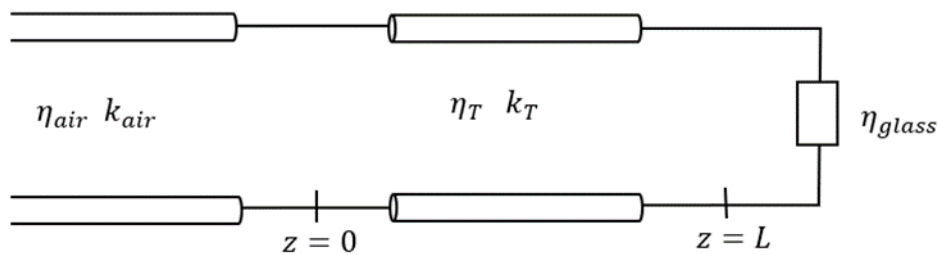


פרויקט MATLAB 3

חלק א'-

(A)

נמדל את הבעיה לקו תמסורת באופן הבא:



נמצא את η_{air} ואת η_{glass} :

$$\eta_{air} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \cdot \pi [\Omega]$$

$$\eta_{glass} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = 120\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{2.25}} = 80 \cdot \pi [\Omega]$$

אנו מתאמים את הקו כך שלא יהיו החזרות אם כן הקו מתפקד כשנאי רבע אורך גל ומתקיים:

$$\eta_T = \sqrt{\eta_{air} \cdot \eta_{glass}} = \sqrt{120 \cdot \pi \cdot 80 \cdot \pi} = 98 \cdot \pi [\Omega]$$

כמו כן מתקיים:

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_T}}$$

מתוך שתי המשוואות לעיל נחלץ את ϵ_T :

$$\epsilon_T = \frac{\mu_0}{\epsilon_0 \eta_T^2} = \left(\frac{120\pi}{98\pi} \right)^2 = 1.5$$

נמצא את d_T מתוך הקשר הבא:

$$d_T = \frac{\lambda_T}{4}$$

לשם כך נמצא את λ_T :

$$f_{min} = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{800 \cdot 10^{-9}} = 3.75 \cdot 10^{14} [Hz]$$

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} = 7.5 \cdot 10^{14} [Hz]$$

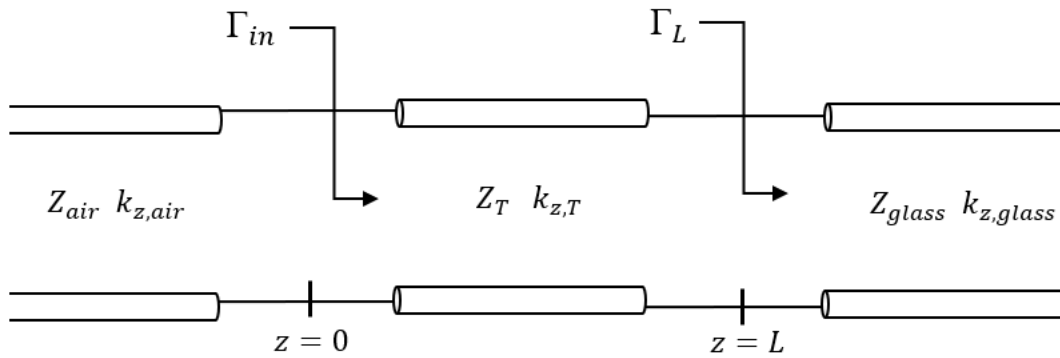
$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} = 5.625 \cdot 10^{14} [Hz] \Rightarrow \lambda_T = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_T \epsilon_0 \mu_0}} = 435 [nm]$$

ולבסוף נקבל:

$$d_T = \frac{\lambda_T}{4} = 108.75 [nm]$$

(B)

מודל קו התמסורת:



אופן החישוב של מקדם ההחזרה הכולל Γ_{in} :

$$\Gamma_{in} = \Gamma_1(z=0) = \frac{Z_{in}(0) - Z_{air}}{Z_{in}(0) + Z_{air}}$$

$$Z_{in}(0) = Z_T(0) = Z_T \frac{1 + \Gamma_L \cdot e^{-2jk_{z,T}L}}{1 - \Gamma_L \cdot e^{-2jk_{z,T}L}}$$

$$k_T = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_T} = 2.564 \cdot 10^{-8} f \quad , \quad k_{z,T} = 2.564 \cdot 10^{-8} f \cdot \cos \theta_T$$

ההבדלים בין קיטוב TE לקיטוב TM נובעים מהשוני באימפדנסים.

בקיטוב TE הביטוי עבור האימפדנס:

$$Z_{TE,i} = \frac{\eta_i}{\cos \theta_i}$$

אז עבור כל אחת מהשכבות:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \cdot \pi = 377 [\Omega]$$

$$Z_{TE,air} = \frac{\eta_{air}}{\cos \theta_{air}} = \frac{\eta_0}{\cos \theta_{air}} = \frac{377}{\cos \theta_{air}} [\Omega]$$

$$Z_{TE,T} = \frac{\eta_T}{\cos \theta_T} = \frac{\eta_0}{\cos \theta_T \sqrt{\epsilon_T}} = \frac{307.615}{\cos \theta_T} [\Omega]$$

$$Z_{TE,glass} = \frac{\eta_{glass}}{\cos \theta_{glass}} = \frac{\eta_0}{\cos \theta_{glass} \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{251.3}{\cos \theta_{glass}} [\Omega]$$

ונקבל את הביטויים עבור מקדמי ההחזרה:

$$\Gamma_{TE,in} = \Gamma(z=0) = \frac{Z_{TE,in}(0) - Z_{TE,air}}{Z_{TE,in}(0) + Z_{TE,air}}$$

$$Z_{TE,in}(0) = Z_{TE,T}(0) = Z_{TE,T} \frac{1 + \Gamma_L \cdot e^{-2jk_{z,T}L}}{1 - \Gamma_L \cdot e^{-2jk_{z,T}L}}$$

$$\Gamma_L = \frac{Z_{TE,glass} - Z_{TE,T}}{Z_{TE,glass} + Z_{TE,T}}$$

בקיטוב TM הביטוי עבור האימפדנס:

$$Z_{TM,i} = \eta_i \cos \theta_i$$

אז עבור כל אחת מהשכבות:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \cdot \pi = 377 [\Omega]$$

$$Z_{TM,air} = \eta_{air} \cos \theta_{air} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{air}}} \cos \theta_{air} = 377 \cos \theta_{air} [\Omega]$$

$$Z_{TM,T} = \eta_T \cos \theta_{air} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_T}} \cos \theta_T = 307.615 \cos \theta_T [\Omega]$$

$$Z_{TM,glass} = \eta_{glass} \cos \theta_{glass} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \cos \theta_{glass} = 251.3 \cos \theta_{glass} [\Omega]$$

ונקבל את הביטויים עבור מקדמי ההחזרה:

$$\Gamma_{TM,in} = \Gamma(z=0) = \frac{Z_{TM,in}(0) - Z_{TM,air}}{Z_{TM,in}(0) + Z_{TM,air}}$$

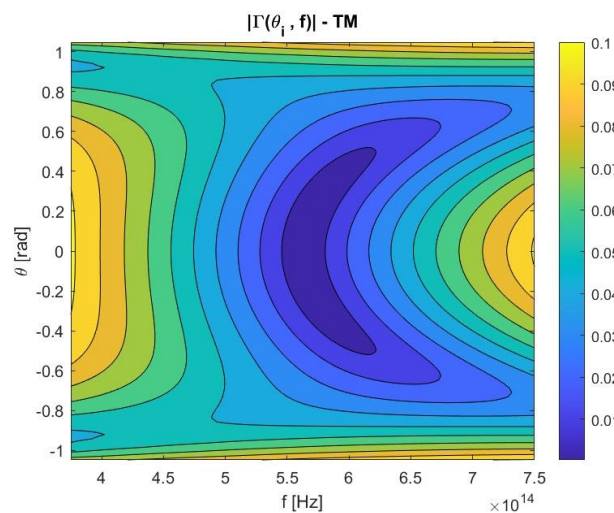
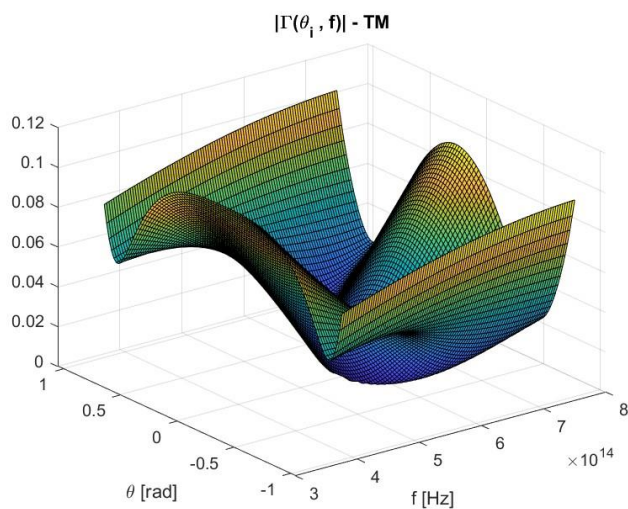
$$Z_{TM,in}(0) = Z_{TM,T}(0) = Z_{TM,T} \frac{1 + \Gamma_L \cdot e^{-2jk_{z,T}L}}{1 - \Gamma_L \cdot e^{-2jk_{z,T}L}}$$

$$\Gamma_L = \frac{Z_{TM,glass} - Z_{TM,T}}{Z_{TM,glass} + Z_{TM,T}}$$

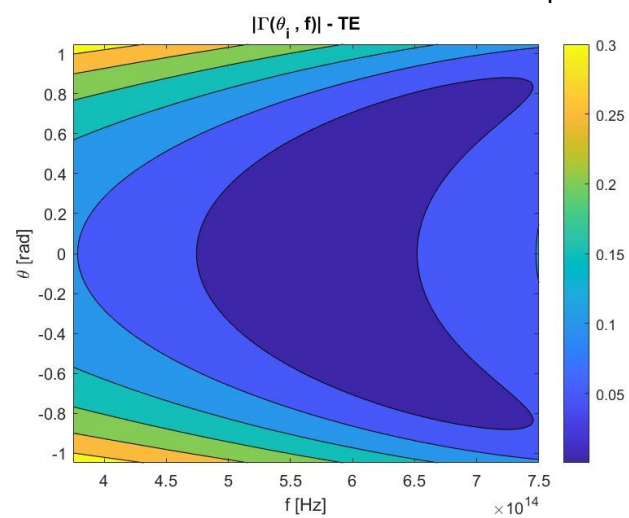
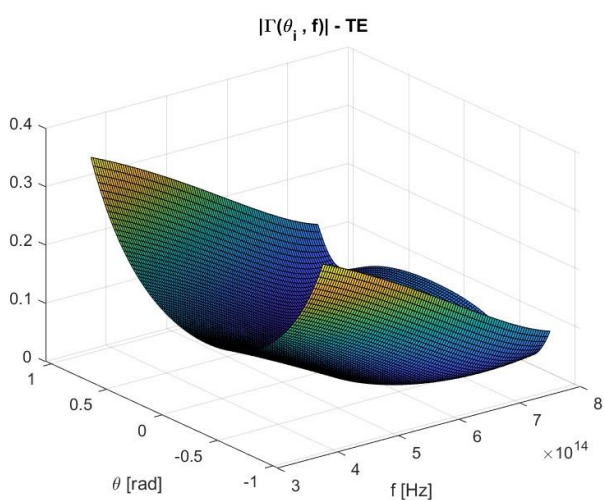
(C) בגרפים הבאים מוצג הערך המוחלט של מקדם ההחזרה:

(1) כפונקציה של התדירות וזווית הפגיעה

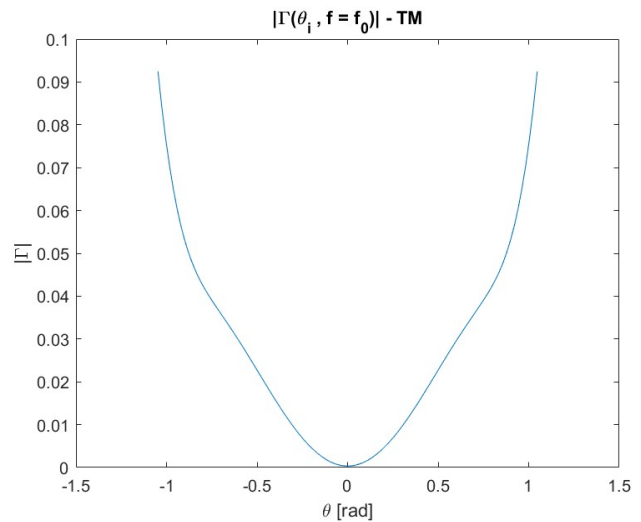
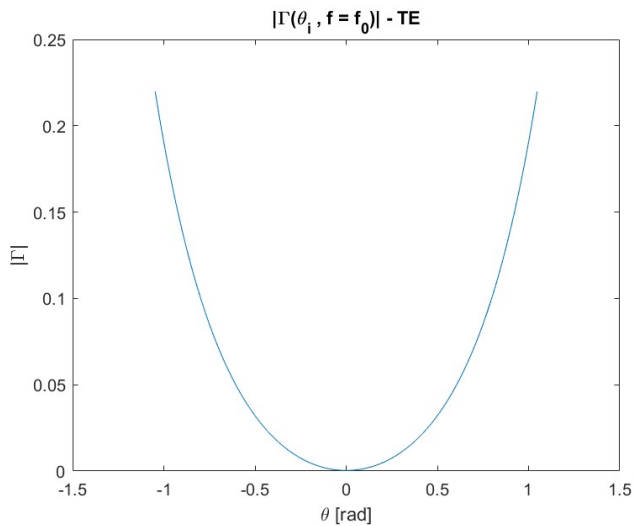
בקיטוב TM:



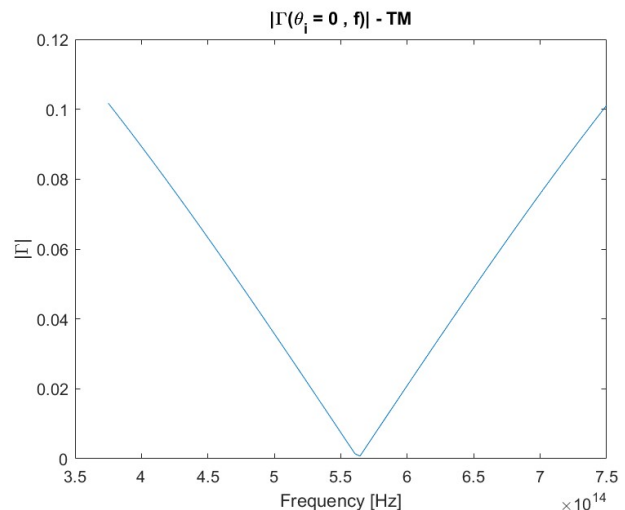
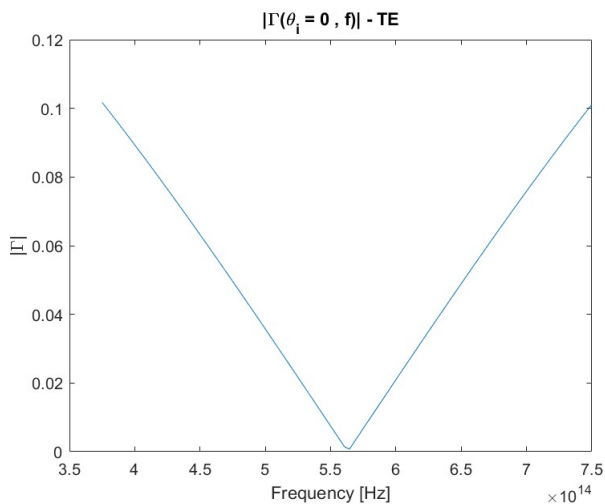
בקיטוב TE:



(2) כפונקציה של זווית הפגיעה עבור התדר המרכזי



(3) בפונקציה של התדירות עבור זווית פגיעה ניצבת



ניתן לראות כי עבור התדר $f_0 = 5.625 \cdot 10^{14}$ [Hz] בזווית $\theta = 0$ [Rad] מקדם ההחזרה הוא $\Gamma_{in} = 0$ כלומר קיימת החזרה אפסית במצב הנ"ל.

תוצאה זו מסתדרת היטב עם העובדה שהזכוכית מתואמת לאוויר באמצעות שכבת רבע אורך גל עבור פגיעה ניצבת בתדר f_0 . כלומר עבור פגיעה ניצבת בתדר זה הגל אינו מוחזר משכבת התיאום ומועבר אליה במלואו.

בתדרים שונים מ f_0 וזוויות גדולות מ 0 מקדם ההחזרה גדל ומתרחשת החזרה.

תחום הזוויות עבורו נבנו הגרפים הוא כאמור $-60^\circ < \theta < 60^\circ$. ניתן לראות כי עבור תחום זוויות זה מקדם ההחזרה אינו מגיע לגודל של 1, כלומר לא מתרחשת בתחום זה החזרה מלאה.

גם עבור קיטוב TE ניתן לראות התנהגות דומה ומתקיים כי עבור התדר $f_0 = 5.625 \cdot 10^{14}$ [Hz] בזווית $\theta = 0$ [Rad] מקדם ההחזרה הוא $\Gamma_{in} = 0$ וקיימת החזרה אפסית במצב הנ"ל. גם בקיטוב TE בתדרים שונים מ f_0 וזוויות גדולות מ 0 מקדם ההחזרה גדל.

נשים לב כי בקיטוב TE ערכו המוחלט של מקדם ההחזרה קטן ביחס לערכו המוחלט של מקדם ההחזרה בקיטוב TM. הסיבה לכך יכולה להיות טמונה בתלות של Γ_{in} באימפדנסים Z_{glass}, Z_T, Z_{air} ו- $Z_{in}(0)$ ובשוני של גדלי האימפדנסים בין הקיטובים.

חלק ב'-

(D)

עבור $N=i$, $i=2,3,4$ נחשב את הערכים הבאים:

$$\eta_{glass} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = 251 [\Omega]$$

$$\eta_{T_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r_i}}} [\Omega]$$

עבור $f_0 = 5.625 \cdot 10^{14} [Hz]$:

$$k_{z,i} = k_i \cdot \cos \theta_i = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_{r_i}} \cdot \cos \theta_i$$

$$\lambda_{z,i} = \frac{2\pi}{k_{z,i}}$$

$$Z_{TE,i} = \frac{\eta_i}{\cos \theta_i}$$

$$Z_{TM,i} = \eta_i \cos \theta_i$$

נחשב את הזווית θ_{Ni} מתוך חוק סנל:

$$\theta_{i+1} = \sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_{i+1}} \sin \theta_i \right)$$

$$n_i = \sqrt{\epsilon_{r_i} \mu_{r_i}}$$

מקדם ההחזרה לאוויר נתון על ידי הביטוי:

$$\Gamma_{in} = \Gamma(z=0) = \frac{Z_{in}(0) - Z_{air}}{Z_{in}(0) + Z_{air}}$$

כאשר במקרה הנתון מתקיים לכל שכבה:

$$Z_{in}(0) = Z_i \frac{Z_{in}(d_i) + jZ_i \cdot \tan(k_{i,z} \cdot d_i)}{Z_i + jZ_{in}(d_i) \cdot \tan(k_{i,z} \cdot d_i)}$$

לא נניח תיאום משום שהתיאום שחושב בסעיף 1 היה ספציפי עבור פגיעה ניצבת בתדר f_0 , אך כאשר הפגיעה אינה ניצבת אורך הגל שתלוי ב $k_{z,i}$ תלוי בזווית הכניסה והתיאום אינו תקף לכל הזוויות השונות מ 0.

נחשב את אורכי השכבות.

עבור $N=2$:

$$\eta_{glass} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = 251 [\Omega]$$

$$\eta_{T1} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,1}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.257}} = 336.25 [\Omega]$$

$$\eta_{T2} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,2}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.773}} = 283 [\Omega]$$

עבור $f_0 = 5.625 \cdot 10^{14} [Hz]$ ובפגיעה ניצבת:

$$k_{T1} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_{r1}} = 1.32 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T1} = \frac{2\pi}{k_{T1}} = 476 [nm]$$

$$d_{T1} = \frac{\lambda_{T1}}{4} = 119 [nm], \text{ ולכן,}$$

$$k_{T2} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_{r2}} = 1.57 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T2} = \frac{2\pi}{k_{T2}} = 400 [nm]$$

$$d_{T2} = \frac{\lambda_{T2}}{4} = 100 [nm], \text{ ולכן,}$$

עבור $N=3$:

$$\eta_{glass} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = 251 [\Omega]$$

$$\eta_{T1} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,1}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.131}} = 354.5 [\Omega]$$

$$\eta_{T2} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,2}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.493}} = 308.5 [\Omega]$$

$$\eta_{T3} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,3}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.970}} = 268.6 [\Omega]$$

עבור $f_0 = 5.625 \cdot 10^{14}$ ובפגיעה ניצבת:

$$k_{T1} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_{r1}} = 1.25 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T1} = \frac{2\pi}{k_{T1}} = 502.65 \text{ [nm]}$$

$$.d_{T1} = \frac{\lambda_{T1}}{4} = 125.6 \text{ [nm]}, \text{ ולכן,}$$

$$k_{T2} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_{r2}} = 1.44 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T2} = \frac{2\pi}{k_{T2}} = 436 \text{ [nm]}$$

$$.d_{T2} = \frac{\lambda_{T2}}{4} = 109 \text{ [nm]}, \text{ ולכן,}$$

$$k_{T3} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_{r3}} = 1.65 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T3} = \frac{2\pi}{k_{T3}} = 380 \text{ [nm]}$$

$$.d_{T3} = \frac{\lambda_{T3}}{4} = 95 \text{ [nm]}, \text{ ולכן,}$$

עבור N=4:

$$\eta_{glass} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = 251 \text{ [\Omega]}$$

$$\eta_{T1} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,1}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.0682}} = 364.75 \text{ [\Omega]}$$

$$\eta_{T2} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,2}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.301}} = 330.5 \text{ [\Omega]}$$

$$\eta_{T3} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,3}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1.710}} = 288 \text{ [\Omega]}$$

$$\eta_{T4} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r,4}}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{2.085}} = 261 \text{ [\Omega]}$$

עבור $f_0 = 5.625 \cdot 10^{14}$ ובפגיעה ניצבת:

$$k_{T1} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\epsilon_{r1}} = 1.21 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T1} = \frac{2\pi}{k_{T1}} = 516 \text{ [nm]}$$

$$.d_{T1} = \frac{\lambda_{T1}}{4} = 129 \text{ [nm]} \text{ , ולכן ,}$$

$$k_{T2} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\varepsilon_{r2}} = 1.34 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T2} = \frac{2\pi}{k_{T2}} = 467 \text{ [nm]}$$

$$.d_{T2} = \frac{\lambda_{T2}}{4} = 117 \text{ [nm]} \text{ , ולכן ,}$$

$$k_{T3} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\varepsilon_{r3}} = 1.54 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T3} = \frac{2\pi}{k_{T3}} = 407 \text{ [nm]}$$

$$.d_{T3} = \frac{\lambda_{T3}}{4} = 102 \text{ [nm]} \text{ , ולכן ,}$$

$$k_{T4} = \frac{2\pi f_0}{c} \sqrt{\varepsilon_{r4}} = 1.7 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{T4} = \frac{2\pi}{k_{T4}} = 369 \text{ [nm]}$$

$$.d_{T4} = \frac{\lambda_{T4}}{4} = 92 \text{ [nm]} \text{ , ולכן ,}$$

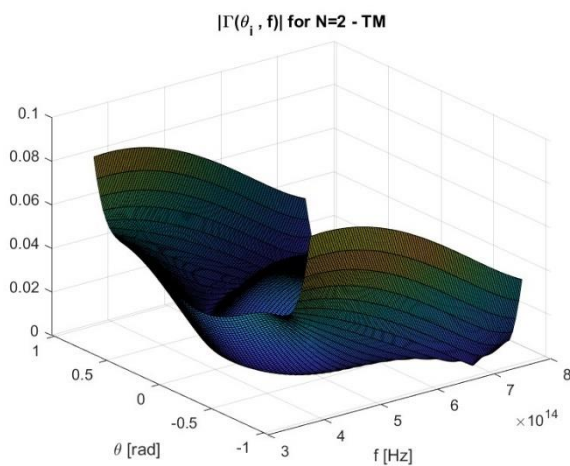
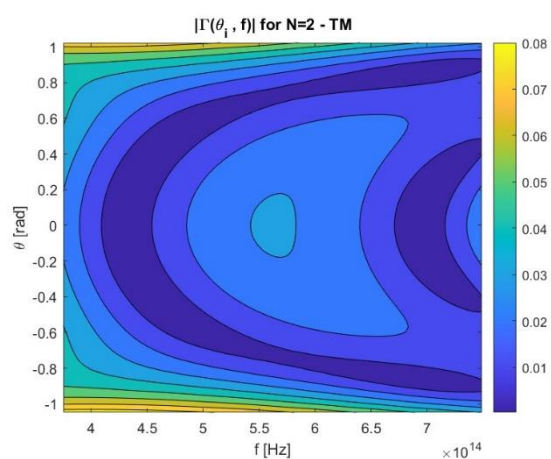
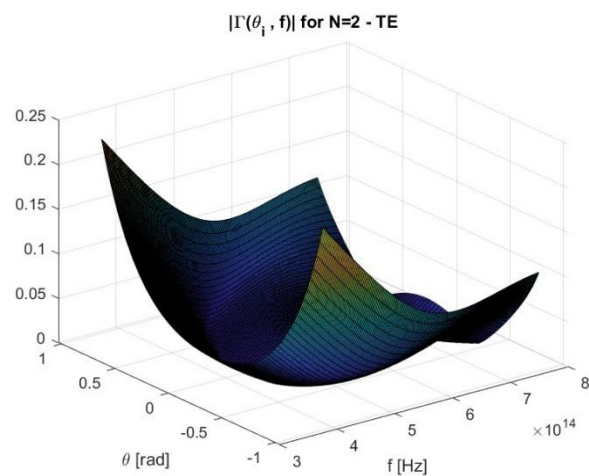
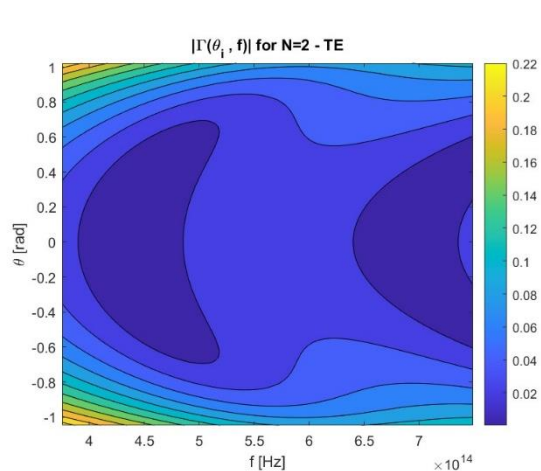
סה"כ:

N	d_{T1}	d_{T2}	d_{T3}	d_{T4}
2	119 [nm]	100 [nm]	-	-
3	125.6 [nm]	109 [nm]	95 [nm]	-
4	129 [nm]	117 [nm]	102 [nm]	92 [nm]

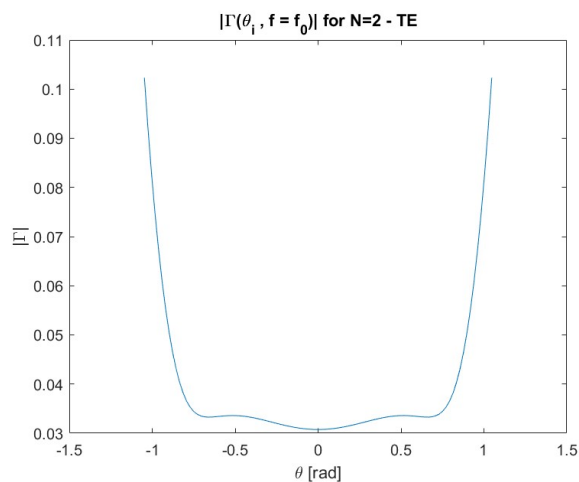
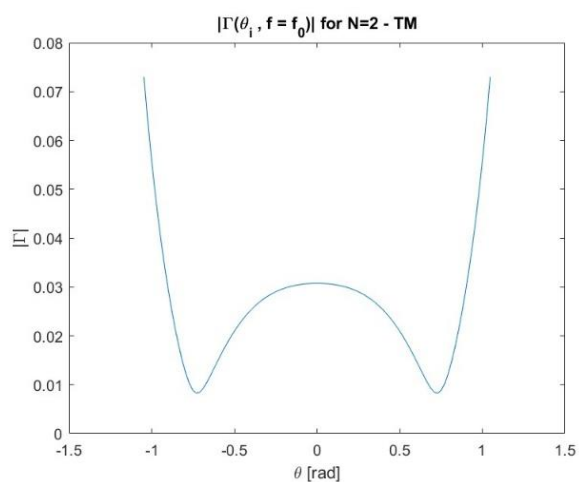
כעת נחזור על סעיף C עבור מערכת בעלת N שכבות.

עבור $N=2$:

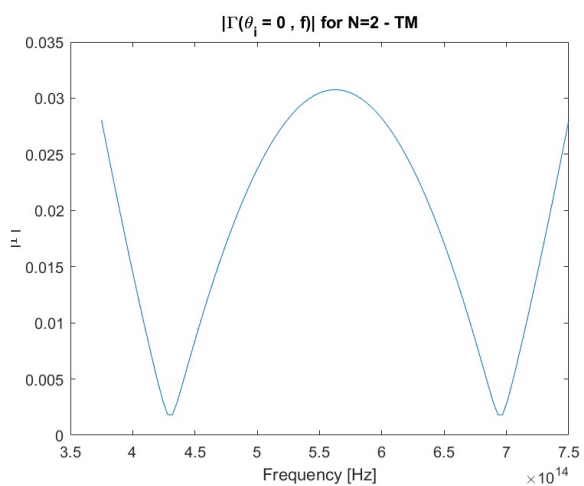
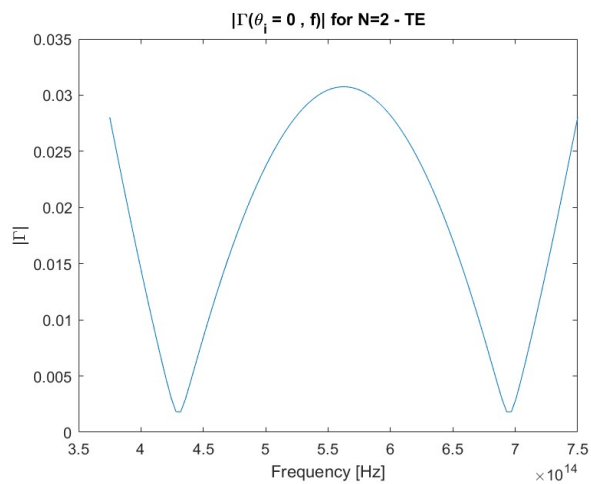
(1) מקדם ההחזרה כפונקציה של התדירות וזווית הפגיעה



(2) כפונקציה של זווית הפגיעה עבור התדר המרכזי

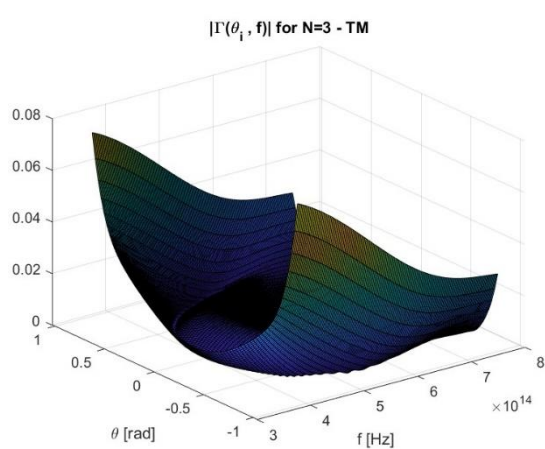
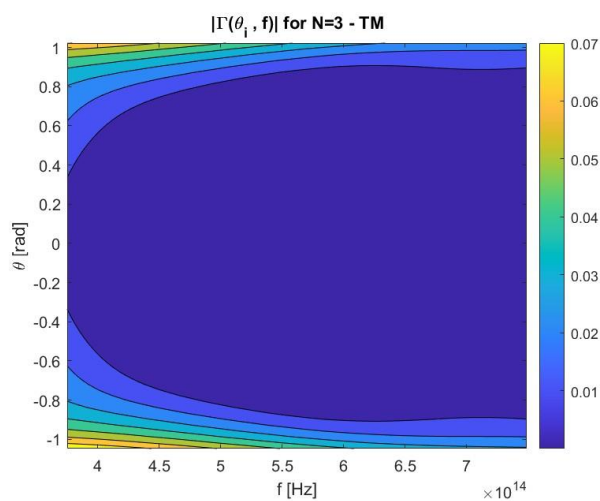
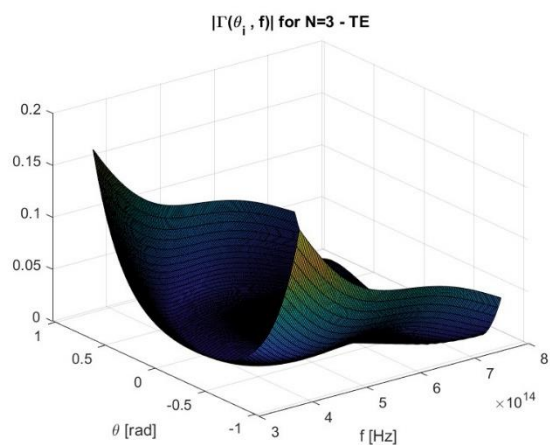
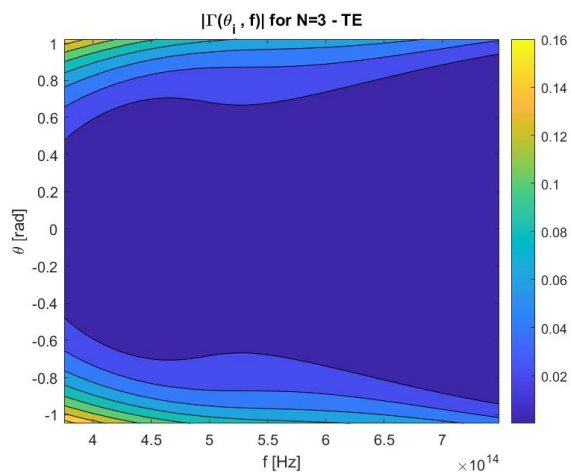


(3) בפונקציה של התדירות עבור זווית פגיעה ניצבת

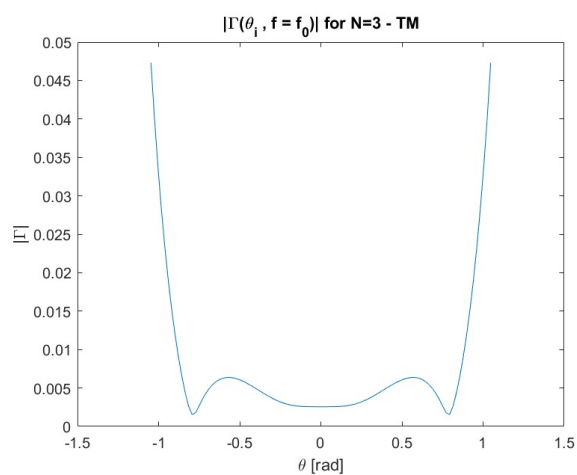
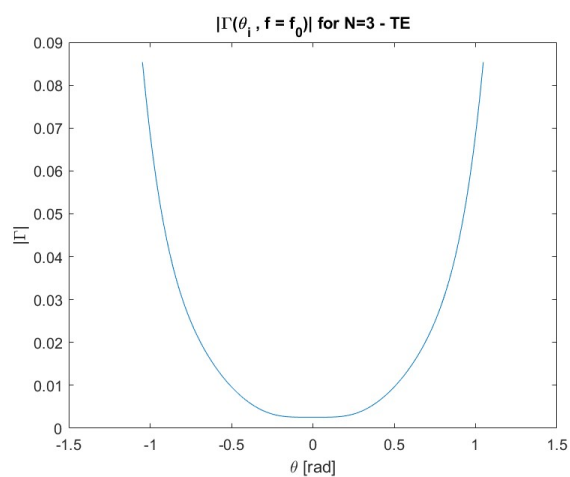


עבור N=3:

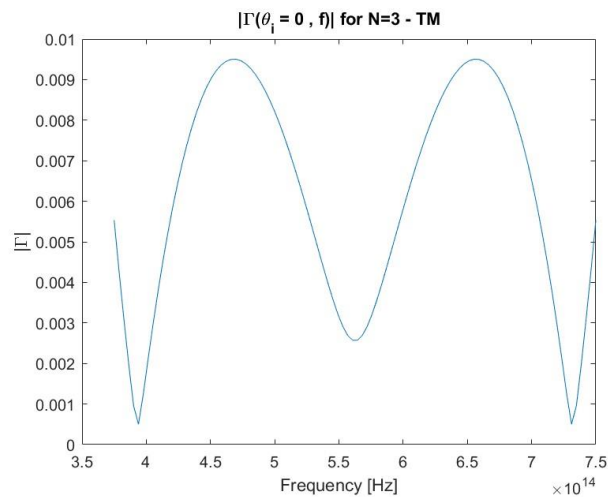
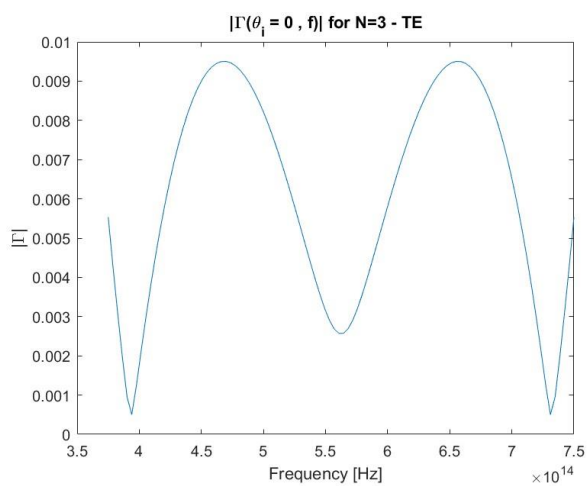
(1) מקדם ההחזרה בפונקציה של התדירות וזווית הפגיעה



(2) כפונקציה של זווית הפגיעה עבור התדר המרכזי

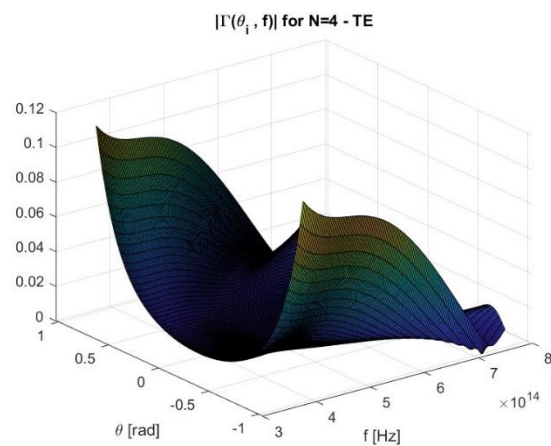
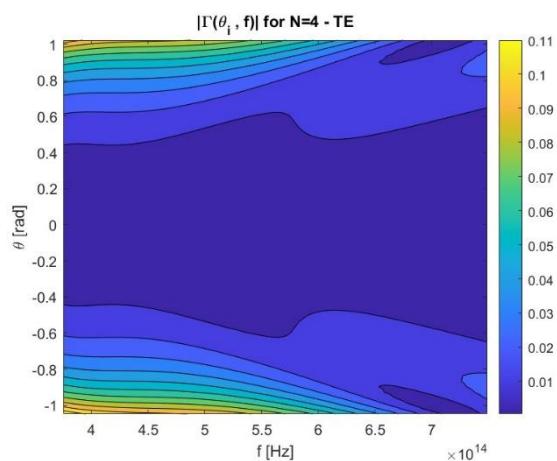


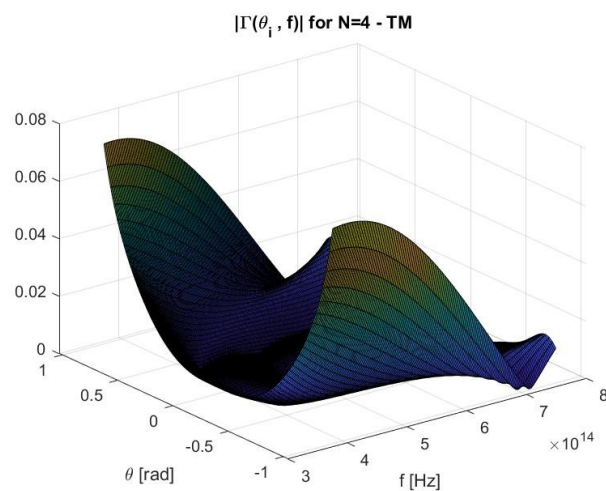
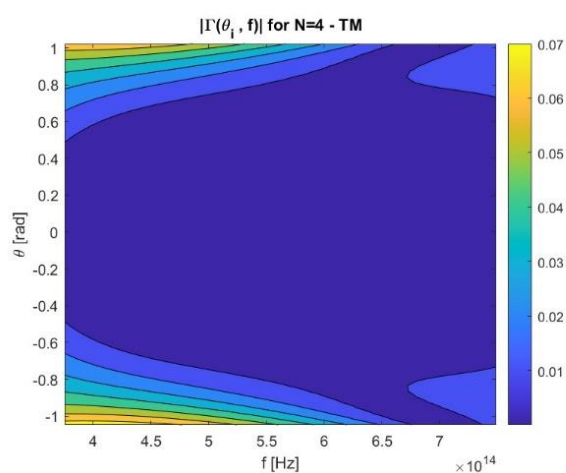
(3) כפונקציה של התדירות עבור זווית פגיעה ניצבת



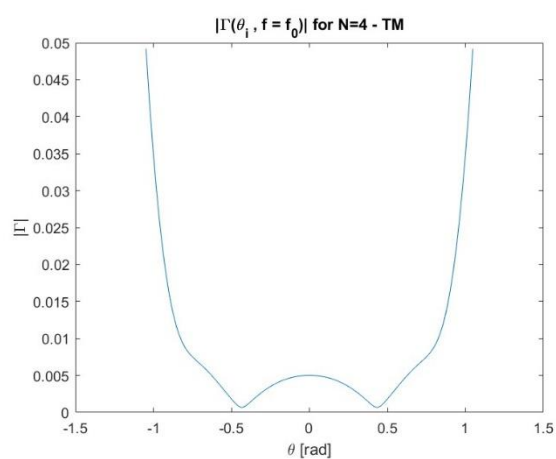
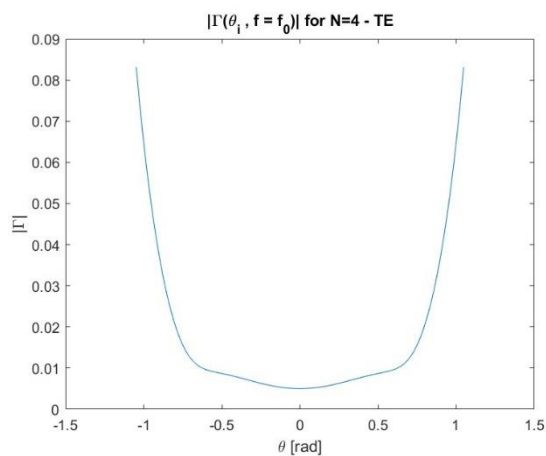
עבור N=4:

(1) מקדם ההחזרה כפונקציה של התדירות וזווית הפגיעה

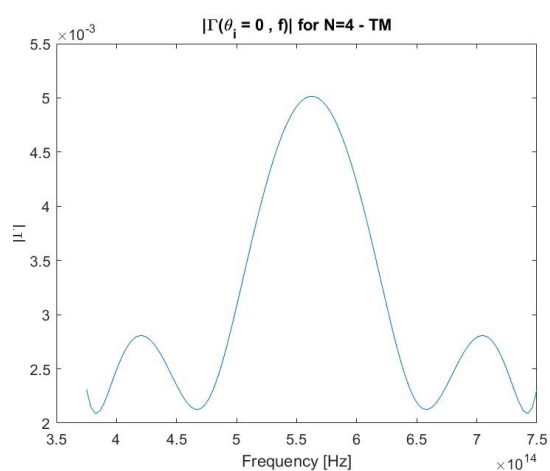
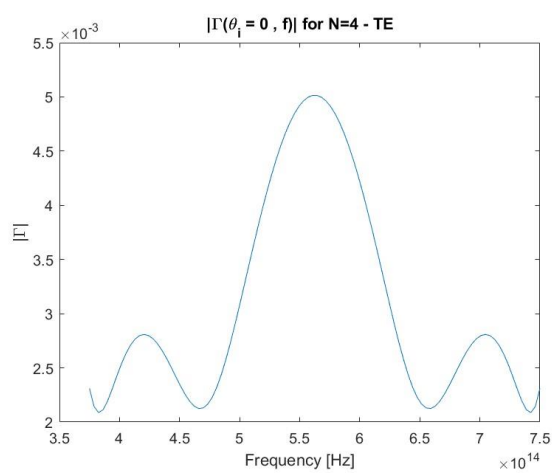




(2) בפונקציה של זווית הפגיעה עבור התדר המרכזי



(3) בפונקציה של התדירות עבור זווית פגיעה ניצבת



בטבלה הבאה מוצגים בקירוב הערכים המקסימליים שמקדם ההחזרה מקבל עבור הקיטובים השונים ומספר שונה של שכבות:

N	1	2	3	4
TE	0.3	0.22	0.16	0.11
TM	0.1	0.08	0.07	0.07

מהשוואה בין המערכות השונות, ניתן לראות כי הערך המקסימלי שמקדם ההחזרה מקבל קטן ככל שיש יותר שכבות.

בנוסף, ניתן לראות מגמה שכל שיש יותר שכבות, רוחב הסרט עבורו מתקבל מקדם החזרה אפסי גדל. נשים לב כי עבור פגיעה ניצבת מתקבלים גרפים זהים עבור הקיטובים השונים. מתקיים עבור זווית פגיעה אפס:

$$Z_{TE,i} = \frac{\eta_i}{\cos \theta} = \eta_i \cos \theta = Z_{TM,i}$$

ואין הבדל בין הקיטובים.

Appendix

קוד של סעיף C:

```
%part C

f1 = 3.75*10^14;
f2 = 7.5*10^14;
f0 = 5.625*10^14;
f = linspace(f1,f2,100);
teta = linspace(-pi/3,pi/3,100);
[f_i,teta_i] = meshgrid(f,teta);

dT = 108.75*10^(-9);
V_c = 3*10^8;

%define epsilon
epsilon_r_glass = 2.25; %relative coefficient of glass layer
epsilon_T = 1.5; %relative coefficient of T layer

%define etta
eta_air = 120*pi;
eta_glass = eta_air/sqrt(epsilon_r_glass);
eta_T = sqrt(eta_air*eta_glass);

%define theta
teta_T = asin ((1/sqrt(epsilon_T)).*sin(teta_i)); %snell law
teta_glass = asin ((sqrt(epsilon_T/epsilon_r_glass)).*sin(teta_T)); %snell law

%define Z
Zte_air = eta_air./cos(teta_i);
Ztm_air = eta_air.*cos(teta_i);
Zte_glass = eta_glass./cos(teta_glass);
Ztm_glass = eta_glass.*cos(teta_glass);
Zte_T = eta_T./cos(teta_T);
Ztm_T = eta_T.*cos(teta_T);

%define parameters gamma_L + Kz_T + gamma_in
gama_L_te = (Zte_glass-Zte_T)./(Zte_glass+Zte_T);
gama_L_tm = (Ztm_glass-Ztm_T)./(Ztm_glass+Ztm_T);
Kz_T = ((2*pi.*f_i)./V_c)*sqrt(epsilon_T).*cos(teta_T);
Zte_in = Zte_T.*((1+gama_L_te.*exp(-2.*(1i).*Kz_T.*dT))./(1-gama_L_te.*exp(-2.*(1i).*Kz_T.*dT)));
Ztm_in = Ztm_T.*((1+gama_L_tm.*exp(-2.*(1i).*Kz_T.*dT))./(1-gama_L_tm.*exp(-2.*(1i).*Kz_T.*dT)));
gama_in_te = (Zte_in - Zte_air)./(Zte_in + Zte_air);
gama_in_tm = (Ztm_in - Ztm_air)./(Ztm_in + Ztm_air);
```

```

%plot the ABS of the reflection coefficient TE
figure(1);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_te));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) - TE");
figure(2);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_te));
colorbar;
title("\Gamma(\theta_i , f) - TE");
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");

% plot the ABS of the reflection coefficient for TM
figure(3);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_tm));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) - TM");
figure(4);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_tm));
colorbar;
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) - TM");

%define f and teta
f0 = 5.625*10^14;
teta_i = linspace(-pi/3,pi/3,100);
|
% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of theta_i for f=f0
figure(5);
plot(teta_i,abs(gama_in_te));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i , f = f_0) - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of theta_i for f=f0
figure(6);
plot(teta_i,abs(gama_in_tm));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i , f = f_0) - TM");

f_i = linspace(f1,f2,100);
teta_i = 0;
|
% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of f for theta_i = 0
figure(7);
plot(f_i,abs(gama_in_te));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i = 0 , f) - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of f for theta_i = 0
figure(8);
plot(f_i,abs(gama_in_tm));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i = 0 , f) - TM");

```


קוד של סעיף ד:

```

%part D1, N=2

%define f and teta
f1 = 3.75*10^14;
f2 = 7.5*10^14;
f0 = 5.625*10^14;
f = f1:0.2*10^13:f2;
teta = -(pi/3):0.03:pi/3;
[f_i,teta_i] = meshgrid(f,teta);
V_c = 3*10^8;

epsilon_1 = 1.257;
epsilon_2=1.773;
epsilon_glass=2.25;

%define the thetas in the layers
theta_1 = asin ((1/sqrt(epsilon_1)).*sin(teta_i));
theta_2 = asin ((1/sqrt(epsilon_2)).*sin(teta_i));
theta_glass = asin ((1/sqrt(epsilon_glass)).*sin(teta_i));

%define K_T
K_T1 = ((2*pi.*f0)./V_c)*sqrt(epsilon_1);
K_T2 = ((2*pi.*f0)./V_c)*sqrt(epsilon_2);

%define new Kz
Kz_1 = ((2*pi.*f_i)./V_c)*sqrt(epsilon_1).*cos(theta_1);
Kz_2 = ((2*pi.*f_i)./V_c)*sqrt(epsilon_2).*cos(theta_2);
Kz_glass = ((2*pi*f_i)/V_c)*sqrt(epsilon_glass).*cos(theta_glass);

%define etta
eta_air = 120*pi;
eta_glass = eta_air/sqrt(epsilon_glass);
eta_T1 = eta_air/sqrt(epsilon_1);
eta_T2 = eta_air/sqrt(epsilon_2);

%define Z
Zte_air = eta_air./cos(teta_i);
Ztm_air = eta_air.*cos(teta_i);
Zte_glass = eta_glass./cos(theta_glass);
Ztm_glass = eta_glass.*cos(theta_glass);
Zte_T1 = eta_T1./cos(theta_1);
Ztm_T1 = eta_T1.*cos(theta_1);
Zte_T2 = eta_T2./cos(theta_2);
Ztm_T2 = eta_T2.*cos(theta_2);

%define dT
dT_1=0.5*pi./K_T1;
dT_2=0.5*pi./K_T2;

%define Zin_0 in line of line number 2
Zin_0_TE_2 = Zte_T2.*((Zte_glass+(1i).*Ztm_T2.*tan(Kz_2.*dT_2))./(Zte_T2+(1i).*Zte_glass.*tan(Kz_2.*dT_2)));
Zin_0_TM_2 = Ztm_T2.*((Ztm_glass+(1i).*Ztm_T2.*tan(Kz_2.*dT_2))./(Ztm_T2+(1i).*Ztm_glass.*tan(Kz_2.*dT_2)));

%define Zin_0 in line of line number 1
Zin_0_TE_1 = Zte_T1.*((Zin_0_TE_2+(1i).*Zte_T1.*tan(Kz_1.*dT_1))./(Zte_T1+(1i).*Zin_0_TE_2.*tan(Kz_1.*dT_1)));
Zin_0_TM_1 = Ztm_T1.*((Zin_0_TM_2+(1i).*Ztm_T1.*tan(Kz_1.*dT_1))./(Ztm_T1+(1i).*Zin_0_TM_2.*tan(Kz_1.*dT_1)));

%define gamma_in
gama_in_TE = (Zin_0_TE_1-Zte_air)./(Zin_0_TE_1+Zte_air);
gama_in_TM = (Zin_0_TM_1-Ztm_air)./(Zin_0_TM_1+Ztm_air);

```

```

%plot the ABS of the reflection coefficient TE
figure(9);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TE));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=2 - TE");
figure(10);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TE));
colorbar;
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=2 - TE");
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");

% plot the ABS of the reflection coefficient for TM
figure(11);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TM));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=2 - TM");
figure(12);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TM));
colorbar;
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=2 - TM");

%part D2, N=2

%define f and teta

f0 = 5.625*10^14;
teta_i = linspace(-pi/3,pi/3,100);
|

% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of theta_i for f=f0
figure(13);
plot(teta_i,abs(gama_in_TE));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i , f = f_0) for N=2 - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of theta_i for f=f0
figure(14);
plot(teta_i,abs(gama_in_TM));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i , f = f_0) for N=2 - TM");

```

```

%part D3 for N=2

%define f and teta
f_i = linspace(f1,f2,100);
teta_i = 0;
|
% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of f for theta_i = 0
figure(15);
plot(f_i, abs(gama_in_TE));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i = 0 , f) for N=2 - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of f for theta_i = 0
figure(16);
plot(f_i, abs(gama_in_TM));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i = 0 , f) for N=2 - TM");

%part D1, N=3

%define f and teta
f1 = 3.75*10^14;
f2 = 7.5*10^14;
f0 = 5.625*10^14;
f = f1:0.2*10^13:f2;
teta = -(pi/3):0.03:pi/3;
[f_i,teta_i] = meshgrid(f,teta);
V_c = 3*10^8;

epsilon_1 = 1.131;
epsilon_2 = 1.493;
epsilon_3 = 1.970;
epsilon_glass = 2.25;

%define the thetas in the layers
theta_1 = asin ((1./sqrt(epsilon_1)).*sin(teta_i));
theta_2 = asin ((sqrt(epsilon_1./epsilon_2)).*sin(theta_1));
theta_3 = asin ((sqrt(epsilon_2./epsilon_3)).*sin(theta_2));
theta_glass = asin ((sqrt(epsilon_3./epsilon_glass)).*sin(theta_3));

%define K_T
K_T1 = ((2.*pi.*f0)./V_c).*sqrt(epsilon_1);
K_T2 = ((2.*pi.*f0)./V_c).*sqrt(epsilon_2);
K_T3 = ((2.*pi.*f0)./V_c).*sqrt(epsilon_3);

%define new Kz
Kz_1 = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_1).*cos(theta_1);
Kz_2 = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_2).*cos(theta_2);
Kz_3 = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_3).*cos(theta_3);
Kz_glass = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_glass).*cos(theta_glass);

%define etta
eta_air = 120*pi;
eta_glass = eta_air./sqrt(epsilon_glass);
eta_T1 = eta_air./sqrt(epsilon_1);
eta_T2 = eta_air./sqrt(epsilon_2);
eta_T3 = eta_air./sqrt(epsilon_3);

```

```

%define Z
Zte_air = eta_air./cos(teta_i);
Ztm_air = eta_air.*cos(teta_i);
Zte_glass = eta_glass./cos(theta_glass);
Ztm_glass = eta_glass.*cos(theta_glass);
Zte_T1 = eta_T1./cos(theta_1);
Ztm_T1 = eta_T1.*cos(theta_1);
Zte_T2 = eta_T2./cos(theta_2);
Ztm_T2 = eta_T2.*cos(theta_2);
Zte_T3 = eta_T3./cos(theta_3);
Ztm_T3 = eta_T3.*cos(theta_3);

%define dT
dT_1=0.5.*pi./K_T1;
dT_2=0.5.*pi./K_T2;
dT_3=0.5.*pi./K_T3;

%define Zin_0 in line of line number 3
Zin_0_TE_3 = Zte_T3.*((Zte_glass+(1i).*Zte_T3.*tan(Kz_3.*dT_3))./(Zte_T3+(1i).*Zte_glass.*tan(Kz_3.*dT_3)));
Zin_0_TM_3 = Ztm_T3.*((Ztm_glass+(1i).*Ztm_T3.*tan(Kz_3.*dT_3))./(Ztm_T3+(1i).*Ztm_glass.*tan(Kz_3.*dT_3)));

%define Zin_0 in line of line number 2
Zin_0_TE_2 = Zte_T2.*((Zin_0_TE_3+(1i).*Zte_T2.*tan(Kz_2.*dT_2))./(Zte_T2+(1i).*Zin_0_TE_3.*tan(Kz_2.*dT_2)));
Zin_0_TM_2 = Ztm_T2.*((Zin_0_TM_3+(1i).*Ztm_T2.*tan(Kz_2.*dT_2))./(Ztm_T2+(1i).*Zin_0_TM_3.*tan(Kz_2.*dT_2)));

%define Zin_0 in line of line number 1
Zin_0_TE_1 = Zte_T1.*((Zin_0_TE_2+(1i).*Zte_T1.*tan(Kz_1.*dT_1))./(Zte_T1+(1i).*Zin_0_TE_2.*tan(Kz_1.*dT_1)));
Zin_0_TM_1 = Ztm_T1.*((Zin_0_TM_2+(1i).*Ztm_T1.*tan(Kz_1.*dT_1))./(Ztm_T1+(1i).*Zin_0_TM_2.*tan(Kz_1.*dT_1)));

%define gama_in
gama_in_TE = (Zin_0_TE_1-Zte_air)./(Zin_0_TE_1+Zte_air);
gama_in_TM = (Zin_0_TM_1-Ztm_air)./(Zin_0_TM_1+Ztm_air);

%plot the ABS of the reflection coefficient TE
figure(17);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TE));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=3 - TE");
figure(18);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TE));
colorbar;
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=3 - TE");
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");

% plot the ABS of the reflection coefficient for TM
figure(19);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TM));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=3 - TM");
figure(20);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TM));
colorbar;
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) for N=3 - TM");

```

```

%part D2, N=3

%define f and teta
f0 = 5.625*10^14;
teta_i = linspace(-pi/3,pi/3,100);
|
% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of theta_i for f=f0
figure(21);
plot(teta_i,abs(gama_in_TE));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("|\\Gamma|");
title("|\\Gamma(\\theta_i , f = f_0)| for N=3 - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of theta_i for f=f0
figure(22);
plot(teta_i,abs(gama_in_TM));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("|\\Gamma|");
title("|\\Gamma(\\theta_i , f = f_0)| for N=3 - TM");

%part D3, N=3

%define f and teta

f_i = linspace(f1,f2,100);
teta_i=0;

% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of f for theta_i = 0
figure(23);
plot(f_i, abs(gama_in_TE));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("|\\Gamma|");
title("|\\Gamma(\\theta_i = 0 , f)| for N=3 - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of f for theta_i = 0
figure(24);
plot(f_i, abs(gama_in_TM));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("|\\Gamma|");
title("|\\Gamma(\\theta_i = 0 , f)| for N=3 - TM");

%part D1, N=4

%define f and teta
f1 = 3.75*10^14;
f2 = 7.5*10^14;
f0 = 5.625*10^14;
f = f1:0.2*10^13:f2;
teta = -(pi/3):0.03*pi/3;
[f_i,teta_i] = meshgrid(f,teta);
V_c = 3*10^8;

epsilon_1 =1.0682;
epsilon_2=1.301;
epsilon_3=1.710;
epsilon_4=2.085;
epsilon_glass=2.25;

%define the thetas in the layers
theta_1 = asin ((1./sqrt(epsilon_1)).*sin(teta_i));
theta_2 = asin ((sqrt(epsilon_1./epsilon_2)).*sin(theta_1));
theta_3 = asin ((sqrt(epsilon_2./epsilon_3)).*sin(theta_2));
theta_4 = asin ((sqrt(epsilon_3./epsilon_4)).*sin(theta_3));
theta_glass = asin ((sqrt(epsilon_3./epsilon_glass)).*sin(theta_4));

```

```

%define K_T
K_T1 = ((2.*pi.*f0)./V_c).*sqrt(epsilon_1);
K_T2 = ((2.*pi.*f0)./V_c).*sqrt(epsilon_2);
K_T3 = ((2.*pi.*f0)./V_c).*sqrt(epsilon_3);
K_T4 = ((2.*pi.*f0)./V_c).*sqrt(epsilon_4);

%define new Kz
Kz_1 = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_1).*cos(theta_1);
Kz_2 = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_2).*cos(theta_2);
Kz_3 = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_3).*cos(theta_3);
Kz_4 = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_4).*cos(theta_4);
Kz_glass = ((2.*pi.*f_i)./V_c).*sqrt(epsilon_glass).*cos(theta_glass);

%define etta
eta_air = 120*pi;
eta_glass = eta_air./sqrt(epsilon_glass);
eta_T1 = eta_air./sqrt(epsilon_1);
eta_T2 = eta_air./sqrt(epsilon_2);
eta_T3 = eta_air./sqrt(epsilon_3);
eta_T4 = eta_air./sqrt(epsilon_4);

%define Z
Zte_air = eta_air./cos(teta_i);
Ztm_air = eta_air.*cos(teta_i);
Zte_glass = eta_glass./cos(theta_glass);
Ztm_glass = eta_glass.*cos(theta_glass);
Zte_T1 = eta_T1./cos(theta_1);
Ztm_T1 = eta_T1.*cos(theta_1);
Zte_T2 = eta_T2./cos(theta_2);
Ztm_T2 = eta_T2.*cos(theta_2);
Zte_T3 = eta_T3./cos(theta_3);
Ztm_T3 = eta_T3.*cos(theta_3);
Zte_T4 = eta_T4./cos(theta_4);
Ztm_T4 = eta_T4.*cos(theta_4);

%define dT
dT_1=0.5.*pi./K_T1;
dT_2=0.5.*pi./K_T2;
dT_3=0.5.*pi./K_T3;
dT_4=0.5.*pi./K_T4;

%define Zin_0 in line of line number 4
Zin_0_TE_4 = Zte_T4.*((Zte_glass+(1i).*Zte_T4.*tan(Kz_4.*dT_4))./(Zte_T4+(1i).*Zte_glass.*tan(Kz_4.*dT_4)));
Zin_0_TM_4 = Ztm_T4.*((Ztm_glass+(1i).*Ztm_T4.*tan(Kz_4.*dT_4))./(Ztm_T4+(1i).*Ztm_glass.*tan(Kz_4.*dT_4)));

%define Zin_0 in line of line number 3
Zin_0_TE_3 = Zte_T3.*((Zin_0_TE_4+(1i).*Zte_T3.*tan(Kz_3.*dT_3))./(Zte_T3+(1i).*Zin_0_TE_4.*tan(Kz_3.*dT_3)));
Zin_0_TM_3 = Ztm_T3.*((Zin_0_TM_4+(1i).*Ztm_T3.*tan(Kz_3.*dT_3))./(Ztm_T3+(1i).*Zin_0_TM_4.*tan(Kz_3.*dT_3)));

%define Zin_0 in line of line number 2
Zin_0_TE_2 = Zte_T2.*((Zin_0_TE_3+(1i).*Zte_T2.*tan(Kz_2.*dT_2))./(Zte_T2+(1i).*Zin_0_TE_3.*tan(Kz_2.*dT_2)));
Zin_0_TM_2 = Ztm_T2.*((Zin_0_TM_3+(1i).*Ztm_T2.*tan(Kz_2.*dT_2))./(Ztm_T2+(1i).*Zin_0_TM_3.*tan(Kz_2.*dT_2)));

%define Zin_0 in line of line number 1
Zin_0_TE_1 = Zte_T1.*((Zin_0_TE_2+(1i).*Zte_T1.*tan(Kz_1.*dT_1))./(Zte_T1+(1i).*Zin_0_TE_2.*tan(Kz_1.*dT_1)));
Zin_0_TM_1 = Ztm_T1.*((Zin_0_TM_2+(1i).*Ztm_T1.*tan(Kz_1.*dT_1))./(Ztm_T1+(1i).*Zin_0_TM_2.*tan(Kz_1.*dT_1)));

```

```

%define gamma_in
gama_in_TE = (Zin_0_TE_1-Zte_air)./(Zin_0_TE_1+Zte_air);
gama_in_TM = (Zin_0_TM_1-Ztm_air)./(Zin_0_TM_1+Ztm_air);

%plot the ABS of the reflection coefficient TE
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TE));
figure(25);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TE));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) | for N=4 - TE");
figure(26);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TE));
colorbar;
title("\Gamma(\theta_i , f) | for N=4 - TE");
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");

% plot the ABS of the reflection coefficient for TM
figure(27);
surf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TM));
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) | for N=4 - TM");
figure(28);
contourf(f_i,teta_i,abs(gama_in_TM));
colorbar;
xlabel("f [Hz]");
ylabel("\theta [rad]");
title("\Gamma(\theta_i , f) | for N=4 - TM");

%part D2, N=4

%define f and teta
f0 = 5.625*10^14;
teta_i = linspace(-pi/3,pi/3,100);
|
% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of theta_i for f=f0
figure(29);
plot(teta_i,abs(gama_in_TE));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i , f = f_0) | for N=4 - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of theta_i for f=f0
figure(30);
plot(teta_i,abs(gama_in_TM));
xlabel("\theta [rad]");
ylabel("\Gamma");
title("\Gamma(\theta_i , f = f_0) | for N=4 - TM");

```

```
%part D3, N=4

%define f and teta
f_i = linspace(f1,f2,100);
teta_i=0;

% plot the ABS of the reflection coefficient TE as a function of f for theta_i = 0
figure(31);
plot(f_i, abs(gama_in_TE));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("|\\Gamma|");
title("|\\Gamma(\\theta_i = 0 , f)| for N=4 - TE");

% plot the ABS of the reflection coefficient TM as a function of f for theta_i = 0
figure(32);
plot(f_i, abs(gama_in_TM));
xlabel("Frequency [Hz]");
ylabel("|\\Gamma|");
title("|\\Gamma(\\theta_i = 0 , f)| for N=4 - TM");
```