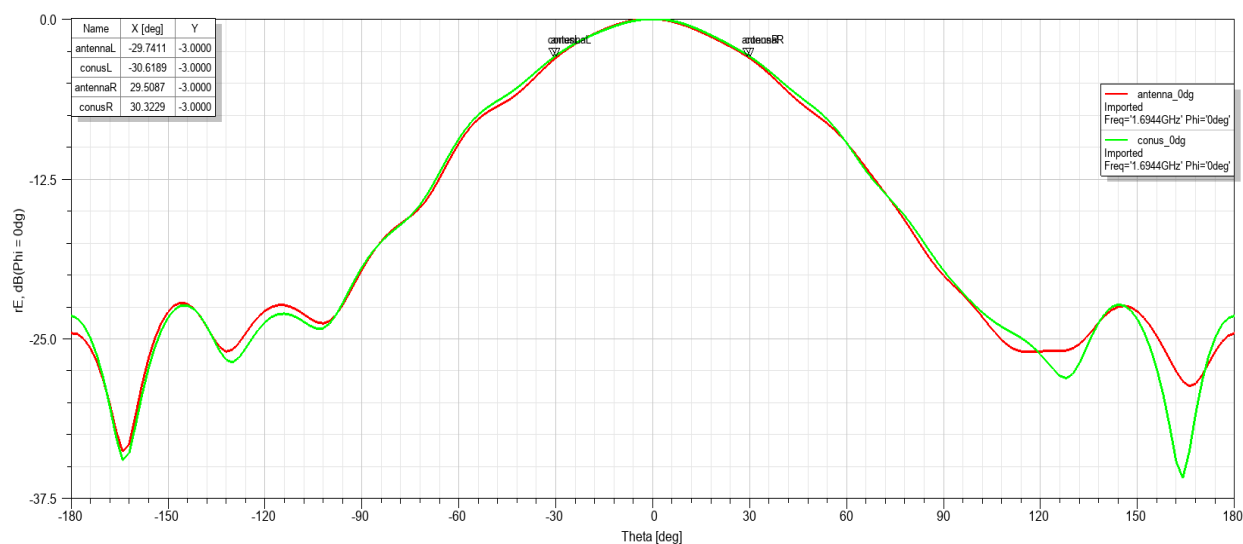
Slika 5.4. prikazuje rezultate mjerenja i simulacije  $S_{11}$  parametra antene s dielektričnim plaštem valjkastog oblika. Slično slici 5.3. s konusom, uočava se da je pri mjerenju rezonantna frekvencija antene s plaštem niža nego kod simulacije. Izmjerena vrijednost  $S_{11}$  parametra antene pri rezonantnoj frekvenciji iznosi -32,5759 dB, dok je kod simulacije -21,6457 dB, što ukazuje na značajniji odstupanja nego kod konusa. Slično slici 5.3., iako postoje razlike između simuliranih i izmjerenih krivulja one se dalje podudaraju. Razlike izmjerenih vrijednosti mogu biti uvjetovane raznim čimbenicima koji mogu biti prisutni. Kada se usporede simulacije antene bez plašta i antene s plaštem, uočava se rast rezonantne frekvencije i pad  $S_{11}$  parametra kao kod konusa, što je dodatno potvrđeno mjerenjem.



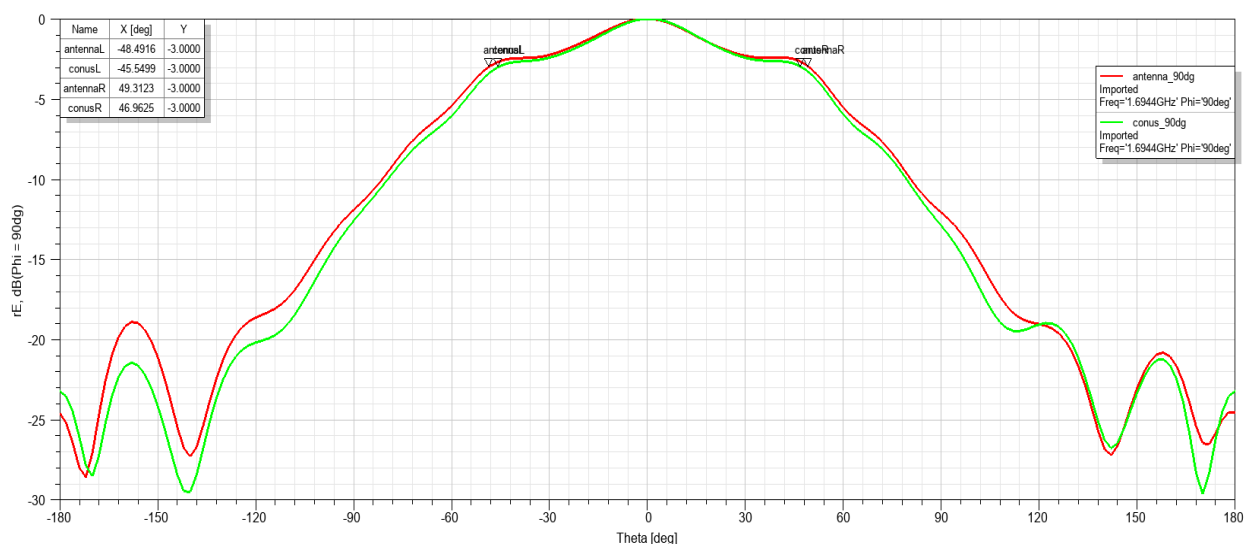
Slika 5.4. Analiza koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za antenu dielektričnog plašta i s dielektričnim plaštem od drveta u obliku valjka dimenzija 61 x 54 mm (simulacija i mjerenje)

### 5.3. Dijagram zračenja antene

Slika 5.5. i 5.6. prikazuju simulirane rezultate dijagrama zračenja antene bez i s dielektričnim plaštem u obliku konusa za različite orijentacije ( $0^\circ$  i  $90^\circ$ ). Crvena krivulja označava dijagram zračenja antene bez plašta, dok zelena krivulja označava dijagram zračenja antene sa plaštem oblika konusa. Dijagram zračenja izražen je u decibelima (dB) i prikazuje se u ovisnosti o kutu theta ( $\theta$ ).

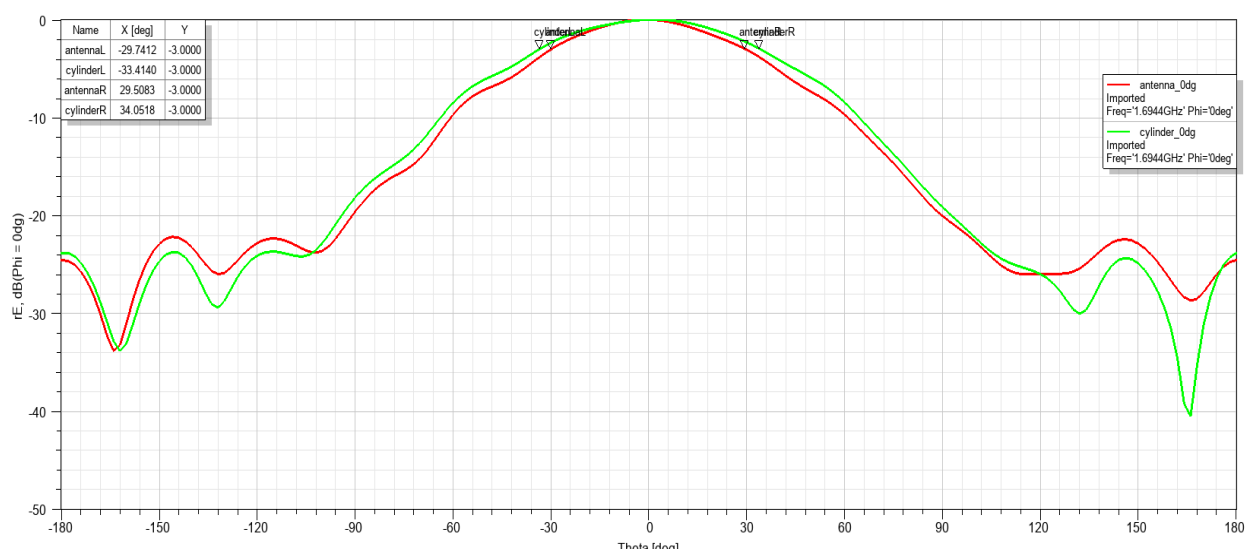


Slika 5.5. Analiza rezultata simulacija dijagrama zračenja za antenu bez dielektričnog plašta i s dielektričnim plaštem od drveta u obliku konusa dimenzija 61 x 24 mm za phi 0°



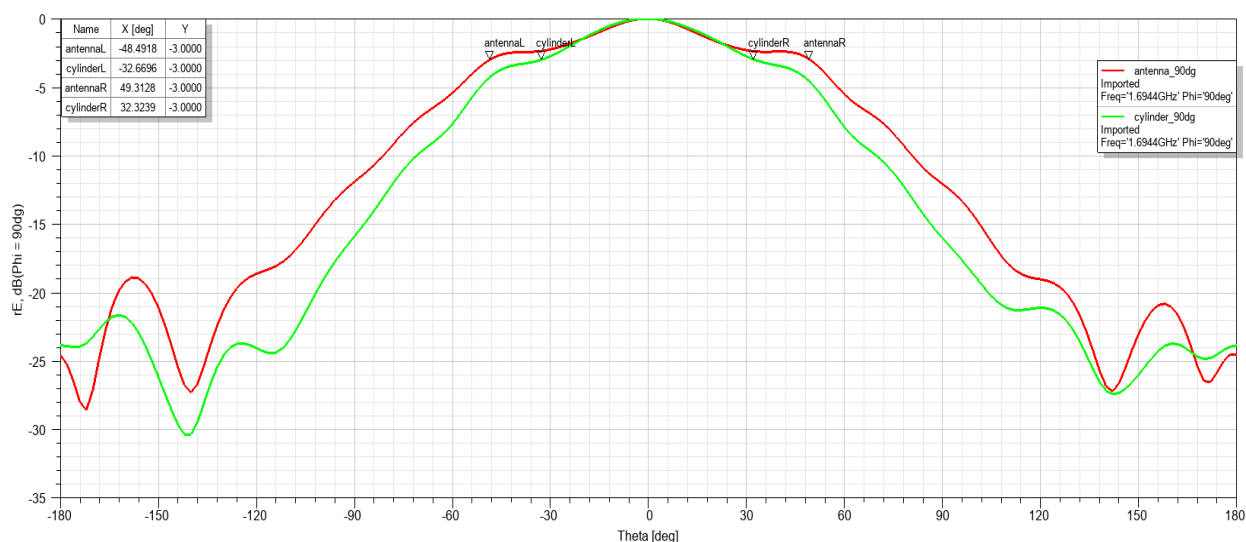
Slika 5.6. Analiza rezultata simulacija dijagrama zračenja za antenu bez dielektričnog plašta i s dielektričnim plaštem od drveta u obliku konusa dimenzija 61 x 24 mm za phi 90°

Slika 5.7. i 5.8. prikazuju simulirane rezultate dijagrama zračenja antene bez i s dielektričnim plaštem u obliku valjka za različite orijentacije (0° i 90°). Crvena krivulja označava dijagram zračenja antene bez plašta, dok zelena krivulja označava dijagram zračenja antene sa plaštem oblika valjka. Dijagram zračenja izražen je u decibelima (dB) i prikazuje se u ovisnosti o kutu theta ( $\theta$ ).



Slika 5.7. Analiza rezultata simulacija dijagrama zračenja za antenu bez dielektričnog plašta i s dielektričnim plaštem od drveta u obliku valjka dimenzija 61 x 54 mm za phi 0°





Slika 5.8. Analiza rezultata simulacija dijagrama zračenja za antenu bez dielektričnog plašta i s dielektričnim plaštem od drveta u obliku valjka dimenzija 61 x 54 mm za phi 0°

Tablica 5.3. prikazuje povezanost širine dijagrama zračenja s antenom bez plašta i sa plaštom. Dodavanje dielektričnog plašta na antenu značajno utječe na širinu snopa dijagrama zračenja, što rezultira promjenom usmjerenosti antene. Pri usporedbi antene bez plašta s antenama koje imaju plašt u obliku konusa i valjka, vidljivo je da dodavanje plašta općenito sužava širinu snopa, osobito pri kutu  $\theta = 90^\circ$ . Na  $\theta = 0^\circ$ , konusni plašt gotovo da ne mijenja širinu snopa u usporedbi s antenom bez plašta, dok valjkasti plašt blago širi snop. Međutim, pri  $\theta = 90^\circ$ , oba plašta sužavaju dijagram zračenja, pri čemu valjkasti plašt ima značajniji učinak. Ova promjena sugerira povećanu usmjerenost antene, što znači da je energija antene bolje usmjerena u određenom smjeru, što može poboljšati prijenos signala i smanjiti gubitke energije. Na temelju rezultata, može se zaključiti da dodavanje dielektričnog plašta, smanjuje širinu snopa, povećava usmjerenost antene i time potencijalno poboljšava njenu učinkovitost. Analizirani su dijagrami zračenja samo za jedan tip plašta (konusni i valjkasti) jer su oni dovoljno reprezentativni za prikazivanje utjecaja dielektričnog plašta na dijagram zračenja antene. S obzirom na to da ostali plašteni pokazuju slične trendove, poput smanjenja širine snopa, smanjenja koeficijenta refleksije i promjene usmjerenosti, nema potrebe za dodatnim dijagramima zračenja za sve dimenzije plašta, jer ne bi značajno doprinijeli novim saznanjima.

Tablica 5.3. Širina snopa dijagrama zračenja antene bez dielektričnog plašta i sa plaštem konusnog i valjkastog oblika za  $\phi$   $0^\circ$  i  $90^\circ$  pri  $-3$  dB

Antena	Dimenzije	Phi	Lijeva strana	Desna strana	Širina snopa
Bez plašta	0x0 mm	$0^\circ$	$-29.7411^\circ$	$29.5087^\circ$	$59.2498^\circ$
S konusom	61x24 mm	$0^\circ$	$-30.6189^\circ$	$30.3229^\circ$	$60.9418^\circ$
S valjkom	61x54 mm	$0^\circ$	$-33.4140^\circ$	$34.0518^\circ$	$67.4658^\circ$
Bez plašta	0x0 mm	$90^\circ$	$-48.4916^\circ$	$49.3123^\circ$	$97.8039^\circ$
S konusom	61x24 mm	$90^\circ$	$-45.5499^\circ$	$46.9625^\circ$	$92.5124^\circ$
S valjkom	61x54 mm	$90^\circ$	$-32.6696^\circ$	$32.3239^\circ$	$64.9935^\circ$

Analizom podataka simulacija sa slika 5.3. i 5.4. te njihovom verifikacijom pomoću mjerenja, može se zaključiti da dodavanje dielektričnog plašta značajno utječe na karakteristike antene, posebno na  $S_{11}$  parametar. Ključni analizirani parametar koji utječe na performanse antene je veličina plašta. Veličina plašta utjecala je na antenu tako da je značajno smanjila vrijednost  $S_{11}$  parametra. Niža vrijednost  $S_{11}$  parametra znači da antena ima manji refleksijski gubitak, što poboljšava sposobnost antene da zrači elektromagnetske valove. Povezanost oblika plašta, radijusa i visine također se pokazala važnom za performanse antene. Plašt u obliku konusa pokazao je pozitivan učinak na performanse antene pri povećanju radijusa, jer je došlo do smanjenja vrijednosti  $S_{11}$  parametra. Međutim, povećanje visine konusa negativno je utjecalo na performanse. S druge strane, plašt valjkastog oblika pokazao je suprotan učinak, povećanje visine poboljšalo je performanse antene, dok povećanje radijusa nije imalo značajan utjecaj na  $S_{11}$  parametar. Ovi rezultati ukazuju na to da oblik plašta ima presudan utjecaj na vrijednost koeficijenta refleksije. Najoptimalniji dielektrični plašt je onaj u obliku konusa s radijusom od 120 mm i visinom od 24 mm.

## 6. ZAKLJUČAK

U diplomski radu opisane su različite vrste antena, njihove karakteristike i njihove praktične primjene. Vrsta antene s kojom se radi je otvor antena. Otvor antene se često koriste u zrakoplovima, raketama, vlakovima i slično. U ovom radu se koristi otvor antena napajana valovodom kružnog presjeka i uzemljena na planarnoj podlozi.

Kroz rad su obrađeni parametri antena kao što su polarizacija, dijagram zračenja, ulazna impedancija, S parametri i VSWR. Najvažniji parametri istraživanja bili su S parametri, posebice  $S_{11}$  parametar koji pokazuje koliko snage antena izgubi refleksijom. Vrijednost  $S_{11}$  parametra uvijek je negativna jer je snaga reflektiranog vala uvijek manja od snage upadnog vala.

U radu je proučavan utjecaj dielektričnog plašta izrađenog od drvenog materijala na  $S_{11}$  parametar antene. Istraživanje se fokusiralo na utjecaj geometrijskih parametara plašta na koeficijent refleksije  $S_{11}$ . Geometrijski parametri su širina, visina i oblik plašta. Za određivanje utjecaja geometrijskih parametara, bilo je potrebno izvršiti simulacije koje se kasnije trebaju potvrditi stvarnim mjerenjima.

Za praktičan dio rada koristio se program Ansys HFSS. U programu su prvo izrađeni modeli oblika konusa i valjka različitih dimenzija. Nakon izrađivanje modela izvršene su simulacije. Simulacije su izvršene za antenu bez dielektričnog plašta, antenu s dielektričnim plaštem konusnog oblika i antenu s dielektričnim plaštem valjkastog oblika. Nakon izvršavanja simulacija generirani su rezultati promjene  $S_{11}$  parametra.

Za potvrdu rezultata simulacija, uspoređeni su podaci za antene s konusnim plaštem radijusa 61 mm i visine 24 mm te valjkastim plaštem radijusa 61 mm i visine 54 mm sa stvarnim mjerenjima na istim plaštevima u laboratoriju. Utvrđeno je da su izmjerene i simulirane vrijednosti  $S_{11}$  parametra vrlo slične, čime je potvrđena valjanost simulacija.

Analizom rezultata simulacija može se zaključiti da dodavanje dielektričnog plašta ima značajan utjecaj na karakteristike antene, posebice na smanjenje vrijednosti  $S_{11}$  parametra. Snižavanjem vrijednosti  $S_{11}$  parametra smanjuje se refleksija, što znači da antena bolje prenosi elektromagnetske valove. Analiza je također ukazala na povezanost oblika antene sa njenom širinom i visinom. Zaključuje se da je najoptimalniji dielektrični plašt onaj u obliku konusa širine 120 mm i visine 24 mm.

## LITERATURA

- [1] E. Zentner, "Antene i RADIOSUSTAVI", Millennium, Zagreb, 2001
- [2] The Electrical Engineering Handbook (2005) – Nirod Das, Antennas and Radiation: Antenna Fundamentals
- [3] Antennas - J.D.Kraus, 1997
- [4] Figure 4 - Merve Karakaya, dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Examplesfor-polarization-states-a-linear-polarization-b-circular-polarization-b\\_fig3\\_307546698](https://www.researchgate.net/figure/Examplesfor-polarization-states-a-linear-polarization-b-circular-polarization-b_fig3_307546698), zadnja posjeta: 31.08.2024.
- [5] Antenna Theory - Analysis And Design - C. A. Balanis, 1997
- [6] mmWave Radar Radome Design Guide - Chethan Kumar, Habeeb Ur Rahman Mohammed, Greg Peake , zadnja posjeta 07.09.2024.
- [7] Influence of Dielectric Plate Parameters on the Reflection Coefficient of a Planar Aperture Antenna - Vanja Mandrić, Slavko Rupčić, Snježana Rimac-Drlje and Ismail Baxhaku, zadnja posjeta: 09.09.2024.
- [8] S-Parameters and the Reflection Coefficient - CADENCE PCB SOLUTIONS, dostupno na: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-s-parameters-and-the-reflection-coefficient>, zadnja posjeta: 29.08.2024.
- [9] Antennas and Wave Propagation(2022) – R.L.Yadava, dostupno na: [https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=KYplEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=waveguide+propagation+te+tm+antenna+scientific+work&ots=u9Sc2s8ft&sig=HJGsbzK9IrsG3vKseKk6QBbnrCo&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=true](https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=KYplEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=waveguide+propagation+te+tm+antenna+scientific+work&ots=u9Sc2s8ft&sig=HJGsbzK9IrsG3vKseKk6QBbnrCo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true), zadnja posjeta: 02.09.2024.
- [10] Antennas of Circular Waveguides - Cusacani Guerrero, Julio Agapito, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/335700906\\_Antennas\\_of\\_Circular\\_Waveguides](https://www.researchgate.net/publication/335700906_Antennas_of_Circular_Waveguides), zadnja posjeta: 29.08.2024.
- [11] 370G-1.00/0.6mm/387 Circular Waveguide, dostupno na: <https://www.miwv.com/product/370-series-circular-waveguide-bend-56/>, zadnja posjeta: 29.06.2024.

[12]S. Rupčić „Nizovi kružnih valovodnih antena na sfernim strukturama“, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009, zadnja posjeta: 27.08.2024.

[13]Ansys HFSS, dostupno na: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>, zadnja posjeta: 29.08.2024.

## SAŽETAK

U diplomskom radu opisani su ključni parametri antena kao što su polarizacija, dijagram zračenja, ulazna impedancija, S parametri i VSWR. Od S parametara, najveća važnost je pridodana opisu  $S_{11}$  parametra. Opisana je otvorna antena napajana valovodom kružnog presjeka. Opisani su programi u kojim su izrađivani modeli i simulacije, zvan Ansys HFSS. U praktičnom dijelu rada, korišten je Ansys HFSS program za simulacije antena bez dielektričnog plašta i sa dielektričnim plaštem u obliku konusa i valjka. Izvršene su simulacije za konuse i valjke različitih dimenzija kako bi se utvrdio utjecaj geometrijskih parametara na koeficijent refleksije  $S_{11}$ . Rezultati simulacija uspoređeni su s mjerenjima za dielektrične plaštove oblika konusa i valjka kako bi se utvrdila sličnost i potvrdila valjanost simulacija. Analizirani su rezultati simulacija parametra  $S_{11}$ . Na osnovu analiza zaključeno je kako dodavanje dielektričnog plašta poboljšava karakteristike antena, smanjujući  $S_{11}$  parametar.

Ključne riječi: antena, dielektrični plašt,  $S_{11}$  parametar, konus, valjak, simulacija, mjerenje

## ABSTRACT

The thesis describes key antenna parameters such as polarization, radiation pattern, input impedance, S parameters and VSWR. Of the S parameters, the greatest importance is attached to the description of the  $S_{11}$  parameter. The opening of the antenna fed by a waveguide of circular aperture is described. The program in which the models and simulations were created, called Ansys HFSS, is described. In the practical part of the work, the Ansys HFSS program is used to simulate the antenna without a dielectric plates and with a dielectric plates in the form of a cone and a cylinder. Simulations were performed for cones and cylinders of different dimensions in order to determine the influence of geometrical parameters on the reflection coefficient  $S_{11}$ . The simulation results were compared with measurements for cone-shaped and cylinder-shaped dielectric plates to determine similarity and confirm the validity of the simulation. The results of the simulation of  $S_{11}$  parameter were analyzed. Based on the analysis, it was concluded that the addition of the dielectric jacket improves the characteristics of the antenna, reducing the  $S_{11}$  parameter.

Key words: antenna, dielectric plate,  $S_{11}$  parameter, cone, cylinder, simulation, measurement