<u>עבודת סיום אופטיקה חלק ב – רועי תורג'מן:</u>

הת.ז שלי הוא 328141809 ולכן 809 = ###.

<u>שאלת חימום:</u>

א. הגדירו את פונקציית $circ$ במטלב ושמרו אותה בקובץ m. נפרד, כלומר שמרו אותה כ $circ.m$.
מהם הפרמטרים שהפונקציה מקבלת ומהם הפרמטרים שהפונקציה מחזירה?

ב. ייצרו דגימה של הפונקציה ושמרו אותה במטריצה דו-ממדית עם הפרמטרים הבאים:

i. רדיוס המעגל:
$R = (mod(\#\#\#,5) + 1) \cdot 10^{-2}[m]$

ii. טווח הראייה: $L = 0.2\ [m]$

iii. מספר דגימות בכל ממד: $N = 200$

ג. הציגו את התוצאה כתמונה (השתמשו ב $imagesc$)

ד. חשבו(במטלב) את ההתמרה של המטריצה והציגו את הערך מוחלט ב $imagesc$ וב-$surf$. (שימו לב לצירים כפי שמוסבר במבוא).

הערה: ב$figure$ עם תוצאת ה $surf$ הוסיפו:
camlight left; lighting phong; shading interp

א. <u>הפונקציה $circ$:</u>

$$circ(x,y,R) = \begin{cases} 1\ (x^2 + y^2 < R^2) \\ 0\ (otherwise) \end{cases}$$

כלומר, היא 1 בתוך עיגול ברדיוס R ומרכז בראשית, ו0 בשאר המקומות.

ב. נציב

$$R = (mod(809,5) + 1) \cdot 10^{-2}\ [m] = 0.05\ [m]$$

$$L = 0.2\ [m]$$

$$N = 200$$

לפי המבוא, נגדיר את התחומים הבאים לx, y (תחומים סימטריים סביב 0)

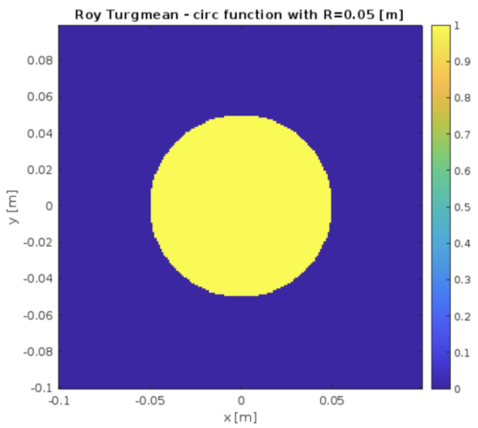
```
x_values = -L/2 : Delta_x : L/2 - Delta_x;
y_values = -L/2 : Delta_y : L/2 - Delta_y;
```

כאשר $\Delta x = \Delta y = \frac{L}{N}$.

<u>ואת הדגימה נבצע בעזרת הקוד הבא:</u>

```
matrix = zeros(length(x_values), length(y_values));

for i = 1:length(x_values)
    for j = 1:length(y_values)
        matrix(i, j) = circ(x_values(i), y_values(j), R);
    end
end
```

ג. <u>נציג את התוצאה:</u>

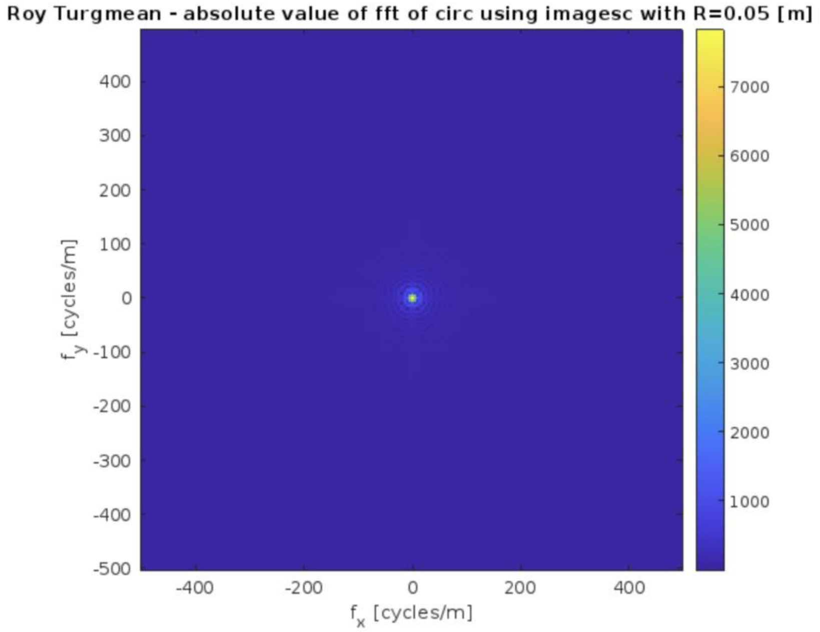


ד. נחשב את ההתמרה של המטריצה באמצעות fft:

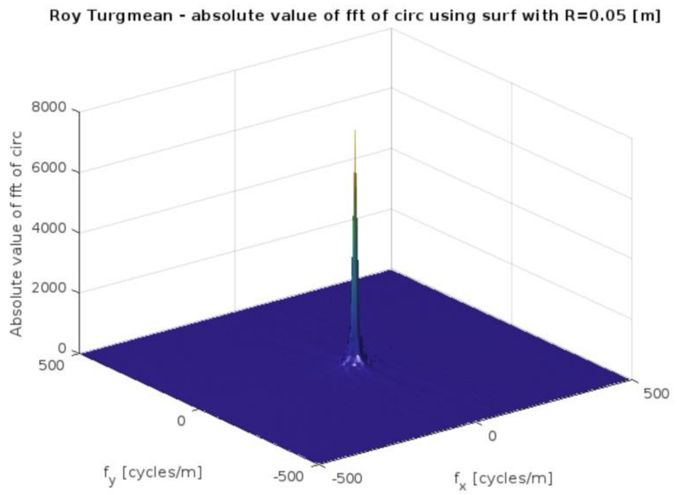
```
% D - Evaluate the FFT of the matrix
fft_matrix = fftshift(fft2(matrix));

% Aprropriate frequency range, where f_x,f_y are the frequency values
f_x_values = -1/(2*Delta_x) : 1/L : 1/(2*Delta_x) - 1/L;
f_y_values = -1/(2*Delta_y) : 1/L : 1/(2*Delta_y) - 1/L;
```

כאשר כפי שניתן לראות, הגדרתי את התחומים של f_x, f_y כמו שהוגדרנו במבוא.

נציג את ההתמרה באמצעות $imagesc$:



נציג את ההתמרה באמצעות $surf$:



__שאלה 2:__

2. בשאלה זו נחשב ונציג את פילוג העוצמה של תבנית פראונהופר (בהנחה שפוגע גל מישורי בעל אמפליטודת יחידה) של מפתח מעגלי משאלה 1 כאשר אורך הגל הינו:

$$\lambda = round\left(400 + \frac{\#\#\#}{999} \cdot 900\right) [nm]$$

א.) ציינו מהו התנאי למרחק התצפית(ע"י אי-שיוון) לקבלת תבנית פראונהופר ובחרו במרחק שהוא 5 פעמים יותר גדול. נסמן מרחק זה ב z_0.
לדוגמא: אם מתקבל לכם $z \gg 10\ [m]$ בחרו ב $z_0 = 50\ [m]$.
ב.) רשמו את הביטוי האנליטי הסופי לפילוג העוצמה שאמורה להתקבל במרחק z_0. (אין צורך להציב מספרים, רשמו רק ביטוי פרמטרי). שימו כי בסוף אתם אמורים לקבל פונקציה התלויה ב x,y
(כלומר יש להציב $f_x = \frac{x}{\lambda z}, f_y = \frac{y}{\lambda z}$)
ג.) הציגו את הביטוי האנליטי שחישבתם בסעיף ב. לשם כך, עיינו והיעזרו בפונקציה $jinc$ המצורפת כדי לעשות זאת. כמוכן, קחו בחשבון את שהצירים שלכם ,כלומר אם הגדרתם את f_x ואת f_y בסעיף ד.1 , אתם יכולים ליצור כעת את צירי המיקום לפי הקשר: $x = f_x \cdot \lambda z_0, y = f_y \cdot \lambda z_0$.
ד.) כעת, הציגו חתך חד-ממדי של הפילוג וחשבו את ה $FWHM$. סמנו זאת על גבי הגרף באופן מתאים. מהם הפרמטרים המשפיעים על ה $FWHM$ לדעתכם? ציינו במפורש איך ה$FWHM$ מושפע ממרחק התצפית, גודל המפתח(הרדיוס) ואורך הגל. (כלומר לכל פרמטר האם הוא יגדיל או יקטין את ה $FWHM$?)

אצלי

$$\lambda = round\left(400 + \frac{809}{999} \cdot 900\right)\ [nm] = 1129\ [nm] = 1.129 \cdot 10^{-6}\ [m]$$

א. התנאי לקבלת תבנית פראונהופר (כפי שראינו בהרצאה) נשים לב שהשקופית שלנו היא $circ$ עם רדיוס R ולכן היא כמובן חסומה על ידי כדור ברדיוס R (היא קיימת רק בתוך הכדור) כלומר לפי ההרצאה התנאי הוא:

$$z \gg \frac{R^2}{\lambda}$$

__הסבר:__ __לפי נוסחת פרנל שפותחה בהרצאה:__

$$E(x,y,z) = \frac{1}{i\lambda z} \cdot e^{\frac{2\pi z i}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{\pi i}{\lambda z}(x^2+y^2)} \cdot F.T\left\{E(x',y',0^+) \cdot e^{-\frac{\pi i}{\lambda z}\cdot\left(x'^2+y'^2\right)}\right\}\Big|_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}}$$

על מנת להזניח $e^{-\frac{\pi i}{\lambda z}\cdot\left(x'^2+y'^2\right)} \approx 1$ נרצה שהארגומנט בexp יהיה

$$\frac{\pi\left(x'^2+y'^2\right)}{\lambda z} = \left|\frac{\pi i}{\lambda z} \cdot \left(x'^2+y'^2\right)\right| \ll \pi$$

$$z \gg \frac{x'^2+y'^2}{\lambda}$$

כאשר x',y' הקוא' על השקופית. אצלנו $x'^2+y'^2 = R^2$ על השקופית ואז

$$z \gg \frac{R^2}{\lambda}$$

__נציב ונקבל:__

$$z \gg 2214.348\ [m]$$

__כפי שביקשו, נבחר ב:__

$$z_0 = 5 \cdot 2214.348 = 11071.74491\ [m]$$

ב. <u>פילוג העוצמה במרחק z_0:</u> אצלנו השקופית היא $T(x,y) = circ(x,y,R)$ $(\mathrm{R} = 0.02\ [\mathrm{m}])$ ואז לפי נוסחת פרנהופאר:

$$E(x,y,z) = \frac{1}{i\lambda z} \cdot e^{\frac{2\pi z i}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{\pi i}{\lambda z}(x^2+y^2)} \cdot F.T\{E(x',y',0^+)\}|_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}}$$

$$E(x',y',0^+) = E(x',y',0^-) \cdot T(x,y)$$

<u>אנחנו מניחים ש:</u>

$$E(x',y',0^-) = \tilde{E} \cdot e^{-ik_{0,x}x - ik_{0,y}\cdot y}$$

עם $k_{0,x} = k_{0,y} = 0$ ו $\tilde{E} = 1$ ולכן

$$E(x',y',0^+) = T(x,y)$$

בנוסף

$$|E(x,y,z)|^2 = \left|\frac{1}{i\lambda z} \cdot e^{\frac{2\pi z i}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{\pi i}{\lambda z}(x^2+y^2)}\right|^2 \cdot \left|F.T\{E(x',y',0^+)\}|_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}}\right|^2$$
$$= \frac{1}{(\lambda z)^2} \cdot \left|F.T\{T(x,y)\}|_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}}\right|^2$$

<u>נציב ונקבל:</u>

$$|E(x,y,z)|^2 = \frac{1}{(\lambda z)^2} \cdot \left|F.T\big(circ(x',y',R)\big)\right|^2|_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}}$$
$$\overset{*}{=} \frac{1}{(\lambda z)^2} \cdot \left|R^2 \cdot Jinc\left(R \cdot \sqrt{f_x^2 + f_y^2}\right)\right|^2 ||_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}} = \frac{R^4}{\lambda^2 z^2} \cdot Jinc\left(R \cdot \sqrt{\frac{x^2}{\lambda^2 z^2} + \frac{y^2}{\lambda^2 z^2}}\right)$$
$$= \frac{R^4}{\lambda^2 z^2} \cdot Jinc\left(\frac{R}{\lambda z} \cdot \sqrt{x^2+y^2}\right)$$

נציב $z = z_0$ ואז

$$\boxed{I(x,y) = |E(x,y,z)|^2|_{z=z_0} = \frac{R^4}{\lambda^2 z_0^2} \cdot Jinc^2\left(\frac{R}{\lambda z_0} \cdot \sqrt{x^2+y^2}\right)}$$

כאשר ב$(*)$ השתמשתי בנתון ש

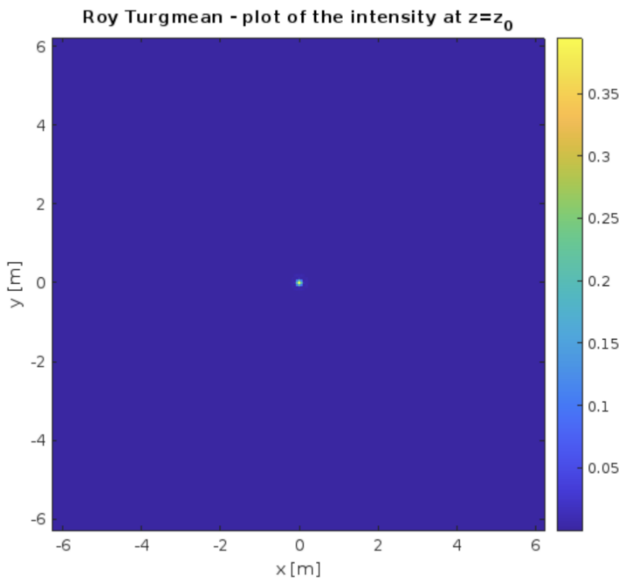
$$F.T\big(circ(x',y',R)\big) = R^2 \cdot Jinc\left(R\sqrt{f_x^2 + f_y^2}\right)$$

אעיר ש

$$Jinc(x) = \frac{J_1(2\pi x)}{x}$$

כאשר J_1 פו' בסל מסדר 1.

ג. <u>נציג את הביטוי האנליטי מסעיף ב:</u> אעיר שהתחומים של x, y זה λz_0 כפול התחומים של f_x, f_y מהמבוא.

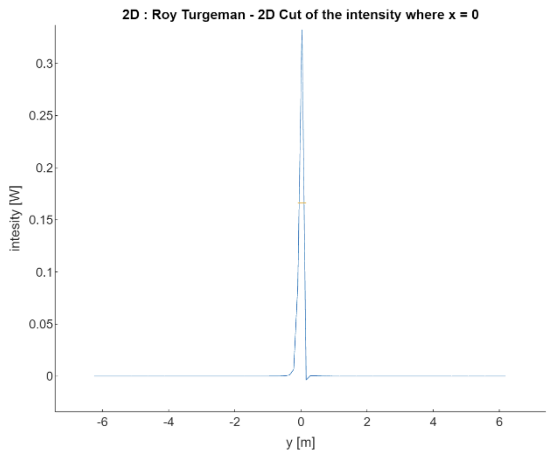


<u>הקוד המתאים:</u> (להגדרת התחומים ויצירת z).

```
f_x_values = -1/(2*Delta_x) : 1/L : 1/(2*Delta_x) - 1/L;
f_y_values = -1/(2*Delta_y) : 1/L : 1/(2*Delta_y) - 1/L;

x_values = lambda_final*z_0 * f_x_values;
y_values = lambda_final*z_0 * f_y_values;

[x, y] = meshgrid(x_values, y_values);

z = ((R_final)^4/(lambda_final * z_final)^2) *
(jinc((R_final/(lambda_final*z_final) * sqrt(x.^2+y.^2)))).^ 2;

% Plot the function
imagesc(x_values, y_values, real(z)); % plot the real part of the function
title('Roy Turgmean - plot of the intensity at z=z_0');
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
colorbar;
axis xy;
axis image;
```

ד. <u>חתך חד מימדי של הפילוג:</u> ניצור חתך ב$\frac{N}{2}+1$ כי שם ה$intensity$ מקסימלי ואז ה$fwhm$ מקסימלי מבין כל החתכים (כלומר לוקחים את הworst case). נשתמש באינטרפולציה על מנת להגביר את קצב הדגימה ולקרב את הפונקציה הרציפה עם יותר דגימות.

<u>החתך:</u>



הקו הקבוע סומן על הגרף.

<u>הקוד המתאים:</u> (עם האינטרפולציה)

```
my_2D_cut = real(z(N/2 + 1, :));
[right_point, left_point, fwhm, x_interpolation, interpolated_cut] =
CalcFWHM(my_2D_cut, x_values);

figure;
hold on;
plot(x_interpolation, interpolated_cut);
x_range = linspace(left_point, right_point, 100);
plot(x_range, max(interpolated_cut)/2 * ones(100));
xlabel('y [m]');
ylabel('intesity [W]');
title('2D : Roy Turgeman - 2D Cut of the intensity where x = 0');
disp(['Fwhm in 2D: ', num2str(fwhm)]);
hold off;
```

<u>כאשר הפונקציה CalcFWHM מחשבת את ה$FWHM$:</u> (ומחזירה 5 ערכים – הנקודות בציר האופקי שבהן מתקבל הfwhm, ה$fwhm$ עצמו, הציר $x\_interpolation$ והחתך לאחר אינטרפולציה).

```
function [right_point, left_point, fwhm, x_interpolation, interpolated_cut]
= CalcFWHM(cut, x_prop)
    x_interpolation = linspace(min(x_prop), max(x_prop), 100); %
Interpolation range
    interpolated_cut = interp1(x_prop, cut, x_interpolation, 'spline');

    [max_cut, max_index] = max(interpolated_cut);
    half_max_cut = max_cut / 2;

    % find where the cut first drops below half_max_cut:
    % before the peak and after the peak
    left_index = find(interpolated_cut(1:max_index) < half_max_cut, 1,
'last');
    right_index = find(interpolated_cut(max_index:end) < half_max_cut, 1) +
max_index - 1;

    % x values at the indices
    left_point = x_interpolation(left_index);
```

```
    right_point = x_interpolation(right_index);

    % Calculate FWHM
    fwhm = right_point - left_point;
end
```

נסביר: חישוב $fwhm$ מתבצע כמו שנלמד בהרצאה.

$$fwhm = full\ width\ half\ max$$

כלומר מוצאים מתי מקבלים חצי מהערך המקסימלי, ולוקחים רוחב מלא – כלומר מה הרוחב שמתקבל כאשר יורדים לחצי מהערך המקסימלי. יש גם hwhm שזה חצי מהרוחב, אבל פה לוקחים רוחב מלא.

מקבלים $FWHM = 0.2516\ [m]$

<u>כעת נבדוק איך הוא מושפע ממרחק התצפית (z_0), רדיוס המפתח (R) ואורך הגל (λ):</u>

נסמן בλ, R, z_0 את הערכים העכשוויים של אורך הגל ורדיוס המפתח בהתאמה,

וב $\lambda_{final}, z_{final}, R_{final}$ את הערכים החדשים.

<u>עבור $\lambda = \lambda_0$ ואותו רדיוס R:</u>

$z_{final}\ [m]$	$FWHM\ [m]$
z_0	0.1207
$1.2z_0$	0.1492
$1.4z_0$	0.1756
$1.6z_0$	0.2015
$1.8z_0$	0.2275
$2z_0$	0.2537

לכן $fwhm$ עולה עם z_0.

<u>עבור $z_{final} = z_0$ ואותו רדיוס $R_{final} = R$:</u>

$\lambda_{final}\ [m]$	$FWHM\ [m]$
0.3λ	0.0362
0.6λ	0.0724
0.9λ	0.1086
λ	0.1207
1.2λ	0.1448
1.4λ	0.169

לכן $FWHM$ עולה עם λ.

<u>עבור $z_{final} = z_0, \lambda_{final} = \lambda_0$:</u>,

$R_{final}\ [m]$	$FWHM\ [m]$
$0.3R$	0.4267
$0.6R$	0.2101
$0.9R$	0.1369
R	0.1207
$1.2R$	0.0957
$1.4R$	0.0803

לכן $FWHM$ יורד עם R.

<u>הסברים מתמטיים:</u> ניזכר ש

$$\boldsymbol{I(x,y)=\frac{R^4}{\lambda^2 z_0^2}\cdot Jinc^2\left(\frac{R}{\lambda z_0}\cdot\sqrt{x^2+y^2}\right)}$$

וגם ש $Jinc$ מתנהגת כמו $Sinc$. כלומר מתנהגת יפה קרוב ל0 (קרובה לקבוע π) ומשתוללת רחוק מ0.

ככל ש R גדל כך המקדם גדול יותר והארגומנט של ה$Jinc$ גדול יותר, כלומר I משתולל יותר ולכן ה$FWHM$ יקטן כי נגיע לחצי מהר יותר.

ככל שλ גדל או z_0 גדל כך המקדם קטן יותר והארגומנט של ה$Jinc$ קטן יותר, כלומר I משתולל פחות, יותר ויותר קרוב לקבוע ולכן $FWHM$ יגדל כי נגיע לחצי לאט יותר.

למעשה, אם $R\to 0$ או $\lambda\to\infty$ או $z_0\to\infty$ אז $\frac{R}{\lambda z_0}\cdot\sqrt{x^2+y^2}\to 0$

ולכן $Jinc^2(0)=\pi^2$ $\leftarrow$ $Jinc^2\left(\frac{R}{\lambda z_0}\cdot\sqrt{x^2+y^2}\right)$ ולכן $I(x,y)\to 0$ ובפרט $FWHM\to\infty$.

שאלה 3:

3. בשאלה זו, נכתוב פונקציה המחשבת את תבנית העקיפה לפי קירוב פרנל.
תזכורת לקירוב פרנל:

$$E(x,y,z)=\frac{e^{ikz}}{\lambda zi}e^{\frac{ik}{2z}(x^2+y^2)}\mathcal{F}\left\{E(x',y',0)e^{\frac{ik}{2z}(x'^2+y'^2)}\right\}\Big|_{f_x=\frac{x}{\lambda z},f_y=\frac{y}{\lambda z}}$$

א.) לנוחות, הגדירו את 2 פונקציות הבאות ושמרו אותם(כל אחד לחוד) כקובץ נפרד:

```
function Fx=F(x)
    Fx=fftshift(fft2(ifftshift(x)));
end

function iFx=iF(x)
    iFx=fftshift(ifft2(ifftshift(x)));
end
```

הסבירו למה נועדו הפונקציות *ifftshift* ו *fftshift*.

א. הפונקציה $fftshift$ לוקחת אות מרחבי שמיוצג על ידי מטריצה ומזיזה את תדר הDC שלו למרכז המטריצה. הפונקציה ifftshift היא הפעולה ההפוכה, ומחזירה את התדרים למקום המקורי שלהם.

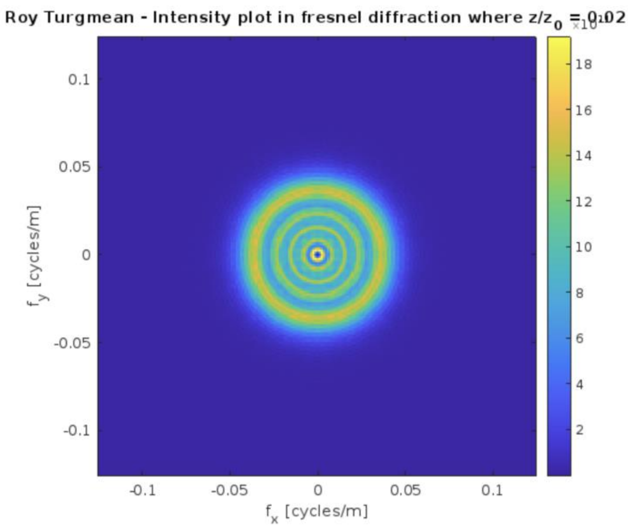
<u>למה שנרצה להשתמש בהן?</u> כיוון שהתמרת פורייה בדידה היא מחזורית, נרצה לשים את תדר ה0 במרכז על מנת שנראה ב$plot$ מחזור שלם שלה, ולא 2 חצאי מחזור.

ב.) כתבו כעת את פונקייה הבאה והשתמשו בפונקציות של סעיף א:

```
function[u2,x_prop]=propFresnel(u1,L,lambda,z);
% propagation - according to Fresnel
% assumes same x and y side lengths and
% uniform sampling
% u1 - source plane field
% L - source plane side length (FOV)
% lambda - wavelength
% z - propagation distance
% u2 - observation plane field
% x_prop - axis in observation plane field
```

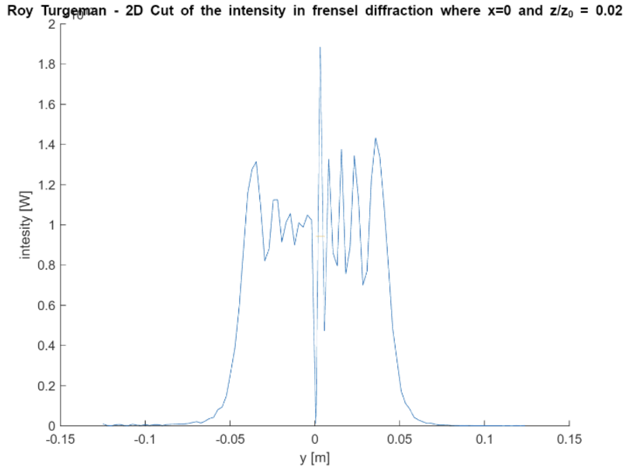
ב. כתבתי את הפונקציה בקוד.

ג. עבור $z_{final}=\frac{z_0}{50}$ יוצא



הגרף מייצג את העוצמה לפי נוסחת פרנל.

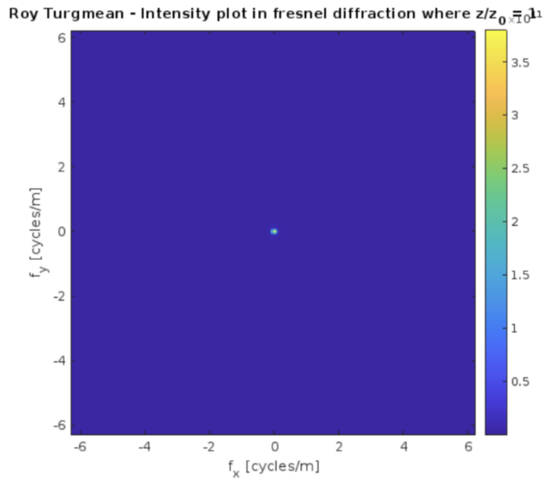
<u>והחתך יוצא:</u> כמו בד2 , ניקח חתך באינדקס $\frac{\mathrm{N}}{2}+1$ שמתאים ל$\mathrm{x}=0$, מאותו הסבר כמו בד2.



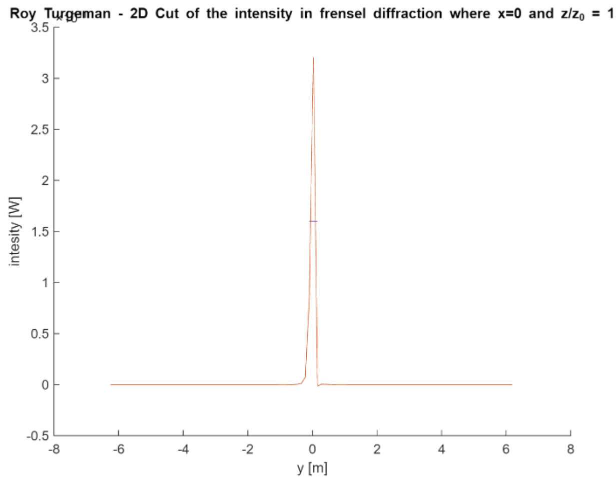
יוצא

$$FWHM = 0.0050253\ [m]$$

ד. עבור $z_{final} = z_0$:



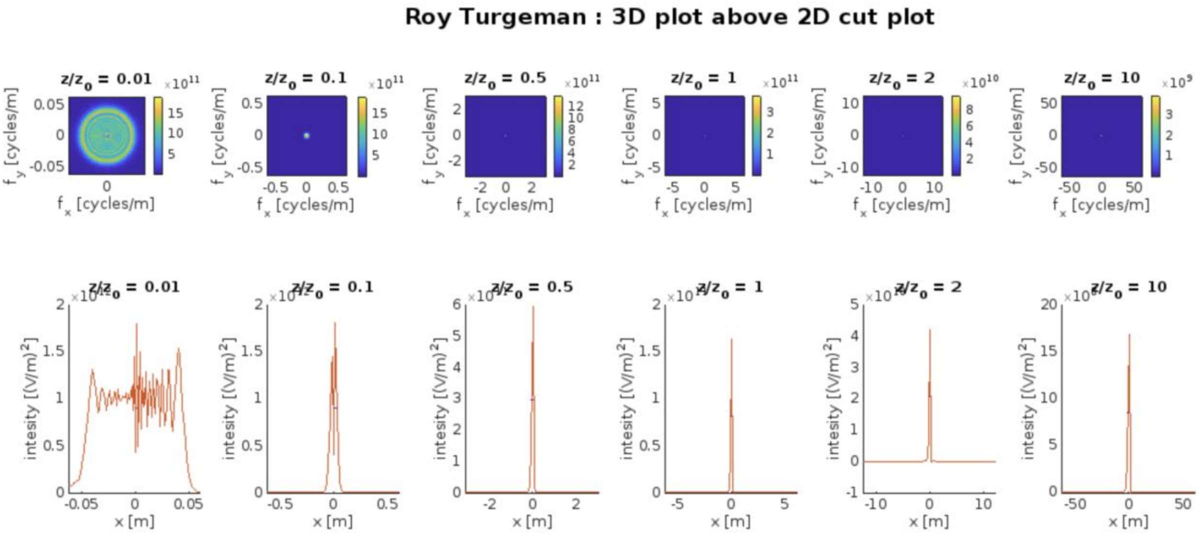
<u>והחתך יוצא:</u> כמו בד2 , ניקח חתך באינדקס $\frac{\mathrm{N}}{2}+1$ שמתאים ל$\mathrm{x}=0$, מאותו הסבר כמו בד2.



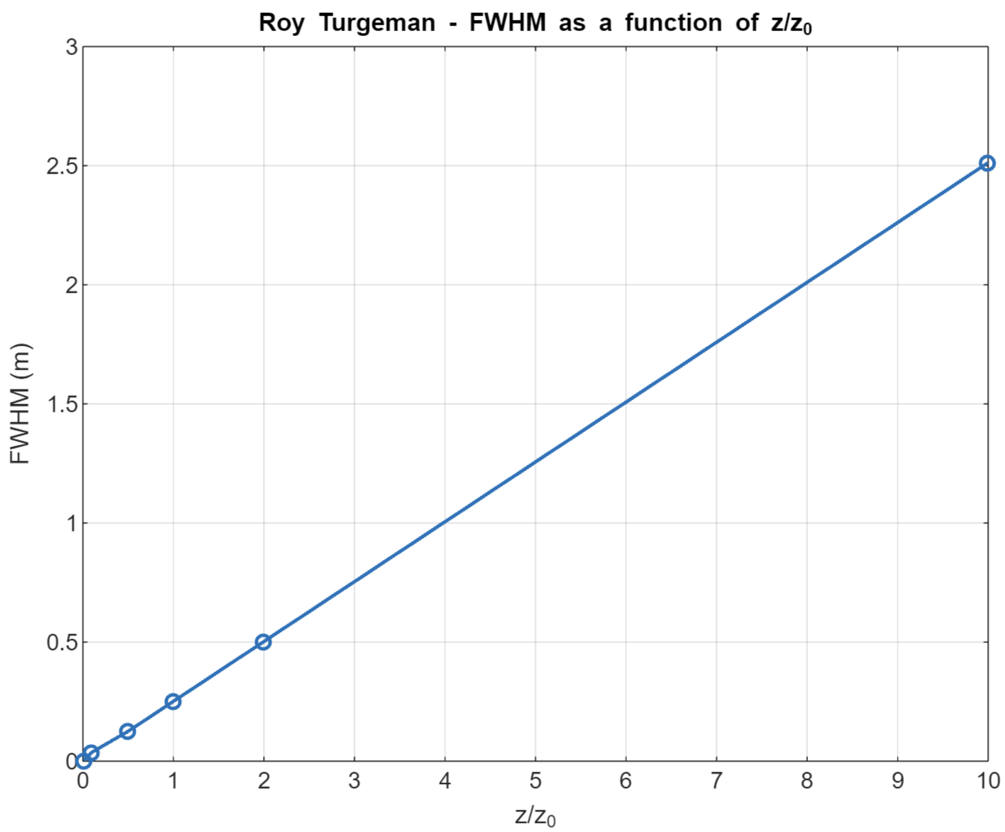
$$FWHM = 0.25126\ [m]$$

אמרנו ש$FWHM$ עולה עם z_0, וזה מסתדר עם זה.
ב2 ד קיבלנו $FWHM = 0.25126\ [m]$. בדיוק אותו ערך!
כלומר אכן בשדה רחוק הקירוב של פרנהאופר עובד.

ה. <u>נסרטט את מה שביקשו:</u>



<u>גרף של $FWHM$ כפונקציה של z/z_0:</u>



יוצא גרף ליניארי.

הקובץ *circ*:

```
function result = circ(x, y, R)
    result = (x.^2+y.^2 < R.^2);
end
```

קידום פרנל:

```
function [u_2, x_prop] = propFresnel(u1, L, lambda, z)
% propagation – according to Fresnel
% assumes same x and y side lengths and
% uniform sampling
% u1 - source plane field
% L - source plane side length (FOV)
% lambda - wavelength
% z - propagation distance
% u2 - observation plane field
% x_prop – axis in observation plane field

i=1i;
k=2*pi/lambda;
N=size(u1,1);

Delta_x = L/N;
Delta_y= L/N;

x_values = -L/2 : Delta_x : L/2-Delta_x;
y_values = -L/2 : Delta_y : L/2-Delta_y;
[x, y] = meshgrid(x_values, y_values);

coeff = (exp(i*k*z)/(lambda*z*i)) * exp((i*k/(2*z))*(x.^2+y.^2));
field=u1 .* exp((i*k/(2*z)) .* (x.^2+y.^2));
transform = F(field);

displayed_field = coeff .* transform;
f_x_prop = -1/(2*Delta_x) : 1/L : 1/(2*Delta_x) - 1/L;
x_prop = f_x_prop * (lambda*z);
u_2 = displayed_field;

end
```

קוד המטלב:

```
% 328141809

% ----------------------------
% Warm up quetion
close all;
% 1B
R = 0.05;
L = 0.2;
N = 200;

Delta_x = L/N;
Delta_y = L/N;

x_values = -L/2 : Delta_x : L/2 - Delta_x;
y_values = -L/2 : Delta_y : L/2 - Delta_y;

matrix = zeros(length(x_values), length(y_values));
```

```
for i = 1:length(x_values)
    for j = 1:length(y_values)
        matrix(i, j) = circ(x_values(i), y_values(j), R);
    end
end

% 1C

figure;
imagesc(x_values, y_values, matrix);
colorbar;
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
title(['1C : Roy Turgmean - circ function with R=', num2str(R), ' [m]']);
axis xy;
axis image;

% 1D
fft_matrix = fftshift(fft2(matrix));  % fft calculation

% Frequency range, where f_x,f_y are the frequency values
f_x_values = -1/(2*Delta_x) : 1/L : 1/(2*Delta_x) - 1/L;
f_y_values = -1/(2*Delta_y) : 1/L : 1/(2*Delta_y) - 1/L;

% Absolute value of the fft of circ plot , with imagesc
figure;
imagesc(f_x_values, f_y_values, abs(fft_matrix))
xlabel('f_x [cycles/m]');
ylabel('f_y [cycles/m]');
title(['1D : Roy Turgmean - absolute value of fft of circ using imagesc
with R=', num2str(R), ' [m]']);
colorbar;
axis xy;
axis image;

% Absolute value of the fft of circ plot , with surf
figure;
surf(f_x_values, f_y_values, abs(fft_matrix));
camlight left;
lighting phong;
shading interp;
title(['1D : Roy Turgmean - absolute value of fft of circ using surf with
R=', num2str(R), ' [m]']);
xlabel('f_x [cycles/m]');
ylabel('f_y [cycles/m]');
zlabel('Absolute value of fft of circ');


%----------------------------------------
% Question 2

% Define the function parameters
R_final = R;

lambda = 1.129*10^-6;
lambda_final = lambda;

z_0 = 5 * R^2/lambda;  % 2A
```

```
z_final = z_0;

f_x_values = -1/(2*Delta_x) : 1/L : 1/(2*Delta_x) - 1/L;
f_y_values = -1/(2*Delta_y) : 1/L : 1/(2*Delta_y) - 1/L;

x_values = lambda_final*z_0 * f_x_values;
y_values = lambda_final*z_0 * f_y_values;

[x, y] = meshgrid(x_values, y_values);

z = ((R_final)^4/(lambda_final * z_final)^2) *
(jinc((R_final/(lambda_final*z_final) * sqrt(x.^2+y.^2)))).^ 2;  % 2B

% 2C - plot the function z
figure;
imagesc(x_values, y_values, real(z)); % plot only the real part of the
function z
title('2B : Roy Turgmean - plot of the intensity at z=z_0');
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
colorbar;
axis xy;
axis image;

% 2D - plot the 2D cut:
my_2D_cut = real(z(N/2 + 1, :));
[right_point, left_point, fwhm, x_interpolation, interpolated_cut] =
CalcFWHM(my_2D_cut, x_values);

figure;
hold on;
plot(x_interpolation, interpolated_cut);
x_range = linspace(left_point, right_point, 100);
plot(x_range, max(interpolated_cut)/2 * ones(100));
xlabel('y [m]');
ylabel('intesity [W]');
title('2D : Roy Turgeman - 2D Cut of the intensity where x = 0');
disp(['Fwhm in 2D: ', num2str(fwhm)]);
hold off;

% -----------------------------------------------
% Question 3

z_final = z_0/(50);

x_values = -L/2 : Delta_x : L/2-Delta_x;
y_values = -L/2 : Delta_y : L/2-Delta_y;
[x, y] = meshgrid(x_values, y_values);
u1 = circ(x,y,R);

% 3C - z=z_0/50
[u_2, x_prop] = propFresnel(u1, L, lambda, z_0/50);
intensity = abs(u_2).^2;

figure;
imagesc(x_prop, x_prop, intensity);
xlabel('f_x [cycles/m]');
ylabel('f_y [cycles/m]');
colorbar;
```

```
title(['Roy Turgmean - Intensity plot in fresnel diffraction where z/z_0 =
', num2str(1/50)]);
axis xy;
axis image;

my_2D_cut = intensity(N/2 + 1, :);
[right_point, left_point, fwhm, x_interpolation, interpolated_cut] =
CalcFWHM(my_2D_cut, x_prop);  % find fwhm

% plot the 2D cut
figure;
hold on;
plot(x_interpolation, interpolated_cut);
x_range = linspace(left_point, right_point, 100);
plot(x_range, max(interpolated_cut)/2 * ones(100));
xlabel('y [m]');
ylabel('intesity [W]');
title(['Roy Turgeman - 2D Cut of the intensity in frensel diffraction where
x=0 and z/z_0 = ', num2str(1/50)]);
hold off;
disp(['Fwhm in 3C: ', num2str(fwhm)]);


% 3D
%figure;
[u_2, x_prop] = propFresnel(u1, L, lambda, z_0);
intensity = abs(u_2).^2;

figure;
imagesc(x_prop, x_prop, intensity);
xlabel('f_x [cycles/m]');
ylabel('f_y [cycles/m]');
colorbar;
title(['Roy Turgmean - Intensity plot in fresnel diffraction where z/z_0 =
', num2str(1)]);
axis xy;
axis image;

my_2D_cut = intensity(N/2 + 1, :);
[right_point, left_point, fwhm, x_interpolation, interpolated_cut] =
CalcFWHM(my_2D_cut, x_prop);  % find fwhm

% plot the 2D cut
figure;
hold on;
plot(x_interpolation, interpolated_cut);
plot(x_interpolation, interpolated_cut);
x_range = linspace(left_point, right_point, 100);
plot(x_range, max(interpolated_cut)/2 * ones(100));
xlabel('y [m]');
ylabel('intesity [W]');
title(['Roy Turgeman - 2D Cut of the intensity in frensel diffraction where
x=0 and z/z_0 = ', num2str(1)]);
disp(['Fwhm in 3D: ', num2str(fwhm)]);
hold off;


% 3 E
z_values = [0.01*z_0, 0.1*z_0, 0.5*z_0, z_0, 2*z_0, 10*z_0];
```

```
fwhm_array = zeros(1, length(z_values));

figure('Position', [500, 600, 1600, 600]); % Adjust position and size as
needed
annotation('textbox', [0.5, 0.9, 0.1, 0.1], 'String', 'Roy Turgeman : 3D
plot above 2D cut plot', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 14,
'FontWeight', 'bold', 'LineStyle', 'none');

for i=1:length(z_values)
    curr_z = z_values(i);
    subplot(2, length(z_values), i);

    [u_2, x_prop] = propFresnel(u1, L, lambda, curr_z);
    intensity = abs(u_2).^2;

    imagesc(x_prop, x_prop, intensity);
    xlabel('f_x [cycles/m]');
    ylabel('f_y [cycles/m]');
    colorbar;
    title(['z/z_0 = ', num2str(curr_z/z_0)]);
    %title(['Roy Turgmean - Intensity plot in fresnel diffraction where
    %z/z_0 = ', num2str(curr_z/z_0)]);
    axis xy;
    axis image;

    % find fwhm
    my_2D_cut = intensity(N/2, :);
    [right_point, left_point, fwhm, x_interpolation, interpolated_cut] =
CalcFWHM(my_2D_cut, x_prop);

    % plot the 2D cut
    subplot(2, length(z_values), i+length(z_values));
    hold on;
    plot(x_interpolation, interpolated_cut);
    plot(x_interpolation, interpolated_cut);
    x_range = linspace(left_point, right_point, 100);
    plot(x_range, max(interpolated_cut)/2 * ones(100));
    xlabel('x [m]');
    ylabel('intesity [(V/m)^2]');
    title(['z/z_0 = ', num2str(curr_z/z_0)]);
    hold off;
    %title(['Roy Turgeman - 2D Cut of the intensity in frensel diffraction
where y=0 and z/z_0 = ', num2str(curr_z/z_0)]);

    fwhm_array(i) = fwhm;
end


% plot fwhm as a function of z/z_0
figure;
plot(z_values/z_0, fwhm_array, 'o-', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('z/z_0');
ylabel('FWHM (m)');
title('Roy Turgeman - FWHM as a function of z/z_0');
grid on;
```

```
function [right_point, left_point, fwhm, x_interpolation, interpolated_cut]
= CalcFWHM(cut, x_prop)
    x_interpolation = linspace(min(x_prop), max(x_prop), 100); %
Interpolation range
    interpolated_cut = interp1(x_prop, cut, x_interpolation, 'spline');

    [max_cut, max_index] = max(interpolated_cut);
    half_max_cut = max_cut / 2;

    % find where the cut first drops below half_max_cut:
    % before the peak and after the peak
    left_index = find(interpolated_cut(1:max_index) < half_max_cut, 1,
'last');
    right_index = find(interpolated_cut(max_index:end) < half_max_cut, 1) +
max_index - 1;

    % x values at the indices
    left_point = x_interpolation(left_index);
    right_point = x_interpolation(right_index);

    % Calculate FWHM
    fwhm = right_point - left_point;
end
```