



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
Ben-Gurion University of the Negev

אוניברסיטת בן גוריון  
הפקולטה למדעי הטבע  
המחלקה לפיזיקה

שם הביאסוי

Holography

מעבדה ג'2

מחברים:

עדן בנאים

אריאל שורץ

מדריכ:

אופיר

05.2025

## תוכן עניינים

|       |  |
|-------|--|
| 1.    | מטרות הניסוי: .....  |
| 2.    | רקע תיאורטי: .....   |
| 2.1   | הקדמה: .....   |
| 2.2   | גלים אלקטרומגנטיים: .....  |
| 2.2.1 | משוואת הגלים: .....  |
| 2.2.2 | עוצמה: .....   |
| 2.3   | התאבכות: .....   |
| 2.3.1 | чисוב הזווית הקritisית (Critical Angle) : (Critical Angle)                 |
| 2.4   | קוורנטיות: .....   |
| 2.4.1 | קוורנטיות זמן (Temporal Coherence) : (Temporal Coherence)                  |
| 2.4.2 | מדד ניגודיות (Visibility) להערכת איות תבנית ההתאבכות:                      |
| 2.4.3 | קוורנטיות מרחבית (Spatial Coherence) : (Spatial Coherence)                 |
| 2.5   | עקיפה (Diffraction) : .....  |
| 2.6   | סקלס (Speckles) : (Speckles)   |
| 2.6.1 | שיטת האובייקטיבית (Objective Speckle) : (Objective Speckle)                |
| 2.6.2 | שיטת הסובייקטיבית (Subjective Speckle) : (Subjective Speckle)              |
| 2.7   | holografiya (Holography) : (Holography)                                    |
| 2.7.1 | In-line Holography 2.7.1   |
| 2.7.2 | Off-Axis Holography 2.7.2  |
| 2.8   | holografiya Digtital: .....  |
| 2.8.1 | שחזור הnumerical של ההולוגרפיה: .....                                      |
| 2.9   | הפחתת ריבוב DC: .....  |
| 2.9.1 | חיסור העוצמה הממוצעת: .....  |
| 2.9.2 | חיסור תמנונת הרקע: .....   |
| 2.9.3 | סינון תדרים מרוחבי (Fourier Domain Filtering) : (Fourier Domain Filtering) |
| 2.10  | חישון ה-CCD (Charge-Coupled Device) : (Charge-Coupled Device)              |
| 2.11  | הגדלה אופטית וטלסקופ: .....  |
| 2.12  | הרכיבים במערכת הניסוי: .....   |
| 2.13  | ישומים להולוגרפיה: .....   |
| 3.    | ניסוי (1): בניית וכיוול המערכת לשחזור ההולוגרפיה .....                     |
| 3.1   | מטרת הניסוי: .....   |
| 3.2   | מערכת הניסוי: .....  |
| 3.3   | מהלך הניסוי: .....   |
| 3.4   | תוצאות הניסוי ועיבודן: .....   |

|         |   |
|---------|---|
| 33..... | 3.4.1 שחזור תמונה הולוגרפית:                                  |
| 37..... | 3.4.2 ניתוח איות התאבכות:                                     |
| 41..... | 3.5 דיוון ומסקנות:  |
| 43..... | 4. ניסוי (2): שינוי המרחק בין האובייקט לחישן .....            |
| 43..... | 4.1 מטרת הניסוי: .....  |
| 43..... | 4.2 מערכת הניסוי: .....                                       |
| 43..... | 4.3 מהלך הניסוי: .....  |
| 43..... | 4.4 תוצאות הניסוי ועיבודן: .....                              |
| 51..... | 4.5 דיוון ומסקנות: .....                                      |
| 53..... | 5. ניסוי (3): שינוי הזווית בין קרן הרפרנס לקרן האובייקט ..... |
| 53..... | 5.1 מטרת הניסוי: .....  |
| 53..... | 5.2 מערכת הניסוי: .....                                       |
| 54..... | 5.3 מהלך הניסוי: .....  |
| 55..... | 5.4 תוצאות הניסוי ועיבודן: .....                              |
| 63..... | 5.5 דיוון ומסקנות: .....                                      |
| 65..... | 6. ניסוי (4): ניסוי הרחבה – תמונה הפאה ככלי מדידה .....       |
| 65..... | 6.1 מטרת הניסוי: .....  |
| 65..... | 6.2 מערכת הניסוי: .....                                       |
| 66..... | 6.3 מהלך הניסוי: .....  |
| 66..... | 6.3.1 פאה כ הפרש דרך אופטי: .....                             |
| 67..... | 6.3.2 Phase Unwrapping .....                                  |
| 67..... | 6.3.3 יישום וביצוע מדידות: .....                              |
| 68..... | 6.4 תוצאות הניסוי ועיבודן: .....                              |
| 68..... | 6.4.1 שחזור אובייקט תלת-ממדי - דמות: .....                    |
| 70..... | 6.4.2 אובייקט תלת-ממדי כמקרה בוחן – תרמיל 9x19 FMJ: .....     |
| 75..... | 6.4.3 מדידת חספוי משטחים: .....                               |
| 77..... | 6.4.4 הקשר בין Grit Level RMS לבין .....                      |
| 78..... | 6.5 דיוון ומסקנות: .....                                      |
| 82..... | 7.ביבליוגרפיה .....   |

## 1. מטרות הניסוי:

- הבנת עקרונות ההולוגרפיה הדיגיטלית והיצירות לבנית התאבכות בין גל ייחוס לגל המוחזר מאובייקט.
- היכרות עם תהליך הקלטת הולוגרמות באמצעותים דיגיטליים וביצוע שחזור נומי של חזית הגל תוך שימוש בטכניקות עיבוד תמונה.

## 2. רקע תיאורטי:

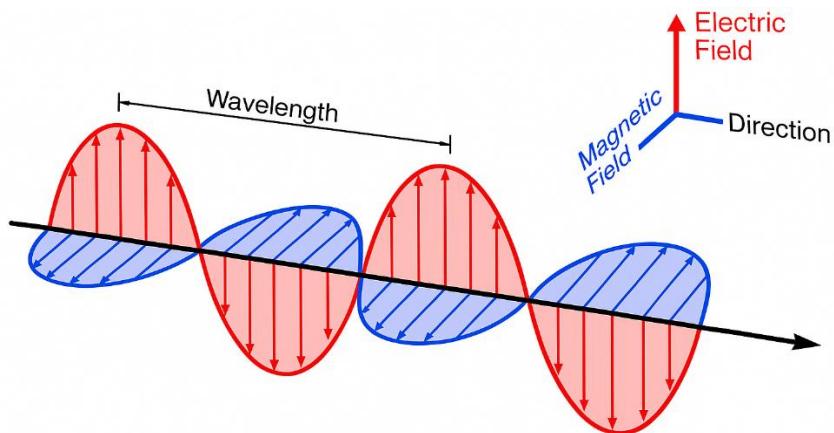
### 2.1 הקדמה:

הholוגרפיה היא טכניקה אופטית מתקדמת המאפשרת שמירה ו恢復 של מידע על גל אור, לרבות עצמתו (אמפליטודה) ומופעו (פазה). השיטה פותחה בשנת 1948 על ידי הפיזיקאי דניס גאבור (Dennis Gabor), אשר זכה על כך בפרס נובל לפיזיקה בשנת 1971 [2]. תחילתה התגלתה ההולוגרפיה כחלק מהניסיונות לשפר את הרזולוציה במיקרוסקופיה אלקטронית, אך עם הזמן הפכה לכלי מרכזי לשחזר תמונה תלת-ממדית. בשיטה זו מוקלטת בניית התאבכות הנוצרת מהשילוב של גל האובייקט עם קרן ייחוס קוורנטית, כך שנשמר מידע המאפשר שחזר של חזית הגל המקורי.

השיטה ההולוגрафית המקורי סבלה מחייבת בין הדמות הוירטואלית, הדמות הריאלית וגלו הרקע, דבר שהקשה על שחזר ברור. על כן פותחה שיטת ההולוגרפיה מחוץ לציר (-off axis), שבה מוסטת קרן ייחוס בזווית, באמצעות הפרדה מרחבית בין הרכיבים השונים בתמונה המשוחזרת. בשלב מאוחר יותר, עם כניסה של מצלמות דיגיטליות (כגון CCD) והתפתחותם של אמצעים חישוביים מתקדמים, התפתחה שיטת ההולוגרפיה הדיגיטלית – שבה תהליך "ההקלטה" וה恢復 כולל מתבצע באמצעותים דיגיטליים, לרוב תוך שימוש באינטגרל פרנל או בטרנספורמציות פורייה מהירה (FFT).

### 2.2 גלים אלקטромגנטיים:

הholוגרפיה עוסקת בהקלטה וב恢復 של חזית גל אלקטромגנטי(Clomer), מידע הכלול הן את עצמתו של גל האור והן את מופעו (פазה שלו).



איור 1: תיאור חזותי של התפשטות גל אלקטرومגנטי למרחב. [1]

## 2.2.1 משוואת הגלים:

התיאור המלא של גלים אלקטרומגנטיים נשען על משוואות מקסווול, המתארות את הקשר בין השדה החשמלי והשדה המגנטי למרחב ובזמן. עבור תווך לינארי, אחיד וחופשי ממקורות מטען, מתכבות משוואות הגל עבור רכיבי השדות:

$$(1) \quad \nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} ; \quad \nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

כאשר  $\vec{B}$ ,  $\vec{E}$  הם השדות החשמלי והמגנטי בהתאם,<sup>2</sup> הוא אופרטור הלאפלסיאן וביטוי זה מייצג את התנagoות השדה למרחב ובזמן, כאשר  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \cdot 3 \cdot 10^8 \left[ \frac{m}{s} \right]$  היא מהירות האור בריק. פתרון טיפוסי של משווהה זו הוא גל מישורי מונוכרומטי אשר ניתן לרשום באמצעות הייצוג המרוכב הבא:

$$(2) \quad \vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \cdot e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} - \phi_0)}$$

כאשר בהצגה זו:

- $E_0$  - אמפליטודת הגל.
- $\omega = 2\pi f$  - התדרות הזרויתית.
- $|\vec{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - וקטור הגל, מייצג את כיוון ההתרפשות של חזית הגל וגודלו.
- $\phi_0$  - הפאה ההתחלתית.

"יצוג זה מאפשר תיאור של שני הגדים המרכזיים של הגל – עוצמה ופאזה. שניהם נדרשים כדי לבצע שחזור מלא של חזית הגל כפי שנעשה בהולוגרפיה. בעוד שבאמצעים אופטיים רגילים נמדדת רק עוצמת האור (השקללה לריבוע האמפליטודה) בהולוגרפיה נוכל לקבל גם את רכיב הפאה ע"י התאבכות".

## 2.2.2 עוצמה:

עוצמת הגל (Intensity) מוגדרת כצפיפות ההספק הממוצעת ליחידת שטח, כלומר כמות האנרגיה שמעביר הגל דרך יחידת שטח ליחידת זמן. בהנחה שהגל מקוטב לינארית ומתרפש בריק, ניתן לבטא את העוצמה באמצעות השדה החשמלי של הגל:

$$(3) \quad I = \epsilon_0 c \langle E^2(t) \rangle$$

כאשר:

- $I = \frac{W}{m^2}$  – עוצמת הגל
- $8.854 \cdot 10^{-12} \approx \epsilon_0$  – הקבוע הדיאלקטרי של הריק.
- $c$  – מהירות האור בריק.
- $E(t)$  – ערך רגעי של השדה החשמלי כפונקציה של הזמן עליו עושים מיצוע.

במדידות המבוצעות באמצעות מצלמה דיגיטלית מסוג CCD, בדומה לשימוש בסרט צילום, הרכיב הפיזיקלי הנמדד הוא העוצמה האופטית הפוגעת בכל פיקסל. עוצמה זו פרופורציונית לרכיב האמפליטודה של השדה החשמלי, כאשר הערך הנמדד בפועל הוא הממוצע בזמן של גודל זה. לעומת זאת, לא נמדד השדה החשמלי עצמו אלא גודל סקלרי חיובי התואם את הממוצע של  $E^2(t)$  לאורך זמן חשיפה.

הממוצע מחושב אינטגרל על פרק זמן גדול:

$$(4) \quad I = \epsilon_0 c \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E^2(t) dt$$

אם הגל הוא מונוכרומטי ומוקטב לינארית, השדה החשמלי יתוארך:

$$(5) \quad E(t) = E_0 \cos(\omega t)$$

נציב את  $E(t)$  לביטוי העוצמה ונקבל:

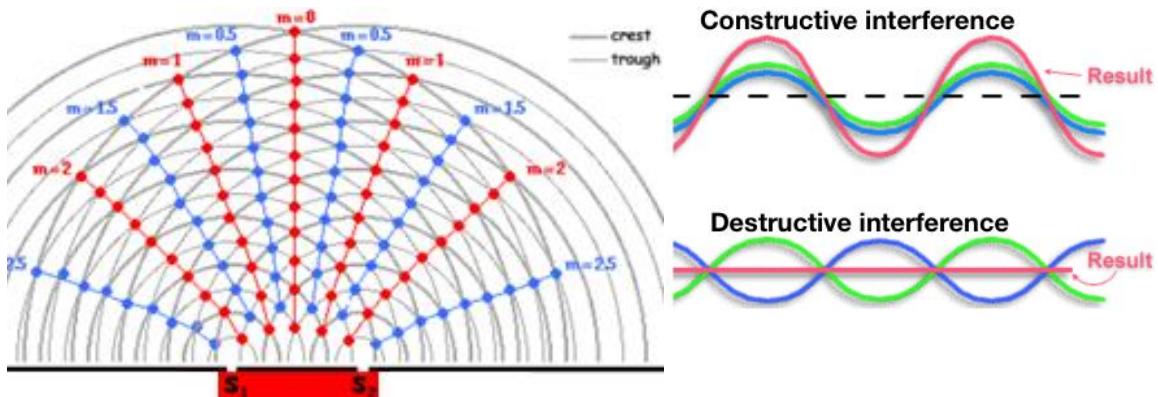
$$(6) \quad \langle E^2(t) \rangle = \langle E_0^2 \cos^2(\omega t) \rangle = \frac{1}{2} E_0^2$$

כך ש:

$$(7) \quad I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 \propto E_0^2 \approx |\vec{E}|^2$$

### 2.3 התאבכות:

כאשר שני גלים מונוכרומטיים בעלי אותה תדירות נפגשים למרחב, מתרחשת ביניהם תופעת התאבכות. תופעה זו מבוססת על עקרון הסופרפוזיציה של שדות אלקטромגנטיים, אשר קובע כי כאשר מספר גלים מתקיים בו-זמנית באותו מרחב, השדה הכולל בכל נקודה ובכל זמן הוא סכום וקטורי של כל השדות הבודדים.



איור 2 א: המראה של תבנית פסים (Fringe Pattern) הנוצרת כתוצאה מהתאבכות של שני גלים מונוכרומטיים. הקווים באדום מייצגים אזורים של התאבכות בונה, ובכחול התאבכות חורסת. [[fizzics.org](http://fizzics.org)]

במקרה של שני גלים בלבד, מדובר בסכימה של שני רכיבי שדה אשר יכולים לחזק או להחליש זה את זה – בהתאם להפרש הפאות בינם. תוצאה זו מתבטאת בשינויים מיקומיים בעוצמת האור, אשר יוצרים על פני משורר הגלאי תבנית מחזורית של אזורים מוארים וחלשים יותר, הנקראת **תבנית פסים (Fringe Pattern)**.

להבנת תופעה זו, נבחן שני גלים מיישוריים מונוכרומטיים בעלי אותה תדרות וקיוטו, אשר נכתבים בצורה מורכבת כך:

$$(8) \quad A_1(\vec{r}) = a_1 e^{i\phi_1}, \quad A_2(\vec{r}) = a_2 e^{i\phi_2}$$

כאשר  $\vec{r} \in \mathbb{R}^+$ ,  $a_1, a_2 \in \mathbb{R}$  אמפליטודות ממשיות חיוביות,  $\phi_1, \phi_2$  ערכי הפאות בנקודה  $\vec{r}$ .

השדה המורכב בסופרפוזיציה יהיה:

$$(9) \quad A_{total} = A_1 + A_2 = a_1 e^{i\phi_1} + a_2 e^{i\phi_2}$$

וממנו נקבל את האמפליטודה הפרופורציונית לשדה בריבוע:

$$(10) \quad I = |A_{total}|^2 = |A_1 + A_2|^2$$

$$(11) \quad |A_1 + A_2|^2 = A_1 A_1^* + A_2 A_2^* + A_1 A_2^* + A_1^* A_2$$

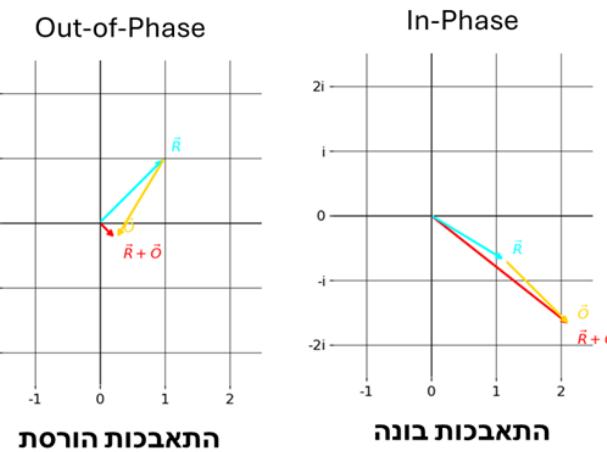
ומכיון ש-  $A_1 A_2^* = a_1 a_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)}$  וגם  $|A_i|^2 = a_i^2$  נקבל:

$$(12) \quad I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

וכנסמן:  $I_i = A_i^2$  ו-  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$  נקבל את הנוסחה המבטאת את עוצמת השדה כתלות בהפרש הפאות:

$$(13) \quad I = I_1 + I_2 = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$$

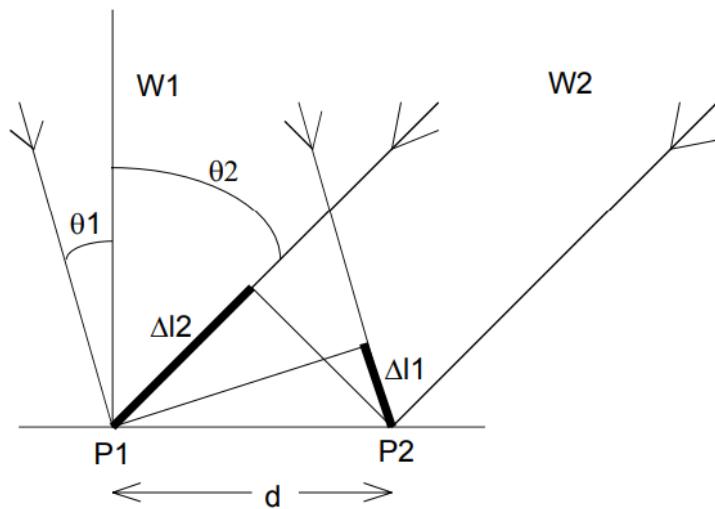
היא מראה שכאשר הגלים נמצאים בפאזה (*in phase*), כלומר  $\Delta\phi = 2\pi n$  (תתקבלת התאבכות בונה – עוצמה מרבית). לעומת זאת כאשר  $\Delta\phi = (2n+1)\pi$  הגלים נמצאים מחוץ לפאה (*out of phase*) ותתקבל התאבכות הורסת – עוצמה מינימלית. (כאשר  $n = 0, 1, 2, \dots$ )



איור 2ב: התאבכות בונה והتابוכות הורסת מוצגת במישור המרוכב.

בקשר של הולוגרפיה, נוח להציג כל גל כוקטור במישור המרוכב, כאשר האורך מייצג את האמפליטודה והזווית את הפазה. בניית התאבכות מתΚבלת מסcum וקטורים אלו. בהמשך, נראה שnoch להסתכל בדרך זו על איבר התמונה הירטואלי שהוא הרכיב הראשי מתמונה התאבכות.

מכיוון שהפaza תלויה גם במקומות במרחב, נוצרת במישור הגלי תבנית מחזוריות של אזורים מוארים וחלשים – פסים בהירים וכחולים לשיפורין אשר מהווים אינדיקציה לתאבכות גלים קוורנטיים.



איור 3: הצגה גיאומטרית של התאבכות שני גלים קוורנטיים. [4]

הפרש הפאות  $\Delta$  אינו קבוע במרחב אלא תלוי במקומות – וכתוצאה לכך מתΚבלת תבנית מחזוריות של מקסימות ומינימות עצמה במישור הגלי. תבנית זו מכונה כאמור **Fringe Pattern** ומהرك בין שני פסים בהירים סמוכים בה נקרא **Fringe Spacing** ומוסמן באמצעות  $d$ . (כפי שניתן לראות באיור 3)

כדי לקשר בין גיאומטריית התקדמות הגלים לבין מרחק הפסים נתבונן בשני הגלים המישוריים שמתפשטים בזווית  $\theta_1$  ו- $\theta_2$  ביחס לנורמל של מישור הגלי באיור. בכל נקודה על המישור כל גל מקנה הפרש דרך אופטי ביחס לנקודות ייחוס.

$$(14) \quad d \cdot \sin(\theta_1) = \Delta l_1 \quad d \cdot \sin(\theta_2) = \Delta l_2$$

כאשר  $\Delta l$ ,  $\Delta l_1$  והפרש הדריכים בין שני הקרןאים עברו כל אחת מהמקסימות. הפרש הדריכים הכללי בין שני גלים צריך להיות שווה לאורך גל שלם על מנת שתתקבל התאבכות בונה.

$$(15) \quad \frac{\lambda}{\sin(\theta_1) + \sin(\theta_2)} = d \Rightarrow \lambda = \Delta l_1 + \Delta l_2$$

לשם נוחות כשרוצים לתאר את הזווית בין הגלים נעזר בזיהות טריגונומטרית ובקרוב זווית קטנות  $\theta_2 \approx \theta_1 + \theta$  ונקבל:

$$(16) \quad d = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)} \approx \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

זהוי תוצאה חשובה, שכן היא מחייבת על קשר הפוך בין זווית התאבכות לבין מרחק הפסים: **כל שהזווית קטנה יותר, הפסים מרוחקים יותר, ולהפך זווית גדולה מובילת לפסי צפופים**. מתוך כך, נוכל גם להגדיר את **תדירות הפסים המרחביות** – כלומר, מספר הפסים ליחידת אורך – באופן הבא:

$$f = \frac{1}{d} = \frac{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\lambda}$$

(17) תוצאה זו שימושית בתכנון מערכות הולוגרפיה, לאחר שהיא משגיעה על מספר הפסים הצפוי במישורagal, ובכך גם על אופן הדגימה הנדרש מצד מצלמת-*CCD*. באופן כללי, רצוי שמרחב הפסים יהיה גדול מכמה פיקסלים, כדי שתבנית התאבכות תדגם באופן מספק ותמנע איבוד מידע עקב טשטוש או קיפול ספקטורי (*aliasing*).

### 2.3.1 חישוב הזווית הקритית (Critical Angle):

כפי שהוצג בסעיף הקודם, המרחק בין הפסים בדף התאבכות תלוי בזווית שבין שני הגלים. מרחק זה קובע את צפיפות הפסים במישורagal, ולכן גם את הדרישה המינימלית לדגימה בצלמה. אם תדריות הפסים גבוהה מדי ביחס לרזולוציית החישון, המצלמה לא תוכל לדגם את מבנית התאבכות כראוי, מה שיוביל לאיבוד מידע, טשטוש או תופעות קיפול (*aliasing*).

כדי להבטיח דגימה מספקת, מקובל לדרוש שמרחב מינימלי בין שני פסים סמוכים יהיה לפחות פי שניים מגודל הפיקסל, כלומר:  $2 \cdot p \geq d_{min}$ . נציב זאת בביטוי למרחק בין פסים תחת זווית התאבכות קטנה:

$$(18) \quad d \approx \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \approx \frac{\lambda}{\theta} \Rightarrow \theta_{critical} \geq 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{4p}\right)$$

זרווית זו נקראת הזרווית הקרייטית, והיא מוגדרת תנאי סוף בבחירה הגיאומטריה של המערכת. אם הזרווית תהיה גדולה יותר, הפסים יהיו קרובים יותר מגודל הפיקסל ויתכן שלא תיווצר תבנית הניתנת לזרחי מרחבית בתמונה.

#### **נדגמים מספרית (בהתאמה למערכת הניסוי):**

במערכת שבה בוצע הניסוי נעשה שימוש בליזיר מסוג  $HeNe$  באורך גל [ $nm$ ]  $\lambda = 32.8$ . ותיעוד התבנית ההתאככות בוצע באמצעות מצלמת  $MC - LUCID TRI122S$  בעלת חישון מסוג  $CCD$  וגודל פיקסל של  $\mu m = 1.85$ .

כדי שתבנית הפסים תדגם כראוי על ידי הגלאי, נדרש שהמרחק בין שני פסים סמוכים כדי (*fringe spacing*) יהיה לפחות בגודל 2 פיקסלים. נציב את הנתונים בנוסחה (18):

$$(19) \quad \theta_{critical} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{4p}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{632.8 \cdot 10^{-9}}{1.85 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}\right) \approx 2 \cdot \arcsin(0.0855) \approx 9.8^\circ$$

תוצאה זו תציג את הזרווית המksamלית הנדרשת בין קרן האובייקט לקרן הייחוס.

## 2.4 קוהרנטיות:

קוהרנטיות (Coherence) מתארת את המידה שבה גלים – כגון גלי אור או גלי קול – שומרים על קשר פאזה יציב לאורך זמן ומרחב. תכונה זו מאפשרת תופעות של חיפויה בין גלים הונוסטרוקטיבית ודסטרוקטיבית, כמו בהתאבכות. בהיעדר קוהרנטיות, החיפויה בין גלים פשוט נראית כסכום עצומות בלתי מסודר, ללא פסים ברורים של חיזוק וביטול. רק כאשר מתקיימת התאמה סידירה בין הפאות, ניתן לצפות בתבנית ההתאבכות מחזורית. מקור או כמלו ליצר מספק רמה גבוהה של קוהרנטיות, הן زمنית והן מרחבית, ولكن השימוש בו אידיאלי בהולוגרפיה.

בהולוגרפיה, קוהרנטיות היא תנאי הכרחי להיווצרות תבנית ההתאבכות יציבה בין קרן האובייקט לבין היחסו. מקובל לבדוק בין שני סוגי עיקריים: קוהרנטיות זמנית, המתיחסת לשימורה על הפרש פאזה עיקבי לאור הזמן, וקוהרנטיות מרחבית, המתארת איחודות פאזה בין נקודות שונות למרחב. שני סוגי הקוהרנטיות נבחנים להלן.

### 2.4.1 קוהרנטיות זמנית (Temporal Coherence):

קוהרנטיות זמנית מתארת את יכולת של גל לשמור על הפרש פאזה קבוע עם עצמו לאור זמן. זהה תכונה המאפיינת מקורות מונוכרומטיים (כמו לייזר) ומוגדרת לפי אורך הקוהרנטיות  $L_c$  שהוא המרחק המקסימלי שבו נשמרת קוהרנטיות לאור ציר ההתרפשות. כדי להבין זאת פיזיקלית, נבחן מצב בו גל אור מתפצל לשתי קרניות (למשל ע"י פריזמה או מפצל אלומה) שכיל אחת מהן נעה במסלול שונה. לאחר מעבר במסלולים הנפרדים הקרן הראשונה חוזרת במשור ההפוך. על-מנת שתיווצר תבנית ההתאבכות, נדרש שהפרש הפאות ביןיהן יהיה מוגדר, כלומר שהן "שייכות" לאוთה חבילת גלים שנפלטה ברגע מסוים מהמקור.

למעשה, מקורות אור פולטים חבילות גלים סופיות באורך  $\lambda$ . תהליכי פליטה ספונטנית של האטום במקור. אם הפרש הדרכים בין הקרניות גדול מדי, כל אחת מהן עשויה לייצג חבילת שנפלטה בזמן שונה והקוהרנטיות ביניהן תאבד. לכן תנאי בסיס להATABכות הוא  $L_c < \Delta\lambda$ . כאשר  $\Delta\lambda$  הוא הפרש הדרכים האופטי בין הקרניות המפוצלות.

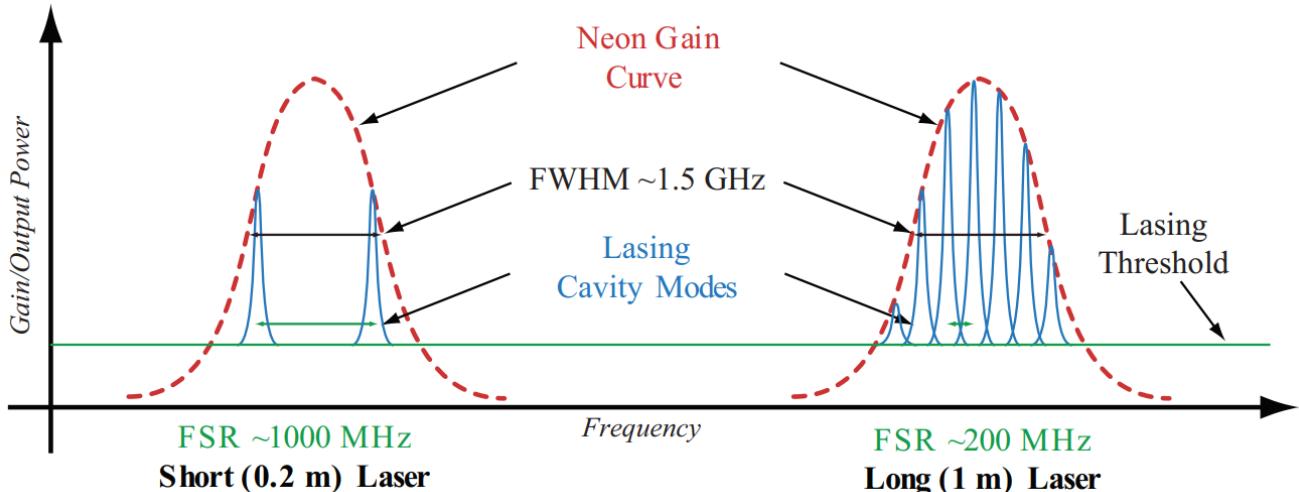
אורקוהרנטיות קשור בזמן הקוהרנטי  $\tau$ , כלומר משך הזמן שבו נשמר יחס פאזה קבוע ונitin לבטא באמצעות רוחב הקו הספקטRALי (*linewidth*) של מקור האור:

$$(20) \quad L_c = \frac{c}{\Delta f} = c \cdot \tau$$

רוחב הקו הספקטRALי  $f$  מתאר את טווח התדרים שבו נפלטה קרינה ממקור האור. במקור מונוכרומטי אידיאלי תדר הפליטה של האור היה יחיד ומוגדר אך במציאות גם מקורות לייזר פולטניים בתחום תדרים צר אף לא אפסי. רוחב זה משקף את אי-הווידאות בתדר הנפלט וכן השפעות פיזיקליות רבות כמו רעש תרמי, חלל הליזר ועוד. ככל שהרוחב הספקטRALי  $f$  צר יותר כך אורקוהרנטיות גבולית יותר – וליזר, בשל רוחב הספקטרום הצר שלו, מפיק חבילות גלים ארוכות בזמן ומרחב וכן מאופיין באורך קוהרנטיות גבול המתאים ליישומים כמו הולוגרפיה.

לרוב מאפיינים את רוחב הקו באמצעות הגדרה של רוחב חצי-הגבוה (FWHM), כלומר הרוחב בתדר של עקומה הפליטה הספקטRELית שבו עצמת ההספק יורדת למחצית מהערך המרבי. בלייזרים HeNe טיפוסים, ערך ה-FWHM נع לרוב בטוח של מאות קילוהרץ עד מגה-הרץ בודדים בהתאם לאיכות החיל האופטי – טווח זה מביא לאורק Kohlrentiyot של שירות סנטימטרים.

במערכת הניסוי נעשה שימוש בלייזר גז מסוג (HeNe - Neon) באורך גל של  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , הספק של  $W = 15 \text{ mW}$  בקטגורית Class 3B אך מכיוון שלא היה ברשותנו הדגם המדויק של הליזר נסתמך על לייזר מעבדה דומה זהה בנתוני מבית Thorlabs [5].



איור 4: עקומה עצמת-תדר של הליזר. [5]

לפי נוכל לראות שעל-פי היצן, רוחב הקו מוערך כ-  $\Delta f \approx 1.5 \text{ GHz}$  וארך הקהו-רנטיות של הליזר מוערך להיות  $L_c \approx 30 \text{ cm}$ . ובנוסף, מצין שה- linewidth של מוד בודד הוא צר מאוד ( $k\text{Hz}$ ), אבל בפועל הליזר פועל במספר מצבים אורכיים בתוך תחום הגיאן הכללי (gain bandwidth), ולכן הקהו-רנטיות מוגבל על-ידי הרוחב הכללי.

## 2.4.2 מד ניגודיות (Visibility) להערכת איכות הבניית התארכות:

ניגודיות הפסים או *Visibility*, הוא מדד פיזיקלי שמתאר את הבחרות היחסית בין המקסימות והמינימות בתבנית התארכות. זהו כלי שימושי להערכת איכות הבניית התארכות, רמת הקהו-רנטיות, והיחס בין עצמות קרן האובייקט וקרן הייחוס. נגידו:

$$(21) \quad V = \frac{I_{Max} - I_{min}}{I_{Max} + I_{min}}, \quad 0 \leq V \leq 1$$

$I_{Max}$  היא העוצמה המקסימלית (בפס הבוחר)

$I_{min}$  היא העוצמה המינימלית (בפס הכהה)

$V \rightarrow 1$  תבנית עם ניגודיות אידאלית בעוד  $0 \rightarrow V$  מעידה על גלים לא Kohlrentiyot.

נשים לב שעפ"י משווה 13 נקבל עבור הפרש פaza  $0 = \Delta\phi$ :

$$(22) \quad I_{Max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

עבור הפרש פאזה  $\Delta\phi = \pi$ :

$$(23) \quad I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

נציב במשוואה 21, הנוסחא של 7 ונקבל:

$$(24) \quad V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}, \quad 0 \leq V \leq 1$$

כדי להבין כיצד קוורנטיות משפיעה על הניגודיות, נבחן את פונקציית קוורנטיות העצמית המורכבת:

(25)  $\Gamma(\tau) = \langle E(t + \tau) \cdot E^*(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E(t + \tau) \cdot E^*(t) dt$

פונקציה זו מטארת את המתאם הפאזי בין ערכי השדה החסמי בזמנים שונים  $t$  ו- $(t + \tau)$ , כלומר עד כמה הגל "זכור את עצמו" לאחר זמן. את פונקציית קוורנטיות מנורמלים על-ידי ערכה העצמי ברגע  $0 = \tau$ :

(26)  $\frac{\Gamma(\tau)}{\Gamma(\tau = 0)} = \gamma(\tau)$

כאשר יש קוורנטיות מלאה (למשל במקרה לייזר יציב) נקבל  $1 = |\gamma(0)|$  והניגודיות תהיה מקסימלית. לעומת זאת, אם יש איבוד קוורנטיות (למשל כתוצאה מהפרש זמניים גדול מדי או הפרש גדול בין המסלולים) ערך  $|\gamma(\tau)|$  יקטן והניגודיות תיפגע בהתאם.

בהתאם לכך, כאשר קיימת קוורנטיות חלקית, מתקבלים ביטויים כלליים לעוצמה ולניגודיות, שבהם מופיע גורם התיקון  $\gamma$  - זהו רכיב משקל סטטיסטי:

$$(27) \quad I = I_1 + I_2 = 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot |\gamma(\tau)| \cdot \cos(\Delta\phi)$$

$$(28) \quad V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \cdot |\gamma(\tau)|$$

### 2.4.3 קוהרנטיות מרחבית (Spatial Coherence):

קוהרנטיות מרחבית מתארת את מידת ההתאמנה הפיזית בין גלים שמגיעים מנוקודות שונות על פני חzikת גל, אך נבדדים באותו רגע זמן. תכונה זו קובעת האם גלים שמגיעים מזווית שונות למישור הגלאי יכולים לצורך בינהם התאבכות מרחבית יציבה. במקרים אחרים, ניתן לחשב על קוהרנטיות מרחבית כמדד ל"ע עד כמה המקור שולח גלים שמתחנכים אליו הגיעו מאותו מקום, עם אותה פאזה".

אם נבחן מקור אוור גדול, כמו נורת להט, נמצא שככל אוצר על פני הנורה פולט גלים עצמאיים, מה ששוביל לכך שהפאות בין הקרניים שונות מקום למקום. כאשר גלים כאלה נפגשים בנקודות שונות במישור המדייה, הם לרוב אינם מסוכנרכנים ולכן לא יוצרים תבנית התאבכות ברורה, אלא עצמה איחידה ורועשת. לעומת זאת, לייזר פולט קרינה ממוקור קטן מאוד ובזווית צרה מאוד. כתוצאה לכך, הגלים הנפלטים ממנה שומרים על התאמנה פיזית גבוהה בכל כיוון גם כאשר הם נבדדים בנקודות שונות על פני הגלאי. לכן, לייזר נדרש למקור בעל קוהרנטיות מרחבית גבוהה מאוד, ומסוגל להפיק תבנית פסים חזה וברורה על פני שטח נרחב.

מתוך ניסוי יאנג – נניח שמקור או רחוב מקרין אל שני חריצים המרוחקים זה מזה למרחק  $\Delta x$  ומת�בלת תבנית התאבכות על מסך למרחק  $R$ . כל נקודה על המקור שולחת גלים שיכולים להגיע לשני החריצים – אם המרחק בין שני החריצים גדול מדי, כל אחד מהם יקלוט אוור מאוזרים שונים של המקור שלא שומרים על יחס קבוע זה עם זה. במצב זה, התבנית שתתקבל על המסך תהיה מוטשטשת או לא תופיע בכלל משום שהגלים הפוגעים בנקודות שונות כבר לא נמצאים באותה הפאזה. תבנית ההתאבכות תישמר רק כל עוד הפרש הדרכים בין המסלולים מהէזוטות של מקור האור אל שני החריצים אינו חורג מאורך גל אחד. מכאן נגזר בקירוב הקשר הבא המהווה סוף לקוהרנטיות המרחבית:

$$(29) \quad \Delta x \leq \frac{\lambda R}{h}$$

כאשר:

$\lambda$  אורך הגל של המקור.

$R$  המרחק מהמקור למישור ההתאבכות. (הגלאי למשל)

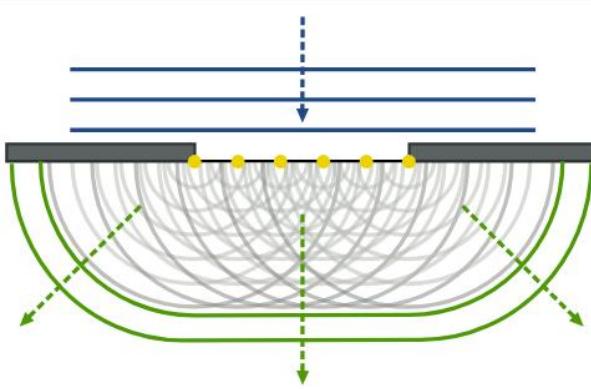
$h$  הרוחב האפקטיבי של המקור.

$\Delta x$  המרחק בין 2 נקודות.

## 2.5 עקיפה (Diffraction):

דיפרקטיה, או עקיפה, היא תופעה גלית בסיסית המתרחשת כאשר גל נתקל במכשול או עבר דרך מפתח צר. במקומות להמשיך בקו ישר בלבד, הגל מתפשט ומתרפזר בزواיות שונות, בהתאם לגבולות הגיאומטריים של המערכת. תופעה זו אינה ייחודית לאור, והוא קיימת גם בגלים קול, מים וחומר, אך באופטיקה היא מלאת תפקיד מכריע בתיאור התופעות של אור מקורות או עצמים מורכבים.

על ידי עקרון הוגנס (*Huygens' Principle*) הקובע כי כל נקודה על חזית גל מהוות מקור משני לפלייטה של גלים כדוריים קטנים. חזית הגל החדשה בנזקודה בזמן עתידי היא מעטפת הгалים המשניים הללו. גישה זו מאפשרת להבין כיצד גלים יכולים "לעקוב" מכוסלים או להתפשט לאחר מעבר דרך חרץ צר. בפרט, היא משתמשת כבסיס להסביר התבנית המורכבת שנוצרת לאחר התאבכות של גלים שמקורם באותו חזית גל – כמו בתבניות דיפרקטיה קלאסיות.



איור 5: עקיפה מסדק יחיד. [2]

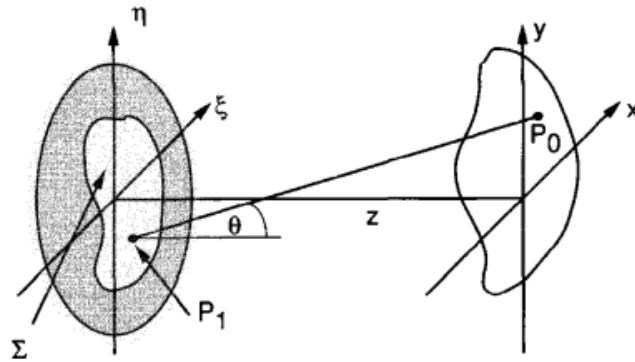
כדי לקבל ביטוי פשוט ו שימושי לתיאור עקיפה כאשר חזית הגל ממשיכה להתפשט לאחר פתח תוך שמיירה על השפעת העקומות של הגל נרצה לבצע קירוב למצב המתאים למרחקים סופיים בין הפתח לשימוש ה透視 (z) שהם גדולים יחסית לרוחב הפתח אך אינם גדולים מספיק כדי שנוכל להעתלם מהעקומות של חזית הגל (Near Field).

כאשר:

|                                  |   |                            |
|----------------------------------|---|----------------------------|
| קוordinטות על מישור המפתח        | - | $(x_s, y_s)$               |
| קוordinטות על המסר (מישור תצפית) | - | $(x_d, y_d)$               |
| המרחק על הציר האופטי             | - | $z$                        |
| מס' הגל                          | - | $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ |

המרחק  $z$  מתואר ע"י:

$$(30) \quad r = \sqrt{(x_d - x_s)^2 + (y_d - y_s)^2 + z^2}$$



איור 6: גיאומטריית הדיפרקטיה מהמפתח למישור התצפית. [6]

תחת הקירוב הפרקטי – ההנחה בקירוב פרנל, המרחק על הציר האופטי גדול ביחס לميدות המפתח:  $x_s, y_s \gg z$ . ובנוסף תחת התנאי ש- $z$  קטן מספיק כך שהחיצית הגל נשארת בקירוב כדורי:  $\frac{D^2}{\lambda} < z$  כאשר  $D$  הוא רוחב המפתח ולאורך הגל.

$$(31) \quad r \approx z + \frac{(x_d - x_s)^2 + (y_d - y_s)^2}{2z}$$

הביטוי הנ"ל נותן לנו חלק לינארי וחלק ריבועי הנובע מהתכונות של חזית הגל הядורי.

באופן כללי ההת庵בות נתונה ע"י:

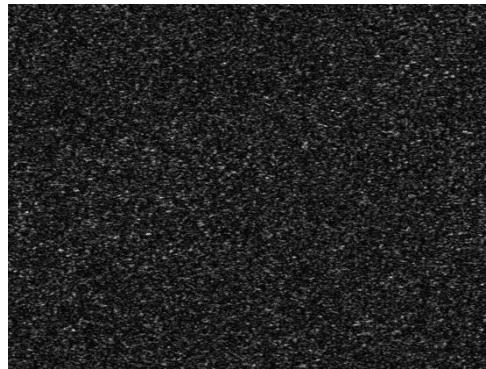
$$(32) \quad U(x_d, y_d) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{Aperture} U(x_s, y_s) \frac{e^{ikr}}{r} dx_s dy_s$$

נציב את הקירוב של  $r$  לתוך האינטגרל ונקבל:

$$(33) \quad U(x_d, y_d) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x_d^2 + y_d^2)} \iint_{Aperture} \{U(x_s, y_s) e^{i\frac{k}{2z}(x_s^2 + y_s^2)}\} e^{-i\frac{k}{z}(x_s x_d + y_s y_d)} dx_s dy_s$$

## 2.6 ספקלוס (Speckles):

כאשר אור לייזר מוחזר משטח מחוספס - ככלומר, זהה שבו שינווי הגובה גדולים ביחס לאורך הגל מתקבלת תבנית התאבכות אקראית של עצמות, הידועה בשם ספקלוס. תופעה זו נוצרת בשל השוני במרקח ובמבנה של הנקודות שעל פני המשטח, הגורם לכך שככל אзор פולט אור בפazaה שונה. בשדה הכלול שמתתקבל בנקודת ציפוי, נוצרת התאבכות רנדומלית בין כל הרכיבים, כתוצאה מהפרשי פazaה לא סדריים.



איור 7: דוגמא לתבנית ספקלוס שהתקבלה בניסוי שלנו.

במקרה של שדה ספקלוס אידיאלי, הפazaה בכל נקודה מתפלגת באופן אחיד בטווח  $[0, 2\pi]$ . פיזור זה גורם לכך שהפרש הפazaה בין גלים שמגיעים מאזורים שונים על פני המשטח אקראים ולכך התקבלת התבנית עצמה בלתי צפואה. כך מתקבלת התבנית "גרעינית" של כתמים בהירים וכחאים, שהמבנה שלה חוזר על עצמו רק כל עוד נשמרת גאומטריית המערכת.

העצמתה בתבנית הספקלוס מתפלגת בצורה אקספוננציאלית. פונקציית צפיפות ההסתברות לעצמה  $I$  היא:

$$P(I)dI = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{-\frac{I}{\langle I \rangle}} \quad (34)$$

כאשר  $\langle I \rangle$  היא העוצמה הממוצעת, בעוד העוצמה הסבירה ביותר היא אפס – ככלומר איזור כהה.

תבנית ספקלוס יכולה להיווצר בשתי דרכים עיקריות, בהתאם לאופן בו האור מגיע אל מישור הגלאי:

### 2.6.1 השיטה האובייקטיבית (Objective Speckle):

בגישה זו, קורן הלוייזר מוקרטת ישירות על פני משטח מחוספס, והתבנית נוצרת כאשר האור המפוזר מוחזר חזרה אל מישור ציפוי (מסך או גלאי) ללא כל רכיב אופטי ביןיהם. הפazaה של האור המשתקף משתנה בין נקודות שונות במשטח, ולכך התקבלת התבניות רנדומלית גם בלי שימוש בעדשות.

תדיירות הספקלוס (כמובן צפיפות הפסים או הנקודות) וגודלם תלויים בגודל האזור המואר ובמרקח מהובייקט לגלאי:

$$(35) \quad f_{Max} = \frac{2}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right) \approx \frac{L}{\lambda z}$$

כאשר  $L$  הוא רוחב האזור המואר על פני המשטח  $-z$  והוא המרחק מהאובייקט לגלאי כך  
שגודל הספקל יהיה  $d = \frac{\lambda z}{L}$ .

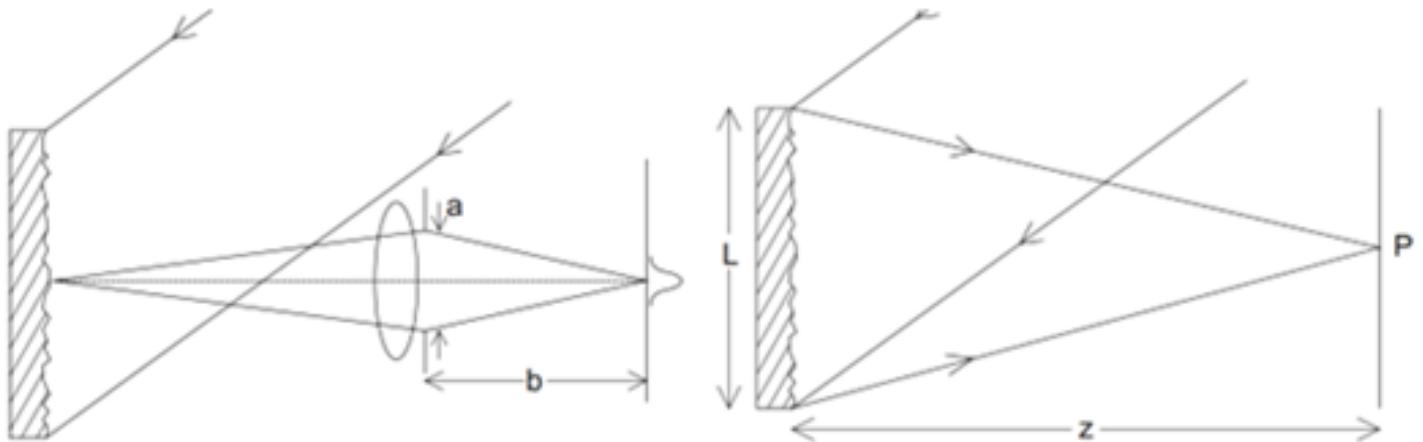
## 2.6.2 השיטה הסובייקטיבית (Subjective Speckle):

בשיטת זו, האור המפוזר מהאובייקט עובר דרך עדשה (או מערכת אופטית אחרת) לפני שהוא מוקן על הגלאי. הפוקוס של העדשה יוצר דמות של פני המשטח אך מאחר שככל נקודה על פני המשטח יוצרת הפרשי פазה שונים, תתקבל גם כאן תבנית ספקלס, רק שהתבנית יכולה תלויות במאפיינים האופטיים של המערכת.

התדריות המרחכית בתמונה המתתקבלת תהיה תלולה במפתח האופטי של העדשה  $a$  ובמראקים במערכת הגיאומטרית:

$$(36) \quad f_{Max} = \frac{2}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right) \approx \frac{a}{\lambda z}$$

כך שגודל הספקל במקרה זה הוא:  $d = \frac{\lambda z}{a}$



איור 8: מימין: יצירת התבנית ספקלס באמצעות השיטה האובייקטיבית. משמאל: יצירת התבנית ספקלס בשיטה הסובייקטיבית. [4]

בקשר של הולוגרפיה, אפקט הספקלס מופיע בעיקר בשני מצבים:

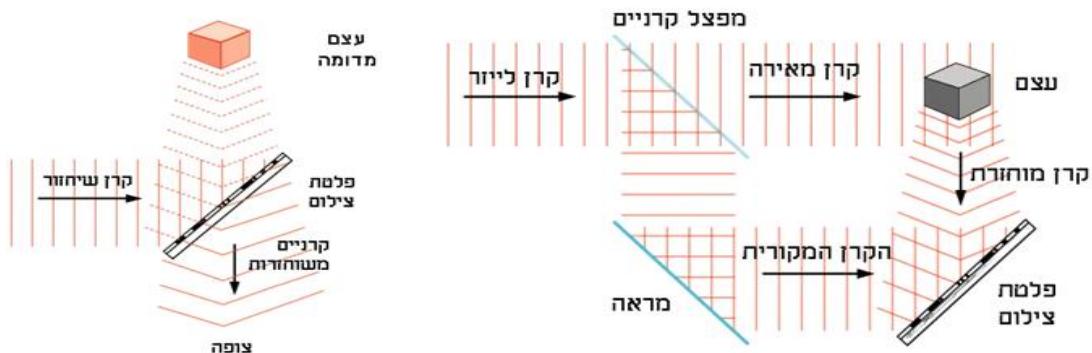
1. כאשר הgal חוזר מפני שטח מחווסף של עצם - מה שגורם לbildung התאבכות רועשת כבר בהקלטה.
2. כאשר יש רעדות קטנות, שינויים מיקרוסקופיים במקום העצם או חוסר יציבות מכנית בין חשיפות.

למרות שמדובר ברעש, בניית הספקל היא תוצאה דטרמיניסטית של תנאי המערכת, היא חוזרת על עצמה בדיק אם נשמרם כל התנאים הפיזיים (צורה, זווית, מוקור). מצד שני, שינוי קטן בזווית או מקום יגרום לשינוי משמעותי בתבנית, וכך ספקלס אינם נחשבים לרעש גאוסי רגיל, אלא לרעש בעל מבנה (structured noise).

## 2.7 הולוגרפיה (Holography):

במה שلنושאים הקודמים, הולוגרפיה מהוות יישום ישיר של העקרונות שתוארו – דיפרנציא, קוהרנטיות והتابכות לשם רישום ו恢חזר של חזית הגל המלאה של עצם פיזי. בנויגוד לשיטות הדמיה רגילים שמתעדות רק את עצמת האור, הולוגרפיה מאפשרת לשמור גם את המידע הפזי, וכך להשזר את שדה האור כלו.

לשם הקלטת הולוגרמה, יש צורך במקור אור קוהרנטי (בדרך כלל לייזר) אשר מוחלק לשתי קרניים נפרדות: קרן האובייקט, המכוננת לעבר העצם, וקרן הייחוס, המכוננת ישירות למישור המסר. הפריצול בין הקרניים נעשה באמצעות מפצל אלומה (beam splitter), כאשר הקרניים יכולות לעבור דרך מראות ועדשות להתאמת היכוונים והמרחקים. קרן האובייקט מוארת על גבי העצם כך שהאור המפוזר ממנו נושא עמו את המידע התלת-ממדי של חזית הגל. קרן זו פוגעת במישור המסר יחד עם קרן הייחוס, ויוצרת תבנית התבבות אשר מכילה את המידע המשולב – אמפליטודה ופaza של גל האור המקורי. התבנית שנרשמת על גבי החישון (או לוח הצילום) היא הולוגרמה. את השזרור ניתן לעשות ע"י הקרינה חוזרת של קרן הייחוס על גבי הולוגרמה או באמצעות גומרים.



איור 9: מימין: עקרונות צילום הולוגרמי ("הקלטה"). משמאל: עקרונות שחזור התמונה ("הקרינה"). [2]

נתאר את הקרן המוחזרת מהעצם (Object beam) וקרן הייחוס (Reference Beam) באמצעות האמפליטודות המركבות שלהן:

$$(37) \quad E_O(x, y) = a_O(x, y)e^{i\phi_O(x, y)} ; \quad E_R(x, y) = a_R(x, y)e^{i\phi_R(x, y)}$$

כאשר הקרניים מתאבכות במישור הגלי העוצמה הכוללת נמדדת היא:

$$(38) \quad I(x, y) = |E_O(x, y) + E_R(x, y)|^2 = E_R \cdot E_R^* + E_O \cdot E_O^* + E_O \cdot E_R^* + E_R \cdot E_O^*$$

החישון במערכת הולוגרפיה (למשל חישון CCD) אינו רגיש לשדה האלקטרומגנטי המרכיב עצמו, אלא רק לעוצמה של השדה הפוגע בו. כתוצאה לכך, המידע שמתתקבל בפועל אינו כולל את הפaza של הגל, אלא רק את ההשפעה הכוללת של השדה מבחינת צפיפות השדה.lopak.

עם זאת, ניתן לקשר את אמפליטודת המעבר של החישון המסומנת  $(y, x) h$  לעוצמה של השדה באמצעות ביטוי לינארי פשוט, בהנחה שהתגובה של החישון לינארית:

$$(39) \quad h; (x, y) = h_0 + \beta \tau I(x, y)$$

כאשר:

- $h_0$  - מייצג את אמפליטודת המעבר הבסיסית (DC), כלומר את רכיב הרקע שנרשם גם כאשר אין תבנית ספקל משתנה אלא רק תארה אחידה. בעת עיבוד נומרי של הholограмה, ניתן אף רצוי להחסיר רכיב זה (למשל על-ידי חיסור תמונה רקע או מסנן בתחום פורייה) על מנת לבדוק את רכיבי התאבכות המעוניינים ולשפר את השחזור של קרן האובייקט.
- $\beta$  – מוקדם ההמרה של החישון בין בעוצמה אופטית לתגובה חשמלית. (רגישות הgalai)
- $\tau$  – זמן החשיפה.

בעת שחזור הholограмה נכפיל את אמפליטודת הבמעבר באמפליטודה המרכבת של קרן הרפנסו:

$$(40) \quad E_R(x, y) \cdot h(x, y) = [h_0 + \beta \tau (a_R^2 + a_O^2)] \cdot E_R(x, y) + \beta \tau a_R^2 \cdot E_O(x, y) + \beta \tau E_R^2(x, y) \cdot E_O^2(x, y)$$

נגיד כעת כל רכיב במשווה 40 בצורה הבאה:

- $[h_0 + \beta \tau (a_R^2 + a_O^2)] \cdot E_R(x, y) \Leftarrow$  "איבר ה-DC". (רכיב רקע קבוע, סדר האפס)
- $\beta \tau a_R^2 \cdot E_O(x, y) \Leftarrow$  "התמונה הווירטואלית". (קרן האובייקט המשוחזרת)
- $\beta \tau E_R^2(x, y) \cdot E_O^2(x, y) \Leftarrow$  "התמונה האמיתית המשופרת" (התמונה המשמשת).

### In-line Holography 2.7.1

שיטת הholוגרפיה הקלאסית שהוצעה ע"י דניס גאבור, מבוססת על מערכת הקלטה על הציר (In-Line). בשיטה זו, קרן הייחוס וקרן האובייקט חולקות את אותן כיוון התקדמות, ואין מושבות זו ביחס זו. תבנית התאבכות בין שתי הקרןים נוצרת על גבי לוח צילומי או גלאי, אך מאוחר ואין הפרדה זוויתית ביןיהן, כל הרכיבים – הרקע (DC), הדמות הריאלית והדמota הווירטואלית – נמצאים באותו תחום תדרים ובאותו מקום מרחביו.

כחותה מכך, בעת השחזור (בין אם אופטית או נומրית), מתקבלות כל הדמיות בו-זמנית ונוצרות חיפויות ביןיהן. למטרות הפשטות של שיטה זו וההיסטוריה המשמעותית שלה, מערכת CCD היא-line-הו נחשב כימ פחות מתאימים להולוגרפיה דיגיטלית, בעיקר משום שימושם בצלמות CCD וגישה מואוד לרכיב ה-DC ולהיפויות בין דמיות. לשם שחזור אפקטיבי של חזית הגל נדרש לבצע סינון של רכיבים מסוימים – דבר שאינו מאפשר כאשר כל המידע מתלכד באותו תחום תדרים.

### Off-Axis Holography 2.7.2

כדי להתגבר על מגבלות שיטת הקלטה על הציר (line-in-ho) פותחה שיטת הholוגרפיה מחוץ לציר (axis-off). שיטה זו מאפשרת להפריד בין רכיבי התמונה במישור התדרים, ובכך לשחזור באופן נקי את המידע האופטי על האובייקט. עיקרון השיטה הוא הסטה זוויתית בין קרן האובייקט וקרן הייחוס: קרן הייחוס מופנית בזווית קטנה יחסית לקרן האובייקט, כך

שבעת ההתאבכות על גבי הגלאי נוצרות תבניות מוחזריות (פסים) בזווית קבועה, שקבועות תמידות ברורה.

בשל הזווית שנוצרת, כל אחד מהרכיבים בשחזר ממקום באיזור שונה במישור פורייה, כך שנייתן לסמן את הרכיב הרצוי (למשל את הדמות הוירטואלית) באמצעות פילטר תדרים פשוט ולבצע שחזר נומרי מדויק באמצעות טרנספורמציה פורייה הפוכה.

## 8.2 הולוגרפיה דיגיטלית:

הולוגרפיה דיגיטלית מהווה את התפתחות המודרנית של עקרונות ההולוגרפיה הקלאסית, תוך מעבר משימוש בלוחות צילום כימיים למערכות מבוססות חישנים דיגיטליים (כגון מצלמות CCD ו-CMOS) ועיבוד נומרי ממוחשב. השיטה מאפשרת הקלטה, ניתוח, שחזר של חזית הגל של עצם תלת-ממדי באופן דינמי, גמיש וללא צורך ברכיבים אופטיים נוספיםים בשלב השחזור. בדומה להולוגרפיה הקלאסית, גם כאן נהשכת תבנית התאבכות בין קרן האובייקט (האור המוחזר מהעצם) וקרן היחס (אל לייזר ידוע). אולם בניגוד לשיטות צילום מסותתיות, תבנית התאבכות מוקלטת ישירות באמצעות מצלמה דיגיטלית, כתמונה דו-ממדית. תבנית זו נשמרת כקובץ נתונים, ונitin לנתחה באמצעות אלגוריתמים חישוביים כדי לשחזר את שדה האור המקורי.

נכתב שוב את השדה הנוצר באמצעות אינטגרל פרנלי עם הפרמטרים להולוגרפיה:

$$(41) \quad \Gamma(\epsilon', \eta') = \frac{i}{\lambda} \iint h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right\}}{\rho'} dx dy$$

כאשר:

- $h(x, y)$  - הולוגרמה שנמדדה - העוצמה במישור החישן. בשחזר נומרי, ניתן לפצות על הזווית בין קרן הרפרנס לקרן האובייקט ע"י הכפלה בפazaה לינארית מהצורה:  $e^{-ikxsin(\theta)}$  שתבזבז את שדה האובייקט המשוחזר.
- $E_R(x, y)$  - שדה קרן הרפרנס ונתיחוס לגלים בקירוב כימיוריים:  $E_R = E_R^* = a_R$ .
- $\rho' = \sqrt{(\eta' - y)^2 + (x' - x)^2}$  הוא המרחק בין נקודה במישור ההולוגרמה לבין נקודה במישור השחזור.
- $\exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right\}$  - אפקט הפaza המתקבלת כתוצאה מהמרחק האופטי.

## 2.8.1 השזרה הnumerical של הholוגרפיה:

על מנת לישם את הholוגרפיה הדיגיטלית נctrיך לקודד תוכנה שתבצע שזרה Numerical למשוואת פרנל-קירכהוף. נבצע מספר קירובים כפי שעשינו בפרק 2.5 (ובנויו קודם - התמרת פורייה מרחבית) כך שכאשר נציב  $\frac{\epsilon'}{\lambda d} = u$  ו-  $\frac{\eta'}{\lambda d} = v$  באינטגרל מהצורה של טרנספורמציה פרנל (33) נקבל:

$$(42) \quad \Gamma(\epsilon', \eta') = \frac{i}{\lambda d} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}d} e^{-i\pi\lambda d(v^2+u^2)} \iint h(x, y) E_R(x, y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)} e^{-i2\pi(xv+yu)} dx dy$$

ונכל לשים לב שהaintגרל הנ"ל הוא למעשה מהצורה של טרנספורם פורייה:

$$(43) \quad \Gamma(\epsilon', \eta') = \frac{i}{\lambda d} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}d} e^{-i\pi\lambda d(v^2+u^2)} \cdot \mathcal{F}\{h(x, y) E_R(x, y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)}\}$$

מןנו נוכל לחוץ את העוצמה ע"י הקשר:

$$(44) \quad I(\epsilon', \eta') = |\Gamma(\epsilon', \eta')|^2$$

ואת הפaza ע"י:

$$(45) \quad \phi(\epsilon', \eta') = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{\Gamma(\epsilon', \eta')\}}{\text{Re}\{\Gamma(\epsilon', \eta')\}}\right)$$

בholוגרפיה דיגיטלית פונקציית holוגרפיה  $(y, x) h$  נדגמת ע"י ריבוע מגודל  $N \times N$  כשההפרש בין כל תא בריבוע הוא ההפרש בין פיקסלים במצלמה כך שנקבל סכום דיסקרטי (דיגיטציה) של פונקציית  $\Gamma$ :

$$(46) \quad \Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}d} e^{-i\pi\lambda d\left(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l) E_R(k, l) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)} e^{-\frac{i2\pi}{N}(km + ln)}$$

כאשר:  $\Delta y = \frac{1}{N\Delta u} = \frac{\lambda d}{N\Delta\eta}$ ,  $\Delta x = \frac{1}{N\Delta v} = \frac{\lambda d}{N\Delta\epsilon}$  וקיבלנו למעשה טרנספורם פרנל ביד.

אחד ההיבטים הפיזיקליים המהותיים של holוגרפיה הוא שזמן הקלטת holograma, תבנית ההתאבכות שנוצרת בין קרן האובייקט לקרן הייחוס נשאת את המידע של חזית הגל המורכבת כולל פaza, עוצמה וזווית התקדמות אך שומרת אותו בצורה מרחבית פרוסה. המשמעות היא שמיידע על כל נקודה באובייקט מתפזר על פני כל אזור holograma, ואין נרשם באופן לוקאלי.

הסיבה לכך נועוצה בטבעו של שדה דיפרקטיבי מתאבר - כל נקודה על גבי ההולוגרמיה מקבלת תרומה מכל הנקודות באובייקט דרך השדה - זהו ביטוי לעקרון היוגנס-פרנל, שלפיו כל נקודה על גבי חזית הגל מתפקדת כמקור משני. בעת השחזר (בין אם אופטית ובין אם נומריית), שדה זה משוחזר באמצעות אינטגרל הדיפרקטיה של פרnell, ולכן כל פיקסל בהולוגרמיה תורם לרכיבים רבים של השדה המשוחזר.

באופן מתמטי, כאשר ההולוגרמיה מוקלטת ונעשית עליה טרנספורמציה פורייה, מתקבלים "פיקים" בתדרים שמצביעים את מידע השחזר. גם אם נבצע חיתוך (cropping) בתמונה, ככלומר נותר על חלק מהפיקסלים עדין ניתן לבצע FFT ולשחזר את הדמות, כי התחום במישור פורייה יכול את אותם תדרים, אך ברזולוציה ירודה יותר (בשל מגבלות של קוטר ההורוגרמיה bandwidth limitation).

## 2.9 הפחיתת רכיב ה-DC:

בעת צילום הולוגרמיה, תבנית ההתאבכות הנרשמת בגלאי כוללת 3 רכיבים כפי שהראנו במשוואה 40. הרכיב קבוע המושפע מהעוצמה הכללית של הקרניים נקרא רכיב ה-DC כלומר Direct Current והוא מופיע כאמור אחידה במרכז התמונה, הן בתמונה המרחביות והן בתחום פוריהו אותו נרצה למזער ככל הנימן מכיוון:

- עלול להסתייר את העצם שאנו מנוטים לטעוד באמצעות ההולוגרפיה ע"י מלבן לבן שמוספי בתמונות שגם יכול לגרום לרוייה (saturation) של פיקסלים בגלאי.
  - מוסיף רקע בהיר שמחליש את הניגודיות בתמונה המשוחזרת.
  - מקשה על עיבוד נומי מדויק של הרכיב הוירטואלי.
- נשים לב שעפ"י המשוואה לעוצמה שראינו קודם:

$$(47) \quad I(x, y) = |E_R(x, y) + E_O(x, y)|^2 = a_R^2 + a_O^2 + 2a_R a_O \cos(\phi_O - \phi_R)$$

2 האיברים הראשונים הם שגורמים לייצור איבר ה-DC בשלב השחזרה בעוד האיבר השלישי משתנה בהתאם לסוג ההתאבכות. נרצה להפחית את השפעת 2 האיברים הראשונים:

### 2.9.1 חיסור העוצמה הממוצעת:

ונכל לחשב את העוצמה הממוצעת של כל הפיקסלים בגלאי:

$$(48) \quad I_m = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k\Delta x, l\Delta y)$$

ועל מנת למזער את השפעת 2 האיברים הללו נוכל לחסור את הממוצע מהעוצמה הכללית:

$$(49) \quad I_{num}(k\Delta x, l\Delta y) = I(k\Delta x, l\Delta y) - I_m(k\Delta x, l\Delta y)$$

### 2.9.2 חיסור תמנונת הרקע:

בשלב הצילום, נצלם תמונה נוספת של קרן הייחוס בלבד (לא האובייקט). תמונה זו מייצגת את רכיב ה-DC והעוצמה הקבועה של הקラン. חיסור נקודתי של תמונה זו מההולוגרמיה שצולמה עם האובייקט מבטלת את הרקע הקבוע:

$$(50) \quad h_{new}(x, y) = h(x, y) - h_{ref}(x, y)$$

### 2.9.3 סינון תדרים מרחבי (Fourier Domain Filtering):

אחת השיטות הנפוצות והיעילות להפחיתת רכיב ה-DC בהולוגרפיה דיגיטלית מבוססת על ניתוח הסיגナル למרחב התדרים, באמצעות טרנספורמציה פוריה דו-ממדית. תהליך זה מבוצע ישירות על הhologramma ומנצל את העובדה שתמונה – ובפרט תבנית ההתאבכות – ניתנת לייצוג כצירוף של תדרים מרחביים אופקיים ואנכיים.

בעת ביצוע FFT על הholограмה ( $y, x$ )  $\hat{h}$  מתתקבל ייצוג תדרי ( $t, u$ )  $H$  שבו רכיב ה-DC מופיע במרכז מישור פורייה, הדמות סמוכה לו והדמות הוירטואלית מופיעה באזוריים מוסט'י תדר עקב השימוש בשיטת *axis-off*. מכיוון שרק הדמות הוירטואלית מכילה את המידע הפאזי הדרוש לשחזור, נוכל לבדוק אותה על-ידי הפעלת מסנן תדרים מרחבית (spatial frequency mask) שמנטרל את האזור המרכזי שבו נמצא רכיב ה-DC, תוך שמירה על הרכיב הרצוי בלבד. **סוגי הפילטרים:**

- Low-Pass Filter – מעביר תדרים נמוכים ומסיר את הגבוהים.
- High-Pass Filter – מעביר תדרים גבוהים.
- Band-Pass Filter – מאפשר לחדך טווח תדרים תוך סינון שאר הרכיבים.

אם כי השימוש בפילטרים מתאים במיוחד למינוח לשיטת *axis-off* שבה הרכיבים מופרדים היטב בתחום פורייה ומובצע כולם באמצעותDigitzation – ללא צורך בחישופות נוספות השימוש בהם צריך להיות זהה ודורש בחירה נכונה של סוג וגודל הפילטר אחרית עשי' לדכא תדרים נמוכים חשובים אם נחצר אזור גדול מדי.

## 2.10 חיישן ה-CCD (Charge-Coupled Device)

חיישן CCD (התקן צימוד מטען) הוא רכיב צילום אלקטרוני-אופטי רגיש לאור המשמש להמרת קרינה אלקטרומגנטית (בעיקר בתחום האור הנראה) לאות חשמלי, ומכאן – לדימות דיגיטלי. חיישנים מסוג זה מצויים בשימוש נרחב במערכות הדמיה מדעיות, ובפרט מהווים את הרכיב הקרייטי בהולוגרפיה דיגיטלית. תפקידו הוא לרשום את תבנית התאבקות בין קרן האובייקט לבין הייחוי, ולהמיר אותה לפולט דיגיטלי הנitin לעיבוד ממוחשב.

פנוי חיישן ה-CCD מחולקים למטריצה דו-ממדית של אזורים פוטורצפטיביים רגיסרים לאור, הידועים בשם פיקסלים. כל פיקסל הוא למעשה באר פוטנציאלי מקומי בחומר מוליך למתחה (לרוב סיליקון), בה ניתן לכלא מטענים חשמליים. כאשר פוטון בתחום התדרים המתאים (למשל אור נראה) פוגע בפיקסל, הוא עשוי להיבלו בתוך שכבת הסיליקון ולגרום ליצירת זוג אלקטרוני-חוור, בתנאי שאנרגיית הפוטון גבוהה יותר מרוחב הפער האנרגטי של החומר. תהליך זה ידוע כ-האפקט הפוטואלקטרי הפנימי.

1. האלקטרון החופשי נלכד בbaar הפוטנציאלי המקומי של הפיקסל, בעוד שהחומר מנוטרל ואין משתתף במידיה.
2. במהלך החשיפה, פיקסל שמאור באופן מתמשך אגור אלקטרוניים בכמות פרופורציונית לעוצמת הקרינה הפוטונית שנקלטה בו.
3. בתום החשיפה, המטענים הנאגרים מועברים שורה אחר שורה למעגלים חשמליים נוספים המשמשים לקריאה, בתהליך הקרי צימוד מטען (Charge Coupling), עד להמרת אנלוגית-לדיגיטלית.
4. כל פיקסל מתרגם לערך מסוים יחיד, המתאר את עצמת האור הממווצעת שנקלטה בו לאורך זמן החשיפה. ברוב המערכות, ערכים אלה מיוצגים בטווח 0–255 (8 ביט), או בטווחים מדוייקים יותר במלומות מדעיות (כגון 12–16 ביט).
5. האות הדיגיטלי המתתקבל מייצג למעשה את עצמת השدة בריבוע, ככלומר:  $\langle |E(x, y, t)|^2 \rangle \propto I$  ולא מידע ישיר על הפאזה.

היבט פיזיקלי חשוב נוסף במבנה חיישן CCD הוא הקשר בין גודל הפיקסל לבין הזווית המקסימלית של גל אור שמערכת ההקלטה יכולה לדגום ולשזר באופן נאמן. לאחר שההולוגרמיה הדיגיטלית נרשמת כdagma מרחבית של שדה האור, קיימת מגבלה עקרונית על התדר המרחבי המרבי שנייתן ליצג ללא איבוד מידע. התדר הגובה ביותר שאפשר לדגום הוא:

$$(51) \quad f_{max} = \frac{1}{2\Delta x}$$

כאשר במשוואה זו  $\Delta x$  הוא המרחק בין שני פיקסלים צמודים – כולם גודל הפיקסל בכיוון האופקי (ובאופן דומה עד בכיוון האנכי). מכאן נגזרת מגבלה נוספת של גיאומטרית המערכת על הזווית  $\theta$  שמתארת את זווית ההיסטה בין ציון התקדמות של קרן היחס לבין ציון התקדמות של קרן האובייקט בעת פגיעתן במישור הגלאי – **הזווית המקסימלית של גל פוגע שיכול להיקלט ע"י החישן**:

$$(52) \quad \theta_{max} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta x}\right) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x}$$

נחשב כעת את **הזווית המקסימלית במערכת הניסוי**:

$$\bullet \text{ אורך הגל בלייזר בו השתמשנו.} \\ \bullet \text{ גודל הפיקסל בצלמת LUCID TRI122S.}$$

$$(53) \quad \theta_{max} \approx \frac{632.8 \times 10^{-9}}{2 \times 1.85 \times 10^{-6}} = \frac{632.8}{3700} \times 10^{-3} \approx 0.171 [rad]$$

ובמעלות:

$$(54) \quad \theta_{max} \approx 0.171 \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \approx 9.8^\circ$$

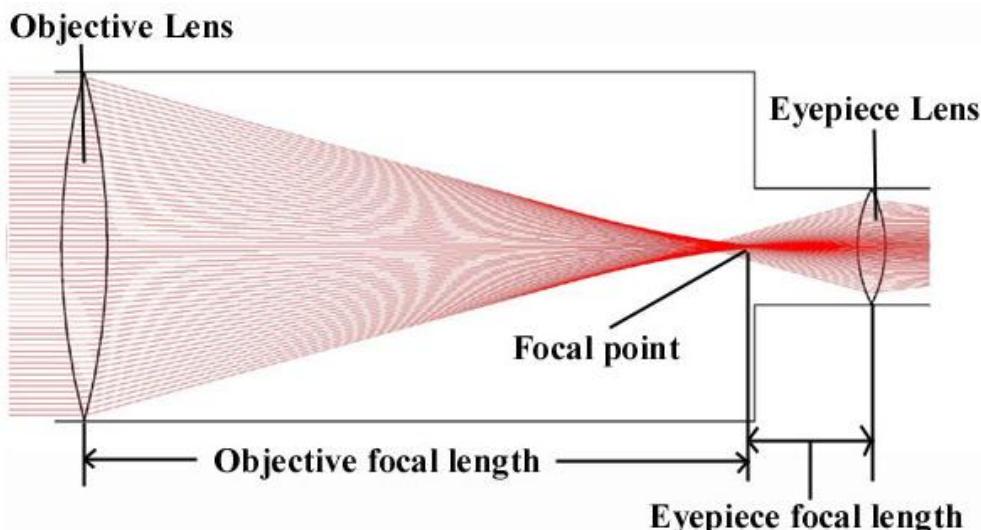
## 2.11 הגדלה אופטית וטלסקופ:

במערכת הholוגרפיה הדיגיטלית, נדרש להאריך את האובייקט כלו באמצעות קרן לייזר מתרפשת ורחבה ככל האפשר. לצורך כך נעשה שימוש במערכת טלסקופית הפוכה, המורכבת משתי עדשות מרכזיות, שתפקידה לבצע הגדלה אופטית של חזית הgal – כלומר, להרחבת אלומה ולשמור על איחודות מרחבית. עקרון ההגדלה נובע מחוקי האופטיקה הגאומטרית, כאשר גודל הדמות ביחס לגודלו המקורי מוגדר באמצעות מקדם ההגדלה:

(55)

$$M = \frac{u}{v}$$

- $u$  – מרחק הדמות מהעדשה.
- $v$  – מרחק העצם מהעדשה.



איור 10: עקרון פועלות הטלסקופ להגדלה. [1]

במערכת טלסקופית, נרצה לעשות שימוש בשתי עדשות:

- *Objective Lens* – בעלת אורך מוקד ארוך  $f_1$ , ממוקמת קרוב למקור ואחריות לייצירת דמות הביניים.
- *Eyepiece Lens* – בעלת אורך מוקד קצר יותר  $f_2$ , ממוקמת אחרת ומבצעת את ההגדלה הסופית.

ההגדלה הכוללת של המערכת מחושבת לפי היחס בין אורכי המוקד:

(56)

$$M_{tot} = \frac{f_1}{f_2}$$

## 2.12 הרכיבים במערכת הניסוי:



- $\lambda = 632.8 \text{ [nm]}$
  - $P = 15.0 \text{ m[W]}$
  - Beam Diameter = **HeNe** 0.70 [mm]
  - $L_c \approx 30 \text{ [cm]}$
- {1} לייזר



- Pixel Size:  $1.85 \times 1.85 \text{ [\mu m}^2\text{]}$
  - Resolution:  $4024 \times 3036$
- {2} מצלמה  
LUCID TRI122S-M



- סט חדש.
  - מראות.
  - מפצל אלומה (פריזמה).
  - מקבטים להנחתת עוצמה.
  - סטנדים, זרועות וכו'.
- {3} רכיבים אופטיים

טבלה 1: הרכיבים הכלולים במערכת הניסוי. [1, 5]

## 2.13 יישומים להולוגרפיה:

הholוגרפיה דיגיטלית הפכה לטכנולוגיה מרכזית במחקר שבין מדעי החיים, הנדסה ודיםות רפואי מתקדם. פיתוחים עכשוויים כוללים מערכות holוגרפיה בזמן אמת הנשענות על מצלמות מהירות ויחידות עיבוד גרפיות (GPU), המאפשרות מעקב תלת-ממדי דינמי אחר

תאים וזרים ביולוגיים – לדוגמה בעבודות של Marquet et al., Nature Photonics (2020) בתחום Digital Holographic Microscopy. במכשור קליני, חברת Holoxica ו- RealView Imaging הישראלית פיתחה מערכת להקרנת holוגרמות רפואיות צפות בזמן אמת, המספקות לרופאים תצוגה תלת-ממדית של הלב ובנים אנטומיים במהלך צנטורים וניתוחים (Nature Biomedical Engineering, 2020). בתחום המיקרואופטיקה, נעשה שימוש בטכניקות holוגרפיות לצורכי תכנון וייצור של רכיבים שטוחים במיוחד – כמו עדשות שטוחות או משטחים מבנים – שמאפשרים לשנות באופן מדויק בצורה שבה שדה האור מתרפש. טכנולוגיות אלה משמשות בין היתר במערכות לייזר, חיישנים אופטיים ותקשות מהירה מבוססת אור (Genevet et al., Science, 2017).

### **3. ניסוי (1): בניית ו��ול המערכת לשחזר הholограмמה**

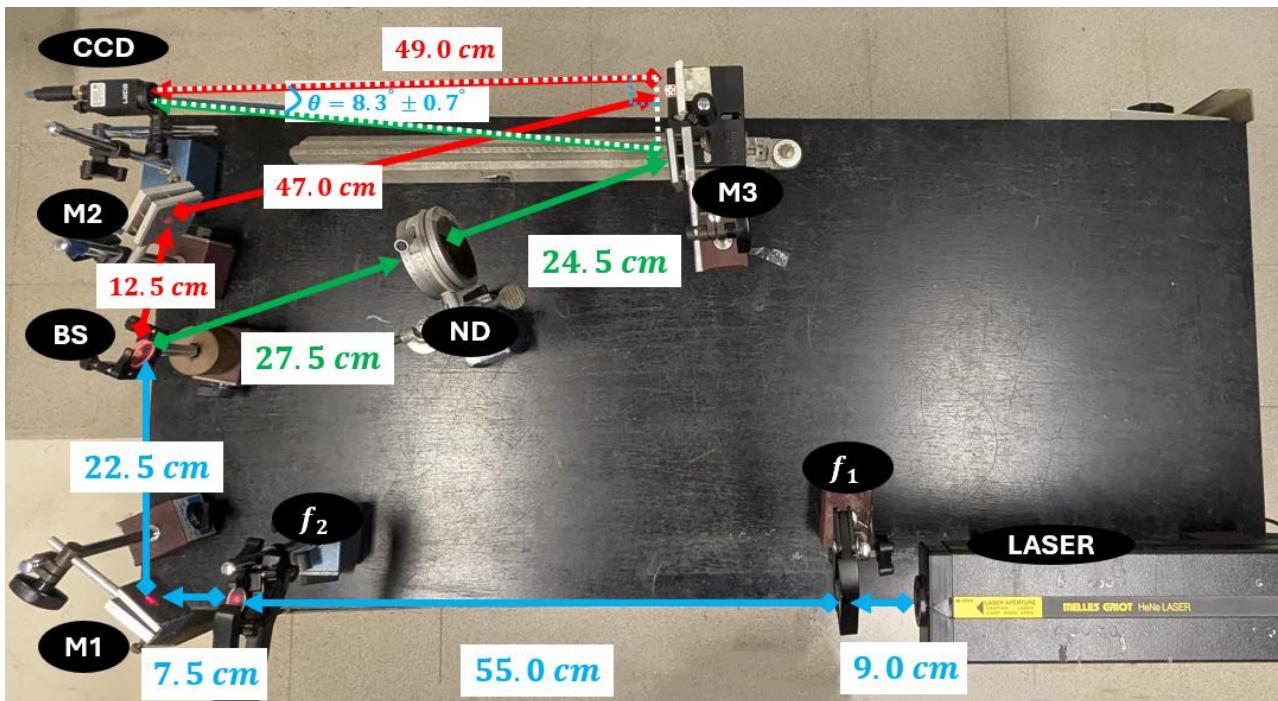
#### **3.1 מטרת הניסוי:**

- בניית מערכת הולוגרפיה בשיטת off-axis.
- הבנת המגבילות הגיאומטריות והאופטיות של המערכת. (זווית, מרחק, ררוית החישון)
- ביצוע עיבוד נורמי עד לקבלת שחזור תמונה הולוגרפית.

#### **3.2 מערכת הניסוי:**

##### **הצידם בניסוי:**

- לייזר HeNe, אורך גל  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  וקוהרנטיות  $L_c \approx 30 \text{ cm}$ .
- זוג עדשות בעלות אורך מוקד:  $50 \text{ mm}, 500 \text{ mm}$ .
- 3 מראות, מפצל אלומה - Crossed Polarizers Filter.
- מצלמת M-TRI122S LUCID.
- מעמד עליון מונח העצם הנמדד.



איור 11: מערכת הניסוי הראשונית [1].

##### **תיאור המערכת:**

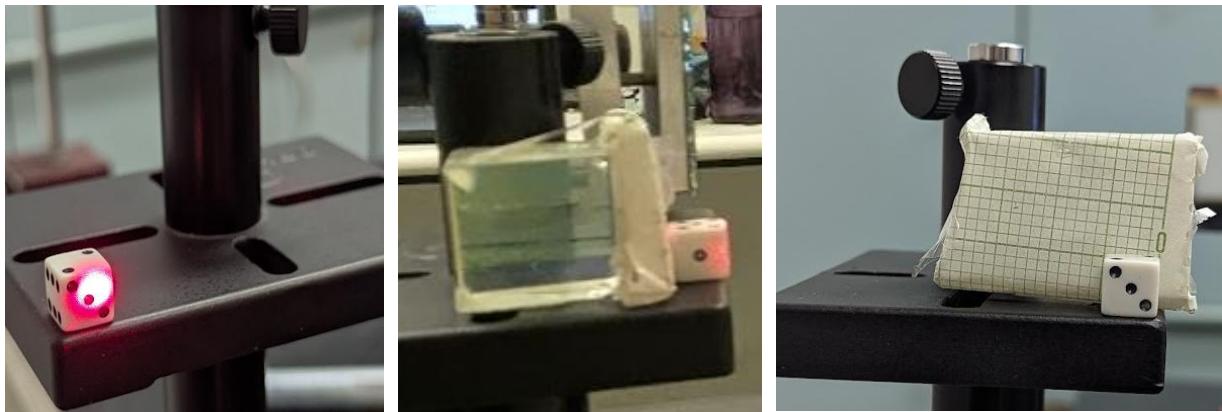
1. קרן הליזר יוצאה מהלייזר.
2. אלומת הליזר מופנית למערכת טלסקופית המורכבת מזוג עדשות לצורך הגדלת האלומה על ידי [נוכחות 56](#). וזאת על מנת לאויר שטח גדול ככל הניתן מהאובייקט.

$$M = \frac{f_2}{f_1} = \frac{500}{50} = 10$$

יחס ההגדלה האופטית של האלומה הוא 10.

3. האלומה המוגדלת מוסetta באמצעות מראה שטוחה (M1) אל תוך מפצל הקרניים (BS).

4. הקן העוברת דרך המפצל מוגדרת כ-קן האובייקט (**object beam**) והקן המוחזרת מוגדרת כ-קן הייחוס (**reference beam**). למפצל הקרנויים יחס העברה של 1:9.
5. **קרן הרפרנס:** מונחתת באמצעות פילטר המורכב מזוג מקטבים מסותובבים (מסומן באירור כ-ND). ע"י שינוי זווית הסיבוב בין שני המקטבים ניתן לשלוט על עצמתה קרן הליזר המועברת עפ"י חוק מאלוֹס:  $I_0 \cos^2(\theta) = I$  כך שאפשר יהיה להמנע מרווה של חישון ה-CCD אליו. הקן מושתת מיד לאחר ההנחתה באמצעות מראה נוספת.
6. **קרן האובייקט:** מושתת באמצעות זוג מראות כך שתפגע בעצם ותווך ממנו אל החישון.
7. לצורך יישור ומדידה הונח מאחור העצם נייר מיקרומטרי. בנוסף, הנייר עשוי לעזור במניעת החזרים לא רצויים לחישון.



איור 12: האובייקט מזוויות שונות, עם ולא הנייר המיקרומטרי. [1]

8. העצם הנבחר לצילום הוא קופיית משחק סטנדרטית באורך צלע של 1 ס"מ. צולמה הפאה הנושאת את הספרה 3, משום שצורתה אינה סימטרית לשיקופים או סיבובים – כך שככל טעوت בשחזרה תتبטה מיד בהיפוך או סיבוב שגוי של הדמות.
9. שתי הקרנויים מגיעות אל חישון ה-CCD כאשר ביןיהם קיימת זווית  $\theta$  במישור החישון.

#### מדידות וגיאומטריה המערכת:

בהתליך בניית המערכת ניסו מספר תצורות גיאומטריות שונות של סידור הרכיבים האופטיים, תוך בחינת איצות תבניות התארכות והיציבות המכנית של המערכת. המבנה שתואר לעיל נמצא כיעיל ביותר בשלב הראשוני, אם כי מספר שיפורים ישמו בניסויים העוקבים.

כל מדידות המרחוקים בין הרכיבים (כגון בין מקור הליזר, העדשות, האובייקט והgelai) בוצעו באמצעות סרגל מתכת וסרט מדידה רגיל, ברוחולזיות מדידה של  $mm$ . א-הוואדיות במדידות אלו נבחרה להיות  $0.5cm \pm 0.5cm$  לכל אורך שנמדד ממספר סיבות:

- חוסר תיעוד של כל המדידה – לא ביצעו רישום מדוייק באילו מהמדידות בוצע שימוש בסרגל המתכת הרגיל ובailio נעשה שימוש בסרט המדידה. מכיוון שהסרט המדידה יש גמישות מסוימת שעלולה להשפיע על הדיוק ומרבית המדידות בוצעו לא על גבי משטח יציב אלא בין רכיבים הוחלט להחמיר בהערכת א-הוואדיות.
- קשיי בזיהוי נקודות ייחוס מדוייקות – בחלוקת מהמדידות בהן היה צורך למשל לקבוע את מיקום החישון במלמה ולבצע מדידה ממנו או בקביעת המרחק בציר של פילטר הנחתת קרן הרפרנס היה קשיי לקבוע את נקודת ההתייחסות המדוייקת.

במהלך הרכבת המערכת נעשה ניסיון לבצע יישור של אלומת הליזר ביחס לציר העבודה. לצורך כך נעשה שימוש בפלס סטנדרט, לבדיקת יישור הרכיבים האופטיים ביחס לשולחן האופטי

שבמעבדה, עברו אותם רכיבים שבהם הדבר התאפשר מבחינה מכנית. למרות מגבלות מסוימות במנגנון הקיבוע והכיוון התקבלה אלומה עם סטייה מינימלית.

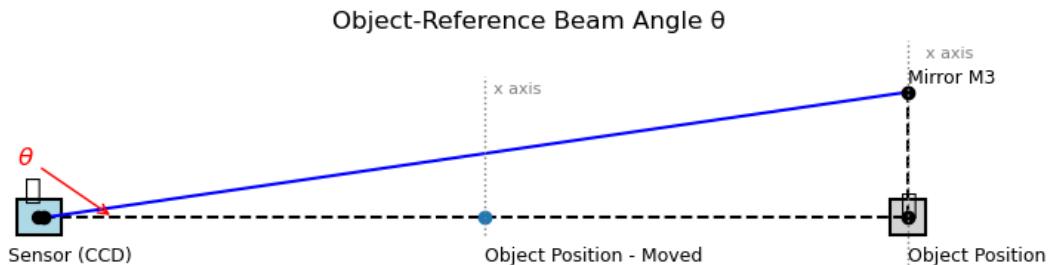
לצורך קביעת הזווית  $\theta$  בין קרן הרפרנס לקרן האובייקט (במישור החישון), נעשה שימוש במדידה גיאומטרית פשוטה שהتبססה על מיקום היחס של רכיבי המערכת. קרן הרפרנס מוחזרת מראה המסוונת C-3M, ומכוonta ישירות אל מרכז חישון ה-CCD. קרן האובייקט, לעומת זאת, נשלחת מהאובייקט המונח על הבמה הנידת אשר מותקנת על המסילה האופטית שמוסצת ממלול לחישון. הבמה ניתנת להזזה לאורך ציר Z כך שמרחק האובייקט מהחישון משתנה בהתאם לצורכי הניסוי. המדידה בוצעה באופן הבא:

- נמדד המרחק האופקי (נסמן כ- $\Delta$ ) בין מראה M3 לבין המסילה האופטית שעלה הונחה הבמה.
- נמדד המרחק  $Z$  בין האובייקט לחישון בכל ניסוי, אולם חישוב הזווית מתבסס על מדידה אחת בלבד של  $\Delta$  בשלב זה מכיוון שאז  $\theta$  נשמרת קבועה ואינה תלויה במיקום הרגעי של האובייקט במשולש ישר-הزوית שנוצר. את הזווית  $\theta$  נחשב לפי הקשר הטריגונומטרי:

$$(57) \quad \theta = \arctan\left(\frac{\Delta x}{\Delta z}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = \arctan\left(\frac{7.1}{49}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = 8.3^\circ$$

ואין הודהות:

$$(58) \quad \delta\theta \approx \left|\frac{\partial\theta}{\partial x}\right| \cdot \delta x + \left|\frac{\partial\theta}{\partial z}\right| \cdot \delta z = 0.66^\circ$$



איור 13: הגיאומטריה העיקרית במערכת [1].

לאחר שחושבה הזווית בין קרן הרפרנס לקרן האובייקט על סמך מיקומי הרכיבים במערכת, נרצה לוודא כי הערך המתkeletal אינו חורג מהמגבלה המותרת להפרדת תחומי התדר בהולוגרפיה בשיטת off-axis. כפי שמוסבר בפרק התיאורטי (גlossary 52) הזווית המקסימלית בין הקרניזים ניתנת בקירוב ע"י:

$$(59) \quad \theta_{max} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta x}\right) \approx \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta x} = 9.8^\circ > \theta_{experiment_1} = 8.3^\circ \pm 0.7^\circ$$

מכאן שהמערכת עומדת בתנאי הזווית המקסימלית.

נשים לב כי ישנו תנאי נוסף בו המערכת שלנו צריכה לעמוד - במערכת ה-off-axis שנבנתה, קרן האובייקט וקרן הרפרנס עוברות בדרכים שונות עד שהן נפגשות במישור החישון. כדי להבטיח היוצרות תבנית התאבכות יציבה, הפרש הדריכים האופטיות (Optical Path Difference, OPD) בין המסלולים חייב להיות קטן מאורך הקוורנטיות של הליזר. בהתאם לנתוני היצן כפי מופיע בחולץ 2.4.1 בפרק התיאורטי אורך הקוורנטיות של הליזר הוא בקירוב  $L_c \approx 30 cm$ .

אורך המסלולים האופטיים:

$$L_{obj} = 195.0 \pm 1.3 \text{ cm} \quad \bullet$$

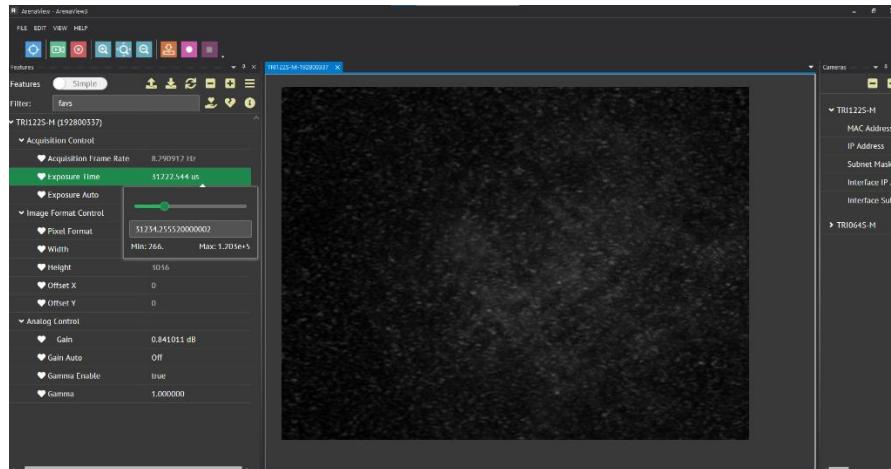
$$L_{ref} = 203.0 \pm 1.3 \text{ cm} \quad \bullet$$

הפרש הדריכים:  $|L_{ref} - L_{obj}| = |203.0 - 195.0| = 8.0 \pm 1.9 \text{ cm}$

הפרש הדריכים האופטיים נשאר קטן משמעותית מאורך הקוורנטיות של הליזר. لكن, מובטחת קוורנטיות מרחביות מספקת בין הקרניים המתקדמות, והמערכת צפיה לייצר תבנית התארכות.

### 3.3 מהלך הניסוי:

- בחירה זמן חשיפה (Exposure Time):** לצורך קביעת זמן החשיפה המתאים בצילום, השתמשנו בתוכנת Arena View שמספקת עם מצלמות LUCID. באמצעות מצב Live View שבתוכנה ניתן לצפות בתמונה בזמן אמת ולבצע כיוול יידי של הparameter ExposureTime תוך בקרה ויזואלית מיידית על התוצאה. המטרה הייתה למצוא את זמן החשיפה הארוך ביותר שמספק תמונה מוארת וברורה, ללא רזואה. ככלומר, חישבנו את הגבול שבו פרטים בתמונה מתחלים להיעלם – למשל כאשר אזורים בהיקם מתחזגים ונבלעים לבן ואינם ניתנים להבחנה מהמבנה הסובב אותם. זמן החשיפה נקבע מחדש עבור כל מדידה שביצענו בה המערכת עברה שנייה – למשל כאשר המרחק Z בין האובייקט לחישון קטן יותר עצמת ההחזר של קרן האובייקט תהיה גדולה יותר וכך שbowצעו התאמות לזמן החשיפה.



.איור 14: כיוול זמן החשיפה בתוכנת-h-wArena View

- צילום תמונה הholограмה (O+R):** צולמה תמונה הולוגרמיה הכוללת את קרן האובייקט וקרן הרפרנס גם יחד.
- צילום תמונה האובייקט בלבד (O):** בוצעה חסימה של קרן הרפרנס (באמצעות כיסוי זמני של המראה M3 במסלול הרפרנס), וצולמה תמונה של האובייקט בלבד.
- צילום תמונה הרפרנס בלבד (R):** באופן דומה בוצעה חסימה של קרן האובייקט ע"כיסוי זמני של המראה M2.
- עיבוד התמונות ע"י "ישום השחזור באמצעות נומרים.**

לצורך יישום מטרת תות-ניסוי זה (שחזר תמונה הולוגרפית) נתייחס לשחזר בכמה אופנים:

1. יישום האלגוריתם לשחזר תמונה הולוגרפית – שחזר הולוגרפית בפועל.
2. בדיקת איות הת庵בות, איות התמונה וניתוח המערכת הפיזיקלית.

### 3.4 תוצאות הניסוי ועיבודן:

#### 3.4.1 שחזר תמונה הולוגרפית:

במה שרך [לchap 2.5](#) ברקע התיאורטי, נזכיר כי תמונה הולוגרמתה שנקלטה על גבי הגלאי היא פונקציית העוצמה כאשר  $(y, x), R, (y, x)$  הוא שדה קרן האובייקט ושדה קרן הרפרנס בהתאם:

$$(60) \quad I_{obj+ref}(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R$$

הזווית בין קרן האובייקט לקרן הרפרנס יוצרת הטיה בתדר המרחבי (carrier frequency) המאפשרת שחזר נורמי באמצעות הכפלה בפaza מרכזית ומחזר הגל לאחר לפי מודל פרנל, נציג את האלגוריתם באופן מופשט:

1. **חיסור של תמונות הרקע לקבלת רכיב הת庵בות:**  
על מנת לשחזר רק את רכיב הת庵בות  $OR$  علينا לנאות תחילת את המידע הקבוע שלו נושא פaza. כלומר את  $|O|^2 - |R|^2$  מהתמונה הנוספת שצלמנו.

$$(61) \quad I_{interf}(x, y) = I_{obj+ref}(x, y) - I_R(x, y) \approx 2 \cdot Re\{O(x, y)R^*(x, y)\}$$

תוצאה זו תכיל בקירוב רק את רכיבי הת庵בות וכן אפשר לבצע חישוב FFT עבור אות זה בלבד, פועלה שמקטינה רעש ואת איבר ה-DC.

2. **הגדרת קרן הרפרנס:**  
אם הזווית  $\theta$  ידועה, יוכל להגדיר שדה רפרנס מישורי עפ"י (ונניח הטיה בציר אחד):

$$(62) \quad R(x, y) = A_R \cdot e^{i(k_x x + k_y y)} \approx A_R \cdot e^{i\frac{2\pi}{\lambda} x \sin(\theta)}$$

כך שקרן הרפרנס תכילה פaza משתנה לינארית שתואמת את הגיאומטריה האמיתית אך אם  $\theta$  אינה ידועה – נקבל גל רפרנס שטוח – הפaza שלו תהיה איחידה בכל המרחב.

#### 3. הכפלה בפונקציית חלון:

$$(63) \quad I_w(x, y) = I_{interf}(x, y) \cdot w(x, y)$$

נכפיל את מידע בפונקציית חלון מרחבית (2D Hann window) על מנת להפחית רעשים בקצה הספקטרום שיופיעו בהמשך על ה-FFT.

4. **הכפלת התמונה ב-*Fresnel Carrier*:**  
לאחר חיסור הרקע והפעלת פונקציית החלון המרחבית התמונה מוכפלת בפונקציית פaza פרבוליית המ"יצגת את התפשטות הגל לאחר עפ"י פרנל:

$$(63) \quad C(x, y) = \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right\}$$

כאשר  $z$  אורך גל הליזר,  $z$  המרחק של האובייקט מהגלאי ו- $(y, x)$  הם הקורדינטות במישור הגלאי.

5. **טרנספורם פורייה (FFT, IFFT):**  
פונקציה זו מדמה את הפaza המוצטברת של הגל שהתפשט למרחק  $z$  ומאפשרת "לשחזר אחורה את הגל" עפ"י מעבר מתמונה העוצמה להרכבת השדה המרוכב כך שלא נדרש לבצע חישוב ישיר של אינטגרל פרנל כדי לקבל את תמונה הפaza בהמשך.

כעת נחשב את שדה הגל המשוחזר באמצעות טרנספורם פורייה (FFT), ובוצע הכפלה בפונקציית השחזר של פרנל ולאחר מכן נבצע חזרה למרחב המיקום באמצעות IFFT.

כאשר כאשר  $f_y, f_x$  הן התדריות המרחביות לאחר התמרת פוריה, התמונה שלנו מיוצגת כעת עפ"י:

$$(64) \quad \Gamma(x, y) = \frac{i}{\lambda z} \cdot \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{\Gamma}(f_x, f_y)\} \cdot C(f_x, f_y)$$

6. **אופציונלי – סינון פוריה מרחבית:** בשלב זה ניתן להפעיל על  $(y, x)$  גם מסני תדרים

מרחבים עפ"י [פרק 2.9.3](#) ברקע התיאורטי.

7. **חילוץ אמפליטודה ופaza:**

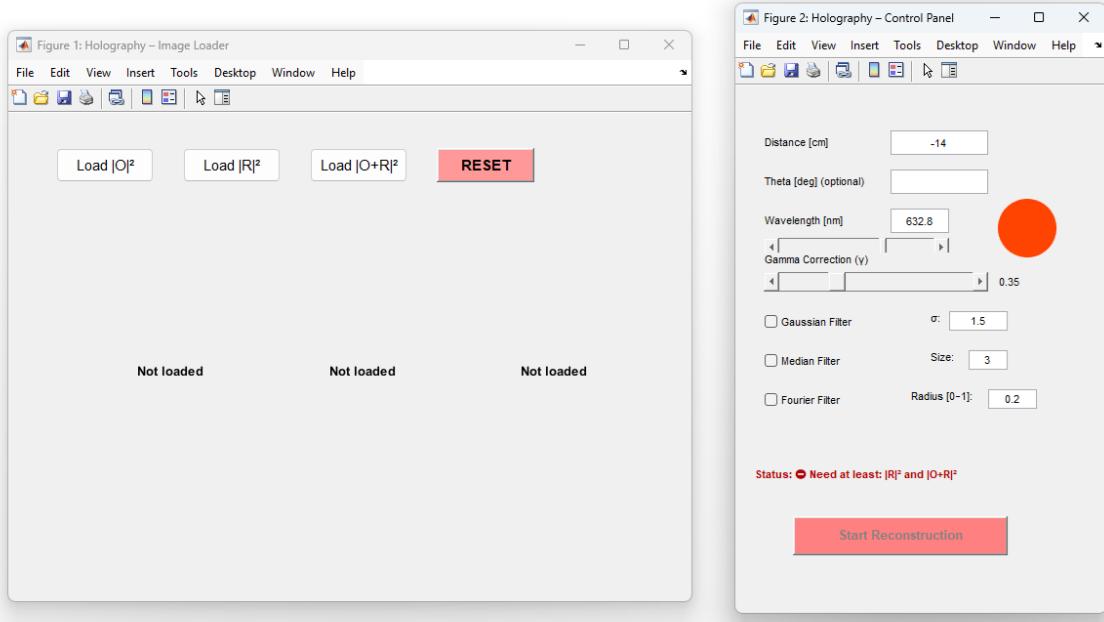
$$(65) \quad |\Gamma(x, y)| = A(x, y) \quad , \quad \phi(x, y) = \arg(\Gamma(x, y))$$

ונוכל לחלץ את תמונה האמפליטודה שהיא התמונה המשוחזרת – בהירות, ניגודיות כפונקציה של המיקום.

ותמונה הפaza המאפשרת ניתוח גיאומטרי של האובייקט – עומק, חספוס, מרוחקים וכו' וועסוק בה בהמשך.

בעוד שלישומים פשוטים כמו גרפים והთאמות בחרנו לקודד תוכניות באמצעות *Python*, *למיושן האלגוריתם* בחרנו להשתמש בסביבת *MATLAB*, מכיוון שהוא מתאים במיוחד לעיבוד ייעיל של תמונות דו-ממדיות מהסוג זהה, ומספק פונקציונליות נרחבת לעבודה עם מטריצות, טרנספורמים מרוחבים ותצלוגות גרפיות ובנוסף מאפשר בניית משק גרפי (*GUI*) אינטראקטיבי די בקלות. ה-*GUI* מאפשר למשתמש להפעיל את תהליך השחזור באופן נוח ולא צריך להתעסקות ישירה בקוד. דרך המשק ניתן לטעון תמונות חדשות, להחליפם כולם או רצף גל, זווית או מרחק ביןיטוי, לבחור איזור עניין (*ROI*) ולבצע מדידות – וכל זאת באופן מהיר ונגיש תוך כדי צפיה מיידית בתוצאה.

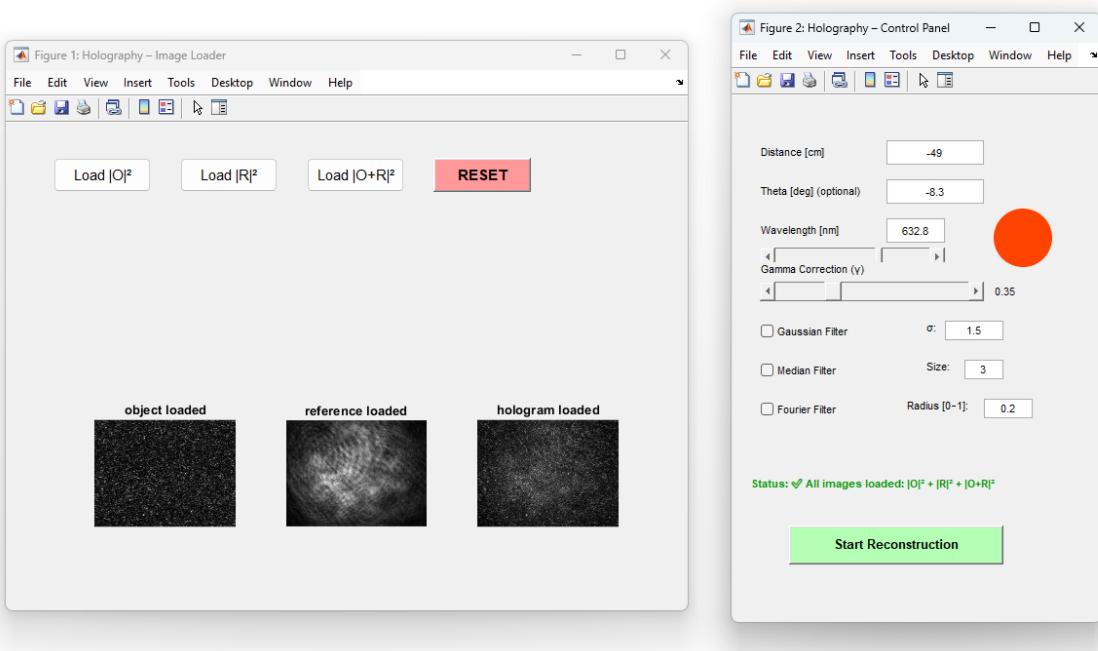
שימוש במשק זה הפרק את השחזור לכלי עבודה גמיש ויעיל, המותאם לעבודה ניסויית.



איור 15: מימין: משק הבדיקה. משמאל: משק טיענת התמונות לשחזור. (לפני החנות התמונות) [1].

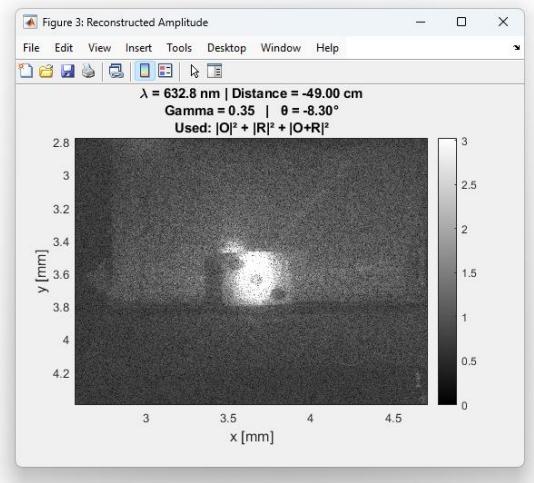
המשק כולל שני חלונות עיקריים:

- *Image Loader* – לטעינת התמונות  $|R|^2$ ,  $|O|^2$  ו- $|O + R|^2$  והציגן בנפרד.
- *Control Panel* – להזנת פרמטרים פיזיקליים (מרחק, אורך גל וזווית), בחירת 필טרים מרוחבים אופציונליים, קביעת עצמת תיקון הארה בעצמה ובקרה על סטטוס הzdnet התמונות.



**איור 16:** לאחר הzdnet תקינה של כל הקלטים הדרושים, מופיע חישוי סטטוס יירוק, וכפתור "Reconstruction" מופעל. ניתן להתחיל את השחזור. [1].

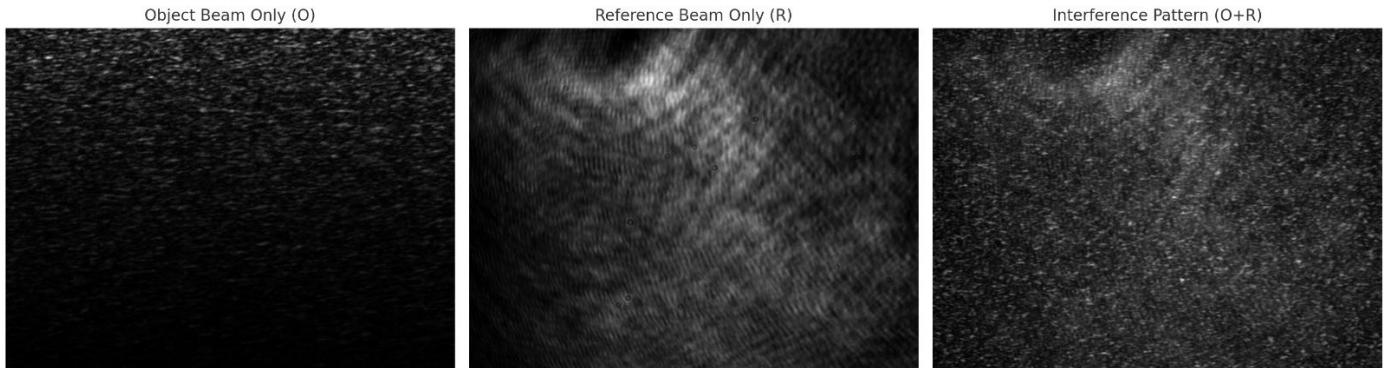
בנוסף, ממשק MATLAB עצמו מאפשר אינטראקטיביות מובנית, כמו pan, zoom ובחירה ROI ישירות עם העכבר – ללא צורך בתוכנות נוספת מצד המשתמש כבר מיד לאחר השחזור על גבי התמונה המשוחזרת וכן אין צורך בקידוד crop סביב האובייקט.



איור 17: דוגמא לחילון תצוגת הפלט של התמונה המשוחזרת בתוכנה – לאחר שימוש באופציית **the zoomed-in image** המובנת ב-**MATLAB**. [1].

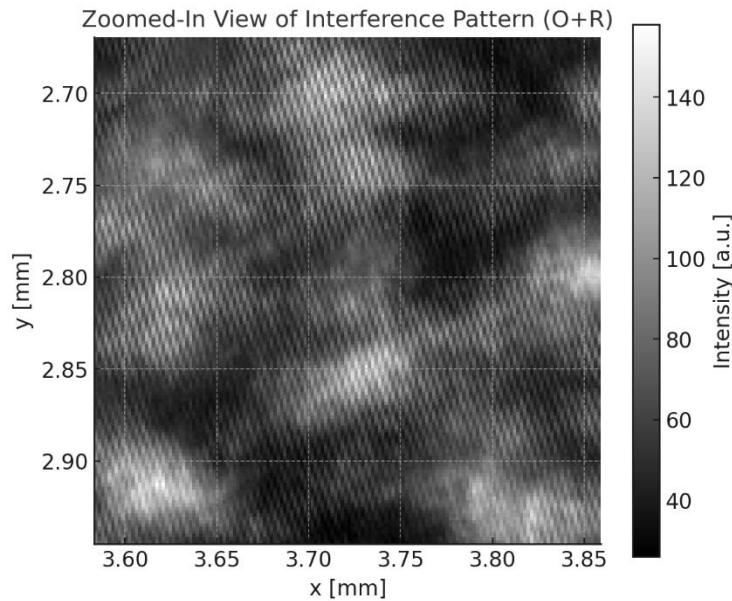
#### 3.4.2 ניתוח איקות התאבכות:

כאמור, על מנת לבצע את תהליך שחזור תמונה הholוגרפיה צילמנו שלוש תמונות נפרדות כאשר בכל אחת מהן מבודדים מצב שונה במערכת.



איור 18: שלושת התמונות הדרושים לשחזור תמונה הholוגרפיה. [1].

באיור 18 ניתן לראות את שלוש התמונות שנלקחו עבור מרחק אובייקט-גלאי  $z = 35 \text{ cm}$  אשר תמונה התאבכות  $R + O$  היא בעלת חשיבות מרכזית שכן היא מכילה את רכיבי התaabכות  $O^*R + OR^*$  אשר נשאים את המידע הפזי של שדה האובייקט.



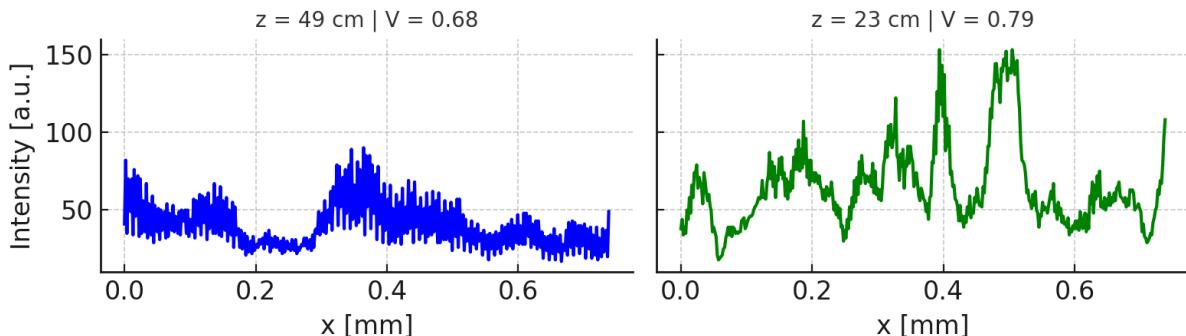
איור 19: תקריב תמונה התaabכות. [1].

איור 19 מציג תקריב מאזור מרכזי בתבנית התaabכות ( $O+R$ ), כאשר הצירים מתאימים ליחידות פיזיות בהתאם לגודל הפיקסל של החישון ( $\text{Pixels} \times 1.85 \mu\text{m} = X \times Y \text{ [mm]}$ ). ניתן להבחין בבירור במבנה המחזורי של התבנית התaabכות, אשר מעיד על התaabכות קוורנטית בין קרן האובייקט לבין הרפנס. תבנית זו משמשת כאנידקצייה מוקדמת להצלחת תהליך השחזור, שכן איקות התaabכות משפיעה ישירות על התוצאה הסופית.

לאחר שצפינו באיקות התaabכות באופן ייזואלי, נרצה לבדוק את איקות התaabכות באופן כמותי על סמך פרק 2.6 ברקע התיאורטי ניקח חתך עזמה לאור שורת פיקסלים מרכזית בתמונה המציגת מבנה מחזורי ברור (אך מוטט בזווית) המעיד על נוכחות התaabכות קוורנטית במישור הגלאי כך

שמעבר להבנה היזואלית נוכל לחשב את מד הניגודיות (visibility) של פסי התאבכות עפ"י גווחא [21](#). כאשר  $I_{min}$  ו-  $I_{max}$  יהיו מקסימות ומינימות לאורך החתר.

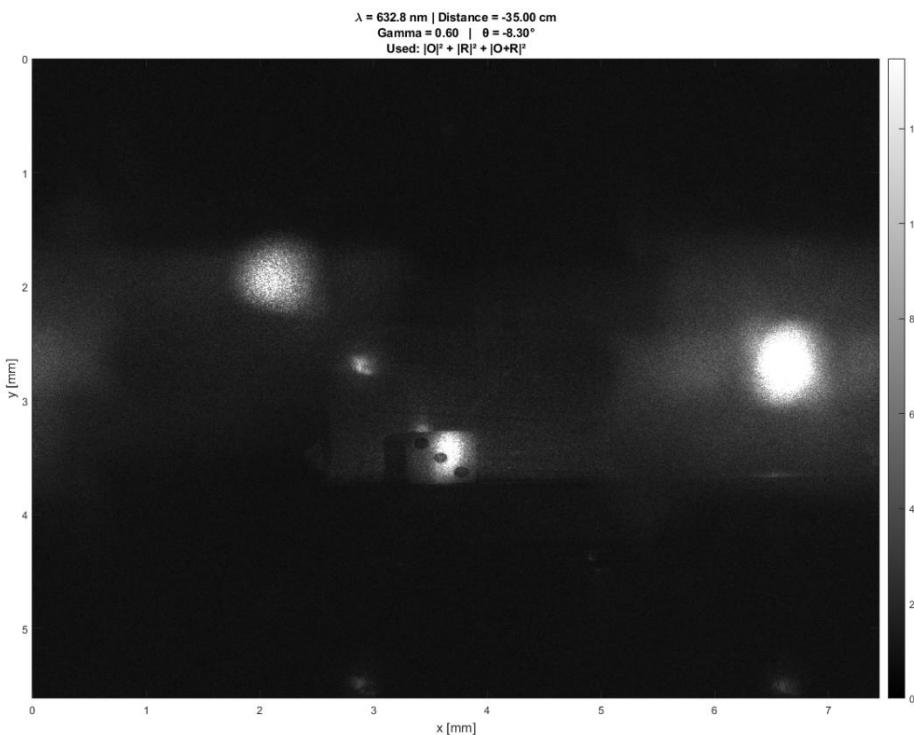
Intensity Profile Along Central Row



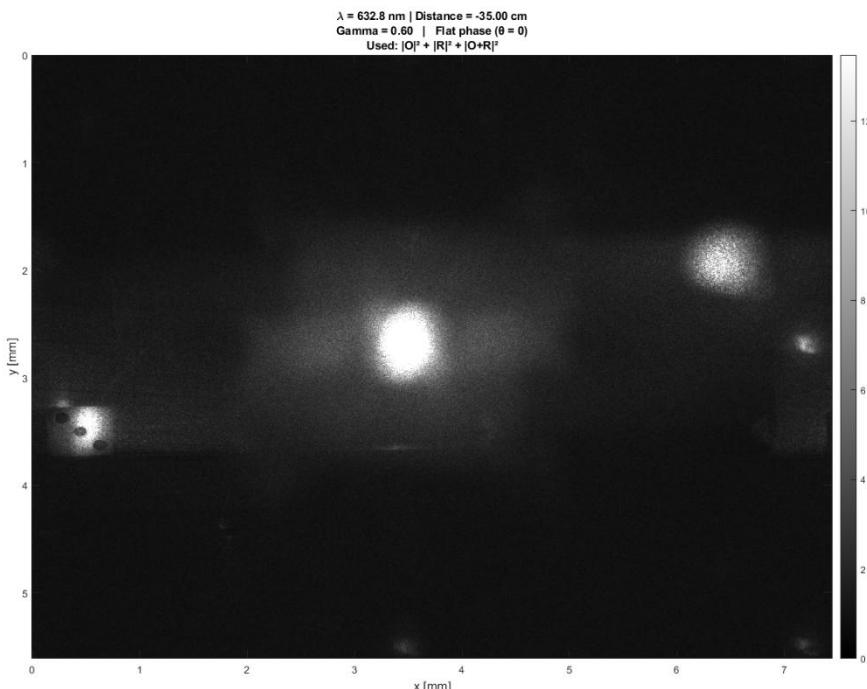
איור 20: פרופיל העוצמה של תמונה התאבכות. [1].

באյור לעיל מוצגים שני חתכי עוצמה מייצגים עבור מרחקים שונים בין האובייקט לגלאי, ניכר כי ערך הניגודיות שהתקבל עבור  $z = 23$  ס"מ גבוה יותר, ומעיד על תכונות התאבכות חדה וברורה יותר. עם זאת, יש לציין שהשיטה רגילה לרש – במיוחד אם יש פיקסלים בודדים עם עוצמה קיצונית – ולכן יש להתייחס לערך  $V$  כמדד מקומי. כמו כן, נתית הפסים (בשל שינויים קטנים בזווית  $\theta$  בין ניסויים הנובעים מא-קייבוע מוחלט של המערכת) עשויים להשפיע על צורת החתר כאשר נלקחת שורה קבועה.

כדי להמחיש את תוצאת השחזר הדיגיטלי של תמונה האובייקט מתוך ההולוגרמה, מוצגות להלן שתי דוגמאות לשחזר תמונה האmplיטודה עבור אותו מרחק מהגלאי, אך עם שינוי בפרמטר היזואית  $\theta$ . התמונות עוברות עיבוד גמא לשם הדגשת פרטים בעוצמה נמוכה, כפי שיפורט להלן.



איור 21: התמונה המשוחזרת שהתקבלה (עם זווית כניסה).



איור 22: התמונה המשוחזרת שהתקבלה.

התמונות מציגות את מבנה האובייקט המקורי ומכוון שהפאה של הקובייה שצולמה אינה סימטרית לשיבוב או שיקוף אנחנו יכולים לדעת שהשחזר אכן משקף נאמנה את חזית הגל.

בתמונה הראשונה בוצע השחזר תוך הזנת הערך הנמדד של זווית הतיה  $\theta$  במערכת עפ"י נוסחה 62 כאשר  $k_x = \sin(\theta) \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$  ונניח כי מדובר בהטיה בציר אחד בלבד כר'-ש'  $= 0$ . כך שהרכיב המשוחזר יהיה:

$$(66) \quad OR^*(x, y) = O(x, y) \cdot e^{-ik_{xx}}$$

ולמעשה מתקבלים במישור התדר שלושה סדרים: סדר אפס ( $DC$ ) מרכז המכיל את  $|R|^2 + |O|^2$ , הסדר המכיל את רכיב המידע של האובייקט מההתאבכות  $*OR$  והסדר  $R^*$  שהוא הצמוד למרוכב.

הزنת ערך ה- $\theta$  בשחזר מאפשר לבצע "ביטול פaza" של קרן הרפרנס עי' הכפלת באקספוננט ובכך מחזירה את רכיב ה- $O$  למיקום המקורי במישור התמונה. כמפורט מכך מתקבל שחזר ממוקץ של האובייקט ורכיב ה- $DC$  מושט מתבנית התמונה. לעומת זאת, בתמונה השנייה בוצע השחזר כאשר  $0 = \theta$  ובמצב זה  $0 = k_x$  כך שהסדרים נשארים במקום.

לצורך אימונות ניסיוני של הזווית  $\theta$  שמדדנו במערכת וכן גם ניסיון למצוא את הזווית הקיימת בציר עי'אותה הזנחנו בעיבוד (וגם אינה נמדדה שכן לא נמדדנו גובהם של הרכיבים מעלה השולחן האופטי) בוצעה בדיקה נפרדת של תבנית ההתאבכות של הholограмה. באמצעות *Python* בוצע טרנספורם פורייה דו-ממדי של תמונה ההתאבכות  $|R + O|^2 = I$  בלבד ומציאת מיקום רכיב המרכזית  $*OR$  במרחב התדר. עפ"י התיאוריה, מיקומו של רכיב  $*OR$  ביחס לרכיב המרכזי ( $DC$ ) ניתן בקירוב עי' המרחקים הבאים במרחב פורייה:

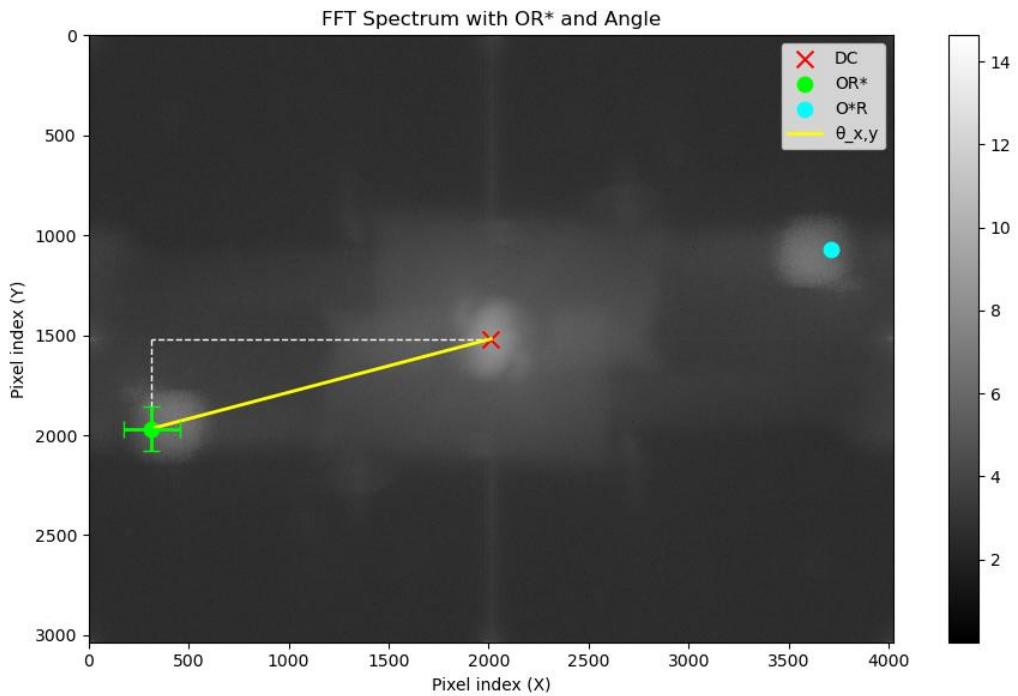
$$\frac{\sin(\theta_y)}{\lambda} = k_y, \quad \frac{\sin(\theta)}{\lambda} = k_x$$

שכאמור בניסוי לא ידוע נמדדיה וחושבה  $\theta_y = -8.3^\circ \pm 0.7^\circ$  אינה ידועה וננסה לאתרה ניסיונית בהנחהuai-הוודאות זהה לאי-הוודאות בציר  $x$ .

חישבנו את התדרים המרחביים הצפויים  $k_x, k_y$  ולאחר מכן מצאנו באילו פיקסלים בתוך מטריצת  $-FFT$  הם נמצאים באמצעות מיפוי של התדרים לפיקסלים בעזרת  $np.fft.fftshift(np.fft.freq)$ :

```
nx, ny = img
fx = np.fft.fftshift(np.fft.freq(ny, d=pixel_size))
fy = np.fft.fftshift(np.fft.freq(nx, d=pixel_size))

kx = np.sin(theta_x_rad) / lambda_m
ky = np.sin(theta_y_rad) / lambda_m
dkx = np.cos(theta_x_rad) * dtheta_x_rad / lambda_m
dky = np.cos(theta_y_rad) * dtheta_y_rad / lambda_m
```



איור 23: ויזואליזציה של קרן הרפרנס לאובייקט במישור הגלאי.

ההעיבוד הנ"ל עולה כי הזווית ביציר א מתאימה לתוצאה (כפי שניתן לראות באיר), האובייקט נמצא בטווח אי-הוודאות) שנמדדה גיאומטרית וביציר ע התקבלה התאימה לזווית של  $2.9^\circ$  אשר נובעת ככל הנראה מהפרש בגובה בין רכיבי המערכת ולצורך פישוט השחזור ושימור האחדות עקב השימושם שנעשה במדידות בהמשך נמשר להタルם מהזווית זו.

בנוסף, כדי לאפשר תצוגה ברורה של אזורים כהים לצד אזורים בעוצמה גבוהה ישם על התמונה המשוחזרת באמצעות MATLAB תיקון גמא. תיקון זהendum עד לדחיס את התחום הדינמי הגבוה בתמונה (באמצעות העלאת כל ערך בחזקת 0.6), וכך לשפר את נראותם של פרטיהם "חיוורים" ע"י שיפור ה-contrast שלהם בתמונה. ערך ע' יבחר ניסיוני עבור כל תמונה כך שיאפשר הבחנה בין מבנה האובייקט לבין אזור הרקע, מבליל לגראום לרוייה חזותית בעוצמות החזקות.

### 3.5 דיוון ומסקנות:

1. **aicots תבנית ההטאבות (ניגודיות):** לאחר צפיה וייזואלית בתמונות ההטאבות ובחינה תקציבית של אזורים נבחרים, בוצעה השוואה כמותית של איקות ההטאבות באמצעות מדד הניגודיות (visibility). נמצא כי הערך המרבי התקבל עבור מרחק של  $z = 23$  ס"מ, עם Visibility של 0.79 – נתון המעיד על תבנית ההטאבות קוהרנטיות וaicotsיות (כאשר הערך האידיאלי הוא 1 = ✓). עם זאת, יש לזכור כי הניגודיות חושבה על בסיס שורת פיקסלים בודדת, ולכן רגישה לגורמים מקומיים כגון רעש אקראי, פיקסלים חריגים בעוצמתם, או סטייה קלה ב חזות הפסים ביחס לציר החתר. תופעות אלו עשויות לגרום להערכת חסר או יתר של ערך ✓. עבור חישובים אחרים המשתמשים באותו חתר ודורשים דיוק רב יותר, ניתן לבצע חתר ב חזות אורטוגונלית לכיוון הפסים.

2. **הולוגרפיה דיגיטלית צילום ללא עדשה (lensless imaging):** נקודת מעניינת בניסוי זה הוא שבニアוד לשיטות צילום אופטיות רגילות – בשיטה זו לא נעשה שימוש

בעדשה כלל – לא לצורך מיקוד התמונה ולא לצורך עיצוב חזית הgal. היכולה לשחרר את הדמויות מtabsets ארך ורק על תבנית התבאות שנקלטה בחישון, כאשר המידע המלא על חזית הgal מגע למבנה התבאות עצמה. שחזור הדמויות נעשה מאוחר יותר באופן נומי ולא צריך ברכיב אקטיבי נוסף במערכת האופטית וכן ניתן למצוא לצילום מסוג זה יישומים רבים כמו במיקרוסקופיה או בהדמיה של אוזרים עם גישה מוגבלת לצילום כמו רכיבים קטנים במיוחד או עצמים ביולוגיים.

3. **התמונה המשוחזרת:** תМОנות השחזר שהתקבלו מדגימות את עקרונות השיטה וכן התקבלו תМОנות טובות ויזואלית וכן כאשר הوزנה הזווית המדוזה, מיקום רכיב התבאות במישור פורייה היה במרכז התמונה. לעומת זאת, כאשר הوزnit לא הوزנה רכיב ה-DC מופיע במרקם התמונה.

4. **צורת רכיב ה-DC:** צורת רכיב ה-DC בתמונה המשוחזרת לא התקבלה כמלבן מובהק (צורתו של חישון המצלמה) כפי שמצופה מהתיאוריה ומהדוגמאות בספרות אלא כמלבן מעגלי-אליפטי עם הילה מלכנית לבנה מוטשטשת. אלו מעריכים כי הסיבה לכך היא רעש כללי במערכת ודרך השחזר שנבחרה בעיבוד הכלולות הכפלה ברכיב פאזה פרבולית לפני התמרת הפורייה ההופוכה.

5. **רעש סbianti:** במהלך הניסויים, ובפרט בשלבי השחזר דיגיטלי של חזית הgal, ניתן היה להבחן לעיתים ב"טבעות איינשטיין" או Airy disks שUMBיקות שערכנו, הן בלתי תלויות בהחזר מהאובייקט עצמו וככל הנראה נבעות מהזרים אחרים במעבדה כמו החזרים מהצד האחורי של העדשות השונות על השולחן האופטי או מרכיבים אחרים נוספים שהיו על השולחן. בניסוי המשך הצלחנו למazure מעט את הופעת הטבעות ע"י שינוי גיאומטריות המערכת וניקוי יסודי של הרכיבים ע"י חומר חיטוי אך לא הצלחנו לבטל את הופעתן לחלוtin. הופעת טבעות אלה על תМОונת התבאות עשויות להויף רעש לא רצוי בתמונה המשוחזרת.

## **4. ניסוי (2): שינוי המרחק בין האובייקט לחיישן**

### **4.1 מטרת הניסוי:**

- בחינת השפעת שינוי המרחק Z על תבנית התבאים.
- בחינת השפעת שינוי המרחק Z על תוצאה השחזור הholוגрафי.

### **4.2 מערכת הניסוי:**

**הצידם בניסוי:**

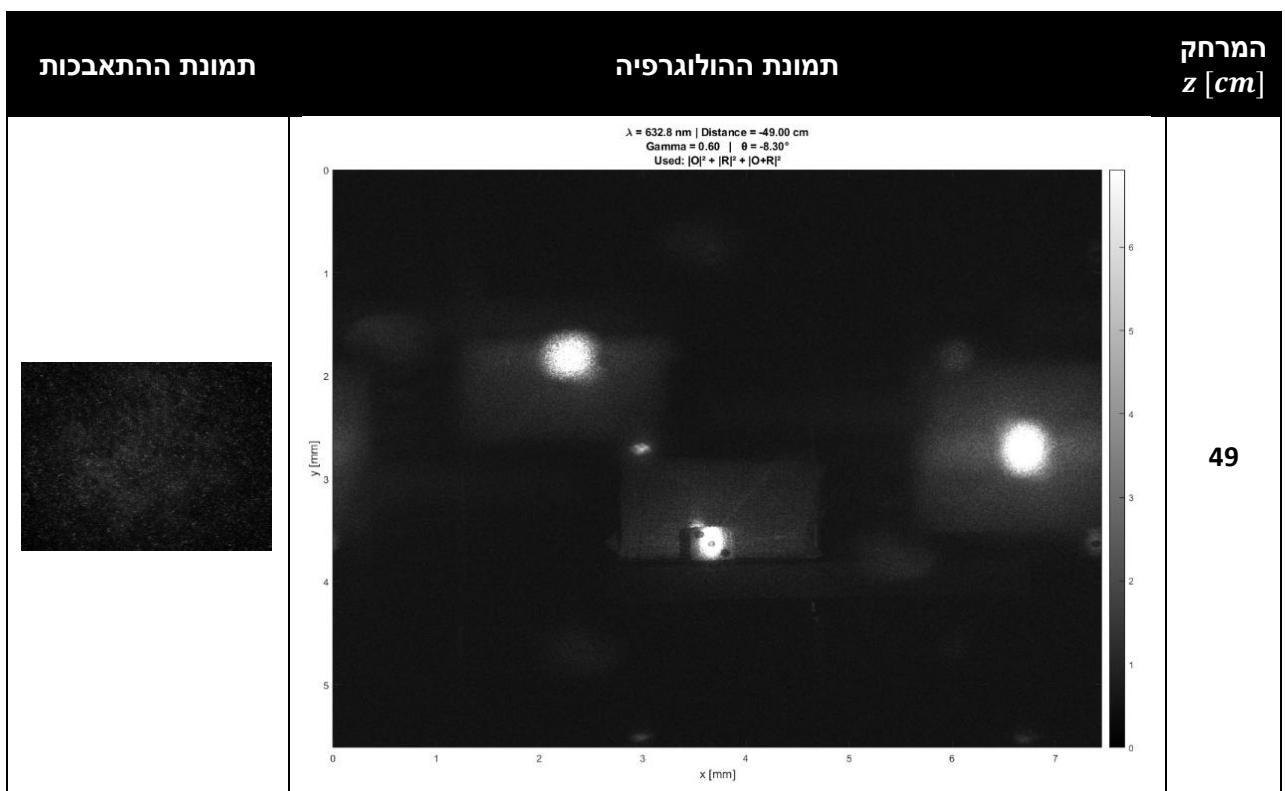
- זהה למערכת בת-ניסוי 1, למעט שינוי מיקום האובייקט על גבי המסילה.

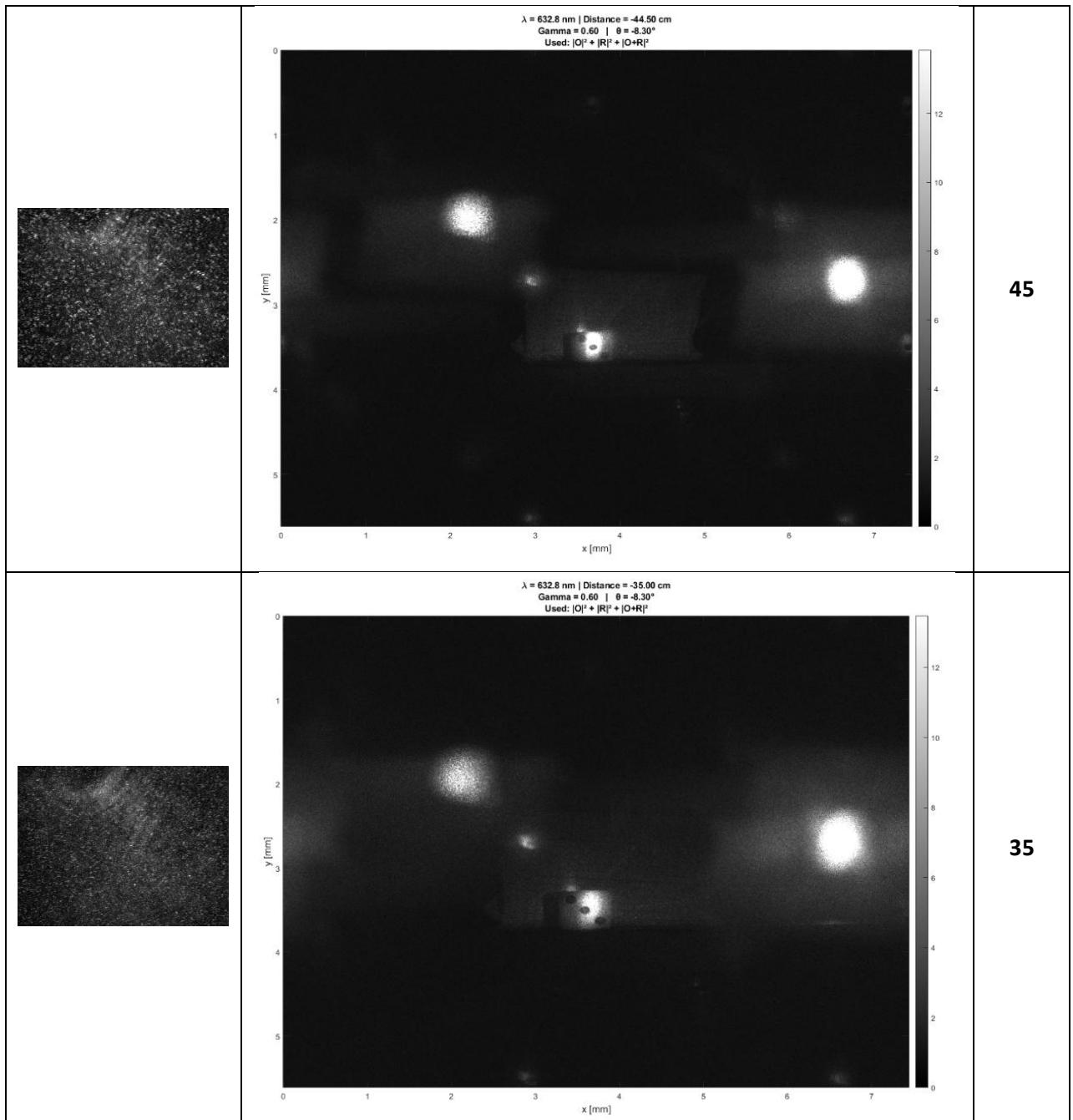
### **4.3 מהלך הניסוי:**

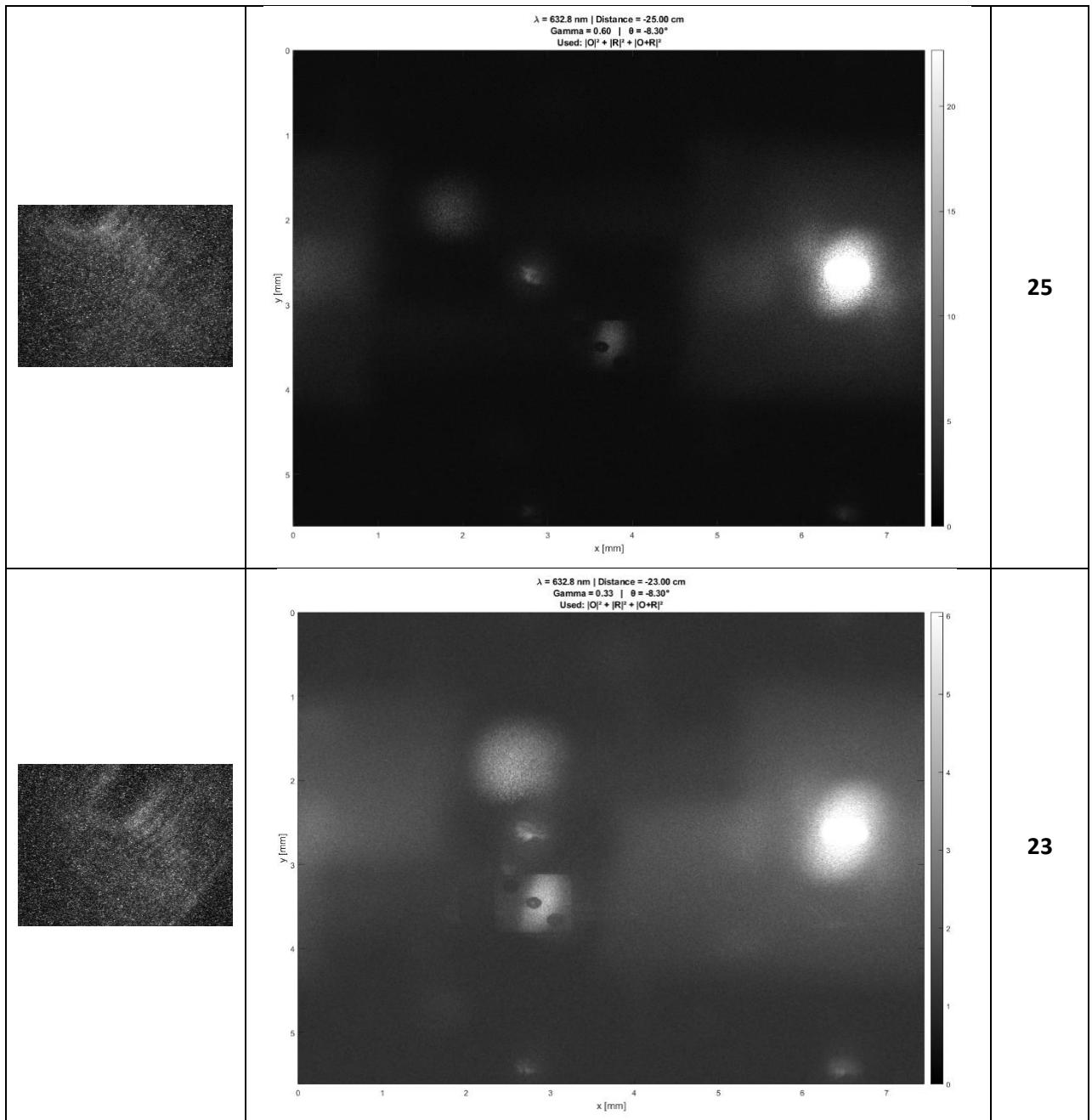
1. נקבע שימוש באוטה המערכת בה ביצענו שימוש בתת-ניסוי הקודם.
2. בכל פעם נלקח את תמונה התבאים ותמונות הרקע לאחר מדידת מיקום האובייקט על גבי המסילה באמצעות הסרגל.
3. בכל סדרת מדידות נקרב את האובייקט לכיוון המצלמה מבל' לשנות את מיקום שאר הרכיבים במערכת עד אשר נגיע למרחק בו במת הקיבוע של האובייקט תסתיר את קרון הרפנס יעקב מיקומה ביחס למראה M3, כאשר נتقارב למיקום בו קרון הרפנס תוסתר, נבצע את המדידות בהפרשים קטנים יותר.

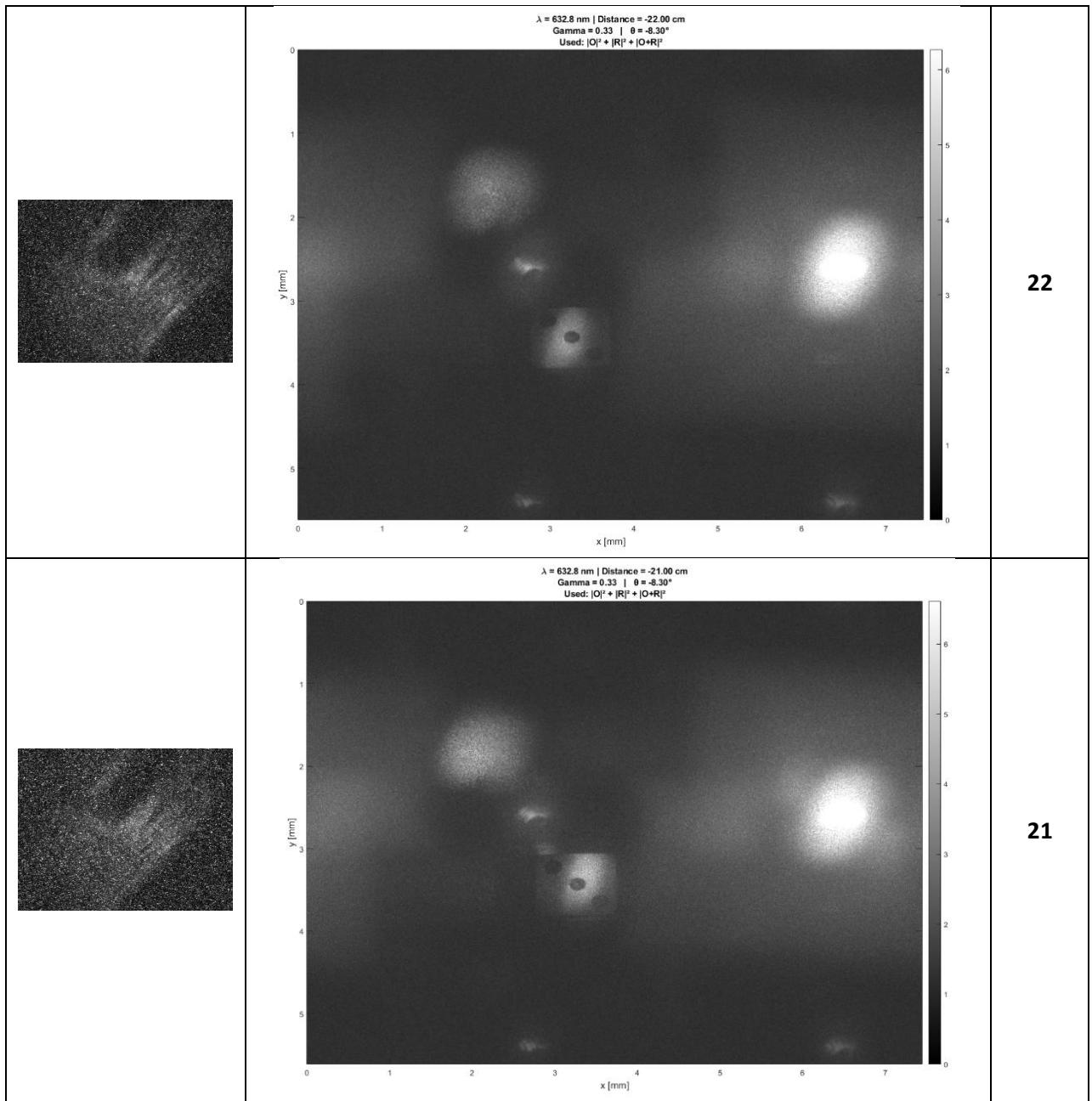
### **4.4 תוצאות הניסוי ועיבודן:**

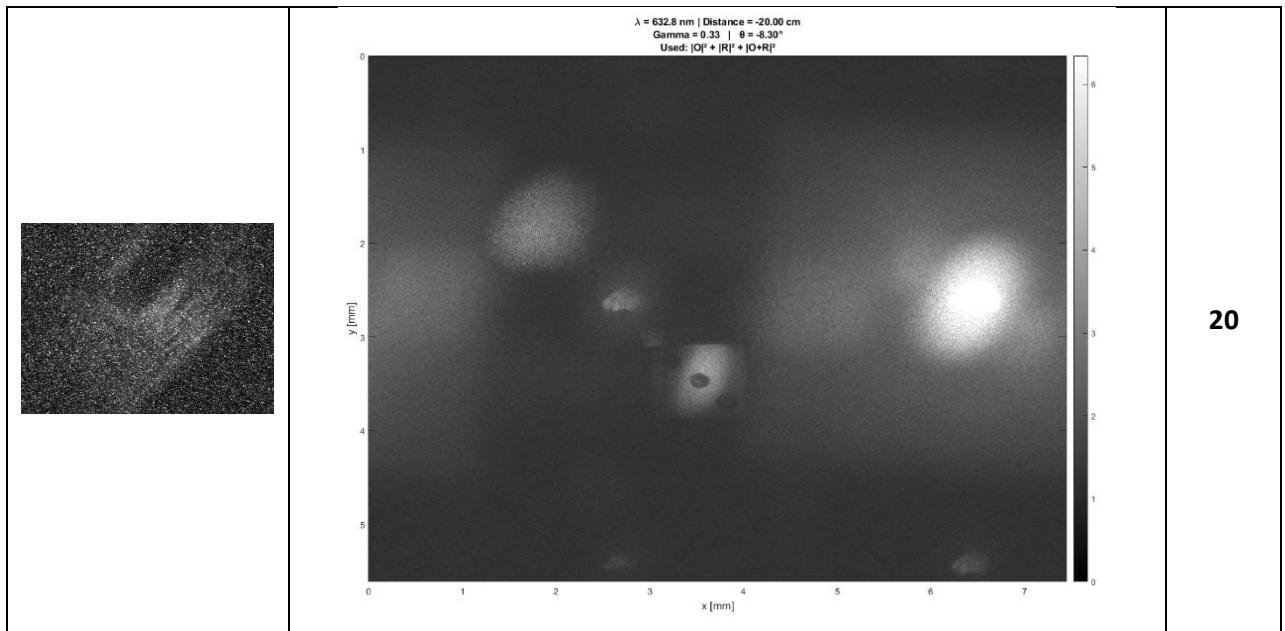
בשלב זה נבחן כיצד משפייע המרחק בין האובייקט לבין הgalai על תבנית התבאים הנרשמת ועל איכות השחזור הholוגрафי, בכל אחת מהמדידות בתת-ניסוי זה, מיקום האובייקט שונה תוך שמירה על שאר רכיבי המערכת במקומם.







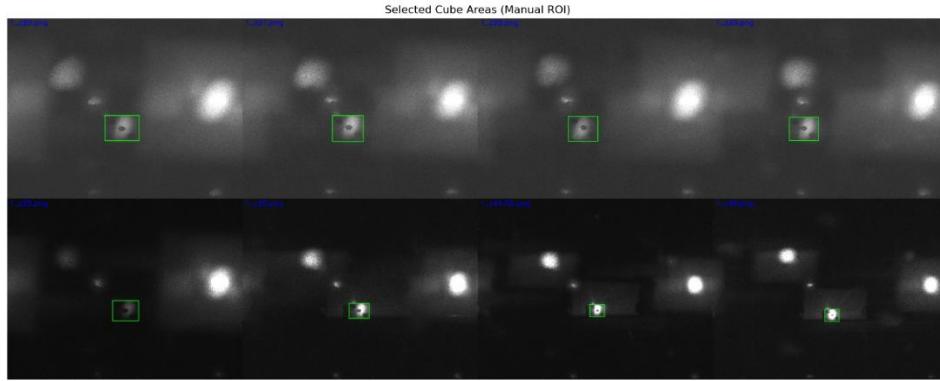




טבלה 2: מציגה השוואת בין המרחקים השונים של האובייקט בתבנית ההתאבכות.

בטבלה המצורפת מוצגות תוצאות ההשוואה עבור סדרת מדידות שבוצעה תוך שינוי של מרחק האובייקט מהחישון, בטווח של [cm]  $20.0 \pm 0.5 \rightarrow 49.0 \pm 0.5 = z$ . עבור כל מרחק שנמדד מוצגות תבניות ההתאבכות המקורי (R+0) וכן תמונה הholограмה המשוחזרת שהופקה בעיבוד. חשוב לציין כי לא בוצע חיתוך (crop) או zoom על אף אחת מהתמונה, וזאת כדי לשמור על פרופורציות קבועות בין המרחקים במישור החישון ובכך לאפשר השוואת המימנה בין התוצאות – הן ויזואלית והן כמותית. במקרים אחרים, שינוי בגודל או מיקום האובייקט בין התמונות בטבלה משקף שינוי פיזי ממשי במרחקו מן הגלאי.

ניתן לראות מגמה ברורה של התקרכובות האובייקט לעבר המצלמה ככל שמקטינים את המרחק z, כפי שצפוי מבחן גיאומטרית. עם זאת, מתחת למרחק של כ-25 ס"מ ניכרת ירידה באיכות השחזור: תמונות האובייקט הופכות כהות ועמוモות יותר, והאבחנה בפרטם נפגעת. תופעה זו מלוויה גם לצורך להחיל תיקון עוצמה (Gamma Correction) – שנבחר לכל תמונה באופן ידני) שונות עבור תמונות אלו בהתאם לרמת החשיפה וליחס האור שנרשם בתבנית ההתאבכות. אנו מייחסים את הירידה הזאת לא רק לשינוי בגיאומטריית הhologramma, אלא גם לביעות המערכת האופטית עצמה.



איור 24: מדידת גודל הקובייה ע"י בחירתה ב-ROI ב-*thon*.

במהלך לניתוח היזואלי בטבלה חושב עבור כל תמונה גם רוחב ההייל האופקי של האובייקט על חישון המצלמה באמצעות סקריפט *Python*-*thon*. הרוחב הוגדר כמרחיק (בפיקסלים) בין הקואורדינטות השמאלית והימנית של אזור ההייל הנבחר על-ידינו באופן ידני (ROI) שתוחם את הפאה הקדמית של האובייקט בכל אחת מהתמונהות כפי שניתן לראות באירור. לאחר והיט הקובייה בתמונה עשוי להיות מושפע מגורמים נוספים (חדות התמונה, עיוויתים, איזוריים שמוארים בצורה פחותה וכו') וכן מרזולוציית החישון لكن נבחרה א-ודאות בזרה הבהא:

- כ- $0.5 \pm$  פיקסלים לכל קצה במדידה עבור רזולוציית החישון (כלומר  $pixels \pm 1$ )
- א' ודוות של  $pixels \pm 2$  עבור המגבלות בבחירה ה-ROI ע"י העין האנושית עקב הגורמים שעשויים להשפיע על קר שפורתו לעיל.

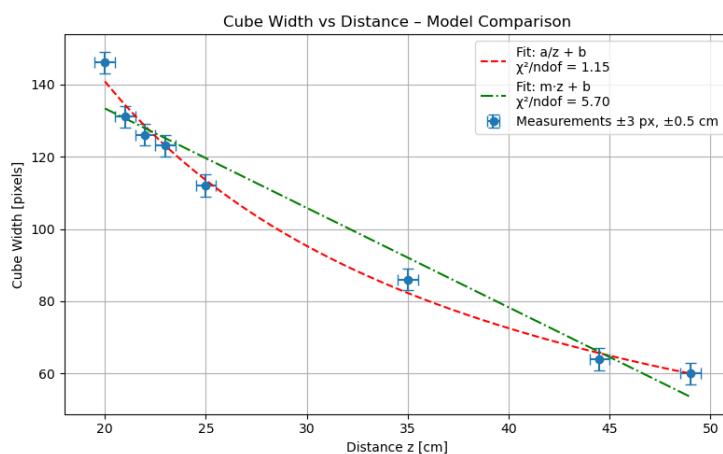
$$\text{קר שבסך הכל נבחר את א'-הוואות: } \sqrt{1^2 + 2^2} = \sqrt{5} \approx 2.24 \text{ pixels} \rightarrow \pm 3 \text{ pixels}$$

לצורך הניתוח הכמותי, נבחן הקשר שבין רוחב ההייל למרחיק  $z$  עבור 2 מודלים שונים:

1. עפ"י אופטייקה גיאומטרית – גודל ההייל של האובייקט (שגודלו קבוע) קטן ביחס הפוך

$$\text{למרחיק ממנו. כלומר, } b = \frac{a}{z} + m.$$

2. מודל לינארי אמפירי שישמש כקירוב לתוצאה הנכפית:  $b = m \cdot z + m$



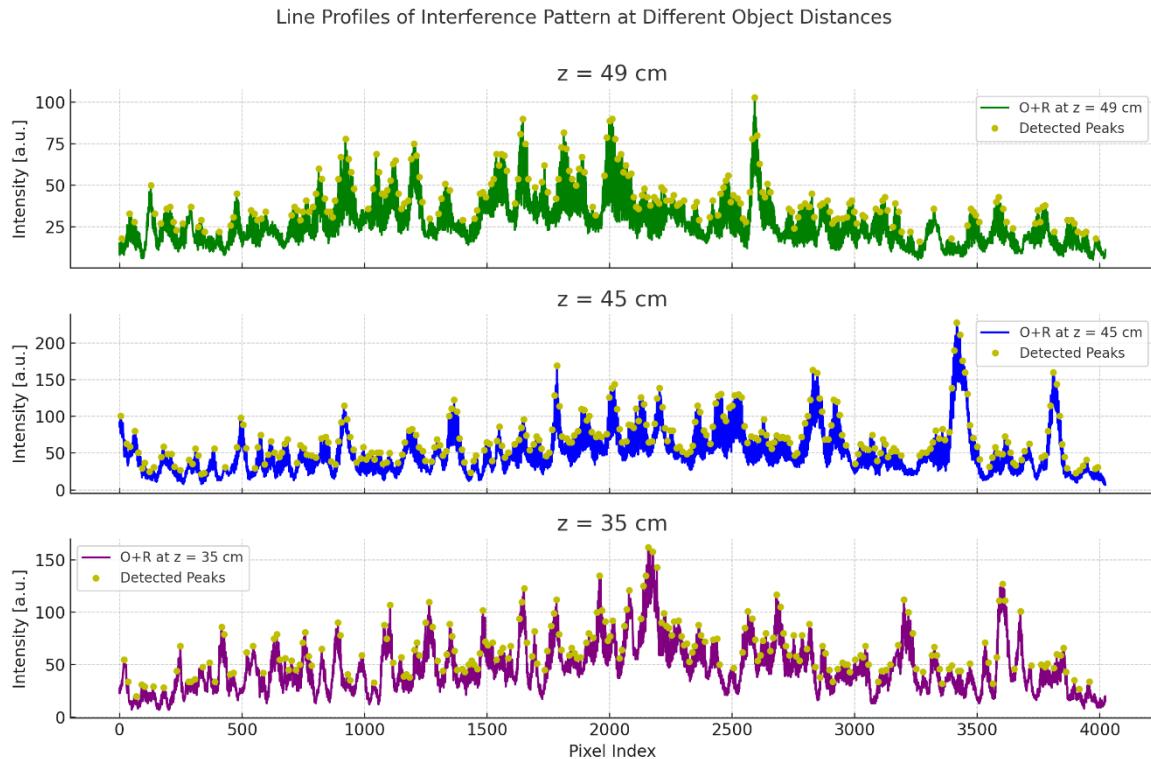
איור 25: רוחב הקובייה (בפיקסלים) כפונקציה של המרחק מהחישון.

עבור שני המודלים ביצענו התאמת וקיבliśmy ערכי  $\frac{\chi^2}{ndof}$  כפי שניתן לראות בגרף לעיל.

בשלב הבא בוצעה בדיקה ניסיונית של הקשר בין המרחק  $z$  של האובייקט מהחישון לבין מרוחק הפסים  $\Delta d$  בתבנית התאבכות המתקבלת על החישון, על-פי המערכת האלגוריתמית שבנו. הקשר התאורתית מובוסס על הגיאומטריה של התאבכות בין קרן האובייקט לקרן הרפרנס בזווית קבועה, ונתנו בקירוב כפי שציינו בחלק 2.6.1, על-ידי:

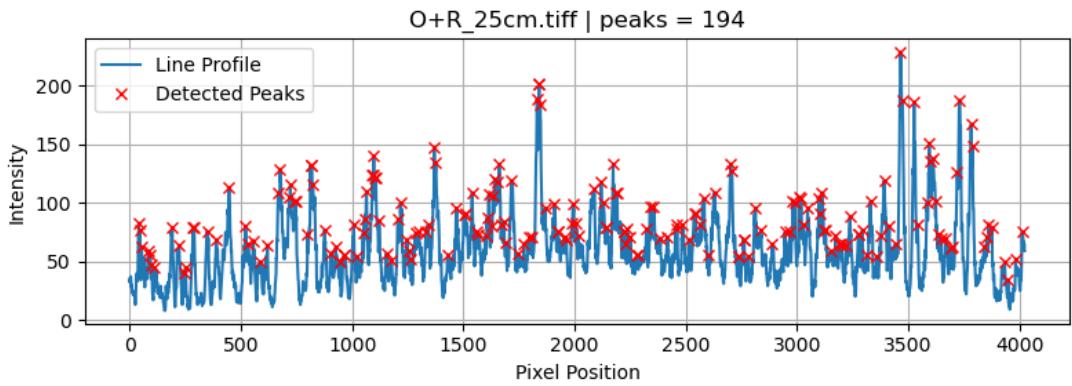
$$\Delta x \approx \frac{\lambda z}{d} \approx \frac{\lambda}{\tan(\theta)}$$

כאשר  $\lambda$  אורך גל הליזר,  $z$  מרחק האובייקט מהחישון,  $\theta$  הזווית בין קרן הרפרנס לבין קרן האובייקט  $d$ -ה מרחק האופקי בין הפסים על החישון.



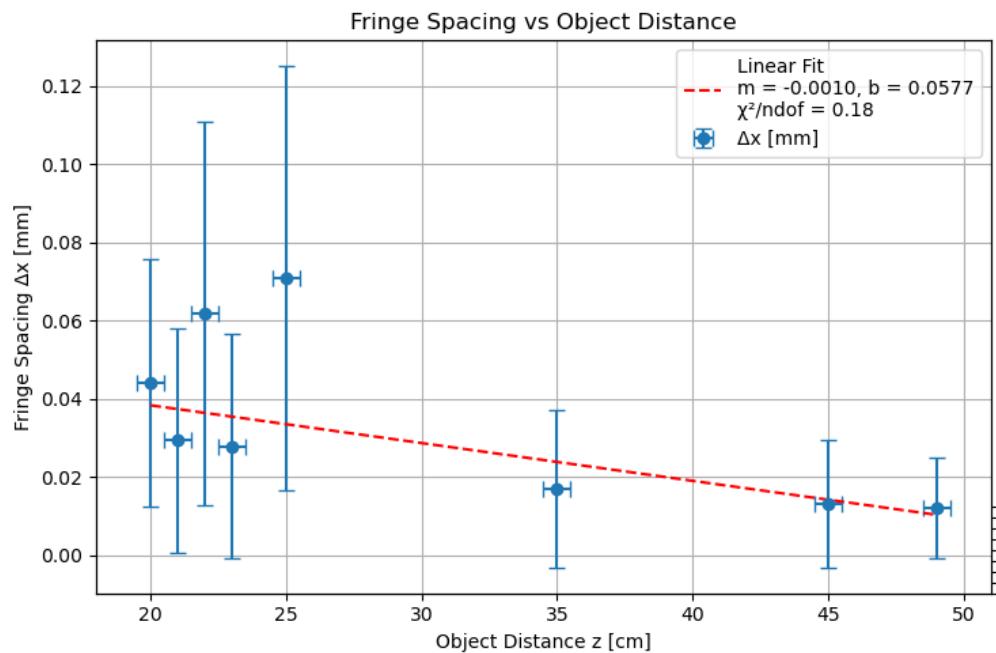
איור 26: חתכי עוצמה בתבנית התאבכות עבור 3 מרוחקים שונים מהאובייקט לגלאי.

בכל אחת מהתרומות שכל אחת מהן מייצגת מרחק  $z$  שונה בין האובייקט לחישון, נמדד ריווח הפסים  $\Delta d$  בפועל על-ידי חיתוך קו אופקי בתמונה (קו מרכזי), מדידת עוצמת הפיקסלים לאורך שורת התמונה, וזרחי מקסימות עוקבות בפרוfil העוצמה באמצעות פונקציית `find_peaks` (כפי שראאים באIOR 26). ערך הזווית שהשתמשנו בו היה זהה לחישובים קודמים (עפ"י המדידה הפיזית) ושימוש כהנחה קבועה בניתוח כל התמונות. נציג כי ערך זה לא נוצר מניתוח התמונה (כגון זיהוי הפיקרים במישור התדרים), אלא מדידה גיאומטרית ידנית של מרוחקי המרכיבים האופטיים, ולכן יתכן שאינו מייצג במדויק את הזווית האפקטיבית בתבנית התאבכות. בהמשך ניסינו לבצע גם ניתוח מבוסס *FFT*-ב-Python לכל תמונה לשם הערכת הזווית בפועל אך ללא הצלחה.



איור 27: דוגמא לחתך עוצמה לאחר "ישור עפ"י הזרזית שנמדדה.

כפי שניתן לראות באיור 27, לכל אחת מהתמונהות בוצע "ישור עפ"י הזרזית  $\theta$  כדי לאפשר מדידה מדויקת של ריווח הפסים ( $\Delta x$ ). לאחר היישור, חושב פרופיל העוצמה לאורך שורת פיקסלים אופקית ממורכצת, מתוך התמונה המוישרת. שיטה זו מאפשרת להעריך את מרוחוק הפסים באופן ישיר גם כאשר הם אינם מיושרים מלכתחילה עם ציר החישון, ומשפרת את הדיוק בזיהוי הפיקים וההתאמתם למודל התאורטי.



איור 28: דוגמא לחתך עוצמה לאחר "ישור עפ"י הזרזית שנמדדה.

הגרף לעיל מציג את התלות בין מרחק האובייקט  $z$  לבין ריווח הפסים  $\Delta x$  שנמדד עבור כל תמונה. כל נקודה בגרף מייצגת מדידה עבורה תמונה בודדת, כולל שגיאות מדידה הן בציר  $x$  (אי-זדאות במרחב  $z$ ) והן בציר  $y$  (אי-זדאות בריווח הפסים).

## 4.5 דיוון ומסקנות:

### 1. פגיעה באיכות השחזר עבור מרחקים $cm \geq 25$ :

לאחר ניתוח תבניות התארכות עצמן, שמו לב לדפוס חריג המופיע ברבות מהן – דפוס הכלול מבני התארכות עצמית בקרן הרפרנס, המרמז על קיומם של החזרים פנימיים או ליקויים באחדות הארת הרקע. בדיקה של תמונה קرن הרפרנס (R) בלבד מראה שקרן הרפרנס אינה איחידה אלא מכילה תבניות של טבעות וכן עיווותים ו"אזורים חשוכים" במרכז הקרן שלא היו צפויים. מקור אפשרי לכך הוא זיהום או לכLOOR בחלקים פנימיים במערכת – ובפרט במקטב הכפול (ND-Filter) אשר שימש להחלשת עצמת הקרן כיוון שלאחר הצבתו מחדש מכך במערכות אחרות שנבנו עליו שהבעיה חוזרת בתבניות דומות כאשר כיווני המקטב קרובים לאלו שהיו במערכת זו. ובנוסף, באופן ספציפי על פי חישובי הפרש הדרכים האופטיות שביצעוו במדידה Überora  $cm = 20$  מתקבל  $\Delta$  גדול מהערכת אורך הקו/orנטיות של מקור הליזר. במצב זה, הגים מקרן הרפרנס האובייקט אינם מקיימים את תנאי הקו/orנטיות המינימליים, ולכן איכות התארכות ירודה והתבנית המתקבלת חלה ומרוחה. זהה תוצאה צפואה מבחינה תאורטית, ומדגישה את חשיבות בדיקת אורכי הדרכים האופטיות ויתכן שגם מידדות שלא עברו את במדודיק את סף אורך הקו/orנטיות ( $cm = 21 - 23 = z$ ) הושפעו באופן חלקי מאובדן קו/orנטיות, כפי שניכר בטשטוש מתון של הפסים ובירידה ביחס האות לרעש בהולוגרפיה המשוחזרת.

### 2. מדידת רוחב פאת הקובייה כפונקציה של המרחק $z$ :

לאחר חישוב רוחב ההיטל של פאת הקובייה עבור כל תמונה, בוצעה התאמת ל-2 מודלים שונים עבורם התקבלו ערכי ההתאמה:

$$a. \text{ פונקציה עפ"י אופטיקה גיאומטרית: } \frac{\chi^2}{ndof} = 1.15$$

$$b. \text{ פונקציה לינארית יורדת: } \frac{\chi^2}{ndof} = 5.70$$

התאמת לפונקציה מהצורה הרציונלית הניבת תוצאה שתואמת את הצייפה הפיסיקלית – רוחב ההיטל קטן ביחס הפוך למרחק. ערך ההתחמה שהתקבל מעיד על התאמת טובה. פיזיקלית, הפרמטר  $a$  בפונקציה מבטא את גודל הפאה המוקרנת כפול המרחק, ו- $b$  עשוי לייצג רעש או מריחה קבועה בתמונה המשוחזרת.

### 3. הקשר בין מרחק האובייקט לבין מרוחות הפסים בתבנית התארכות: עפ"

התיאוריה התבנית הפסים המתקבלת על גבי החישון נוצרת מהיחסות בין קרן האובייקט וקרן הרפרנס. כאשר קרן הרפרנס פוגעת בחישון  $\theta$  ביחס לקרן האובייקט, נוצרות על גבי החישון פס' התארכות מרוחקים זה מזה למרחק  $\Delta x$ , הקשור לדיורות המרחביות של התארכות. בהנחה שהיחסות  $\theta$  קבועה ואין משתנה בין מדידה, נובע שהמרחב בין הפסים אינו תלוי במרחק האובייקט  $z$ . ניתן לראות זאת מהקשר:

$$\Delta x = \frac{\lambda z}{\tan(\theta)} = \{d = z \cdot \tan(\theta)\} = const$$

מכאן, נצפה שהמרחב בין הפרינגים ישאר קבוע עבור כל מרחק  $z$  תחת אותה הגיאומטריה במערכת. עם זאת, בעקבות שבירצנו עבור התוצאות בניסוי נמצא כי מרוחות הפסים משתנה מעט עם המרחק: ככל  $z$  גדל  $\Delta x$  במדידות

שביבענו באמצעות ניתוח פרופיל העוצמה של תבנית התארכות עבור חתך מרכזי בתמונה. בוצעה התאמת ליניארית לנוטונים על אף שאינה توأمת את המודל התאורטי מטע צפיה לקבל בקירוב פונקציה המתארת קו ישר וקבוע. ההתאמת הניבת שיפוע שלילי וערך  $0.18 = \frac{\chi^2}{ndof}$  המעיד על ההתאמת לא טובה. אנו מעריכים

כי שני גורמים עיקריים מסבירים את הסטייה שנצפתה מהתיאוריה:

- שינויים קטנים בזווית  $\theta$  בין מדידות - על אף שנעשה מאמץ לשמר על גיאומטריות המערכת קבועה, ככל הנראה התרחשו סטיות קלות בזווית קרן הרפרנס עקב שינוי מיקום האובייקט בין מדידות. בפרט, בכל מעבר למרחק  $Z$  שונה, יתכן שלא נשמר יישור זהה לחלוות בין האובייקט לבין מרכז החישון כפי שהוא במרחק ההתחלתי.
- השפעה של זווית ההטיה בציר האנכי (ציר  $Y$  של החישון) ולא בכלל בחישוב כיוון שלא נמדדה והוזנחה בשאר חלק הניסוי.

#### 4. השפעת רוחב האלומה והארת האובייקט: במהלך התקרובות האובייקט לחישון

האלומה של קרן האובייקט לא תמיד הייתה רחבה מספיק כדי להאיר את כל האובייקט. הדבר נבע מזווית התפשטות הקמן, כאשר  $Z$  משתנה, מיקום הארת הקמן נע על פני מישור האובייקט ולא כוון מחדש. תוצאה זו גרמה לכך שבתמונה מסוימת, הקביה לא הוארה במלואה – נמצא שמתבטה בחלוקת כהים בהולוגרמיה המשוחזרת. להבא, נבצע התאמת אקטיבית של כיוון המראת ( $M1$ ) כדי להבטיח הארה מספקת בכל מרחק או תכנון גיאומטריות המערכת כך שהגדלה האופטית של רוחב האלומה תהיה גדולה מספיק לכל טווח המדידה.

#### 5. במדידות הקרובות ביותר, זיהינו שהמוט של הבמה חסם חלק מקרן הרפרנס. תכנון מוקדם של מיקום הבמה והמערכת יכולה היה יכול למנוע חסימה זו. בהמשך נבדוק היבט את נתיב הקמן גם בزواיות קיצונית.

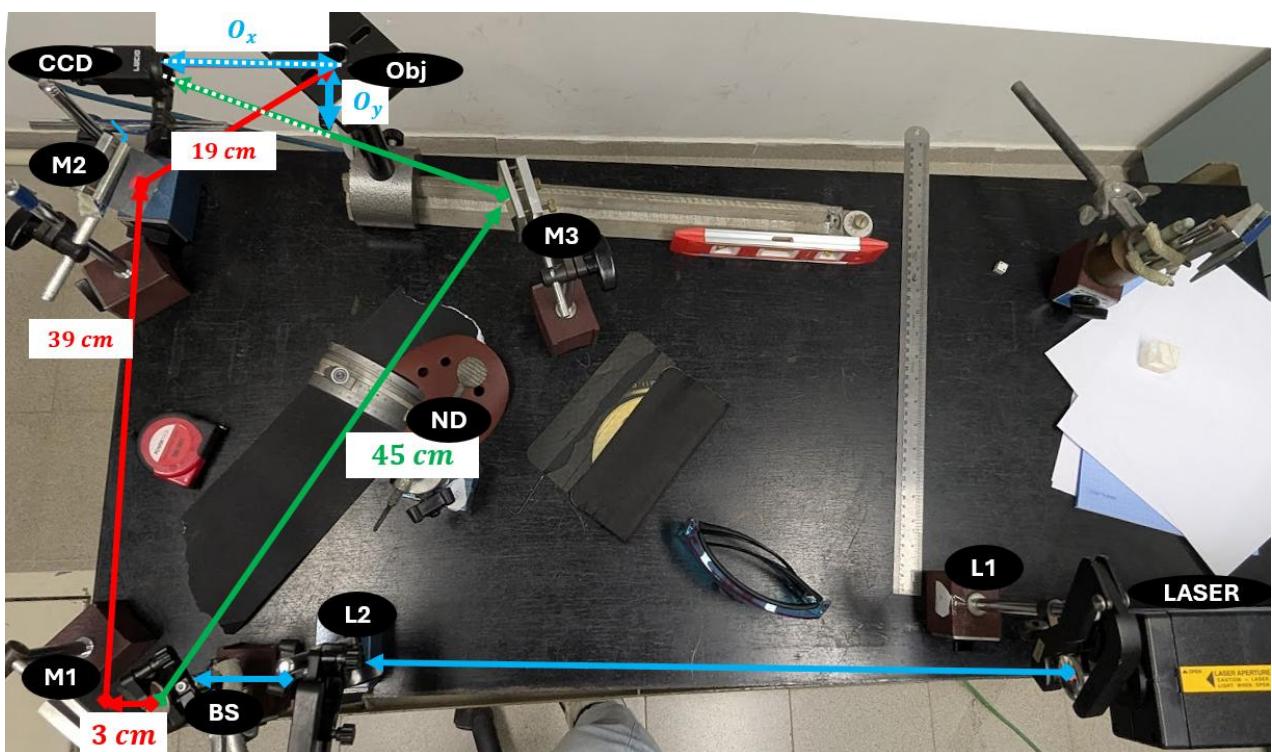
## **5. ניסוי (3): שינוי הזווית בין קרן הרפנס לקרן האובייקט**

### **5.1 מטרת הניסוי:**

- בחינת השפעת השינוי בזווית  $\theta$  בין קרן הרפנס לקרן האובייקט על תבנית התארכות המתקבלת ועל איזוטה ותוצאת שחזור ההולוגרמה.
- שיפור גיאומטריית (מבנה) המערכת – בידוד המשנה הבדיקה ומשתני הבדיקה במערכת.

### **5.2 מערכת הניסוי:**

- הציד במערכת זהה לניסויים קודמים.
- המערכת כוללת בנייתו מחדש תוך שימוש עקרון *axis-off*.
- מפצל האלומה הונח מיד לאחר הטולסקופ.
- עברו קרן האובייקט מיד לאחר מפצל האלומה הונחו זוג מראות M1, M2 המובילות את הקרן אל במת האובייקט כאשר האחרונה משמשת לכיוונים עדינים של האלומה להארת האובייקט עצמו.
- עברו קרן הרפנס הקרן הוסטה על-ידי מפצל האלומה ישר דרך סט המקבטים המשמש להנחתת הקרן ומשם ע"י זוג מראה אחד M3 אל החישון.



איור 29: המערכת בניסוי 3.

### 5.3 מהלך הניסוי:

1. המערכת הורכבה מחדש תוך שמירה על אותן רכיבים.
2. קור הרפרנס כונה במסלול קבוע ומיקומה נמדד ונשמר קבוע לאורך כל הניסוי:  $(R_x, R_y) = (6.0 \pm 0.5 \text{ cm}, 54.5 \pm 0.5 \text{ cm})$ .
3. בכל מדידה בוצע שינוי יזום רק במיקומה של קרן האובייקט בציר האנכי  $O_y$  ע"י הזזה של האובייקט עצמו בצורה מבוקרת על גבי הנייר המיקרומטרי שהונח על במתה האובייקט, בעוד ערך  $cm O_x = 32.5 \pm 0.5$  נשאר קבוע (שהוא למעשה המרחק  $Z$  בין ניסויים קודמים).
4. לאחר כל שינוי במיקום  $O_y$  חושבו הפרש הדריכים האופטיות והזווית  $\theta$ .
5. עברו כל אחת מהפעולות בוצעה מדידת תבנית ההתאבכות (O+R), תמונה קרן הרפרנס (R) ותמונה קרן האובייקט (O).

#### 5.4 תוצאות הניסוי ועיבודן:

לצורך עיבוד תוצאות ניסוי זה, בוצע חישוב שיטתי של הפרש הדריכים האופטימיות בין קרן הרפרנס לבין האובייקט וכן חישוב הזווית המרחבית ביןיהן, על מנת לבדוק את השפעת זוויות ההתאבכות על תבנית הפליגג'ים שהתקבלה. החישובים בוצעו באמצעות תוכנת Excel, תוך שימוש במידידות שנלקחו במהלך הניסוי.

| C          | D           | E                  | F |
|------------|-------------|--------------------|---|
| Leg        | Object      | Refrence           |   |
| 1          | 3           | 45                 |   |
| 2          | 39          | 27                 |   |
| 3          | 35.5        | 54.94770241        |   |
| 4 (z)      | 32.5        |                    |   |
| <b>SUM</b> | <b>110</b>  | <b>126.9477024</b> |   |
|            |             |                    |   |
|            | 16.94770241 | הפרש דרכיכם:       |   |
|            | 30          | אורך קוורנטיות:    |   |
|            | 13.05229759 | נשאר למטה?         |   |
|            | YES         | OK?                |   |

.אייר 30: בדיקת תנאי הקוורנטיות בExcel.

בטרם חושבה הזווית בין הקרניים, נדרש לוודא שהתנאים האופטימיים מאפשרים היווצרות התבנית ההתאבכות ברורה. לשם כך חושב הפרש הדריכים האופטימיות בין קרן הרפרנס לבין האובייקט, על-פי סכימת אורכי המסלול של קרן האובייקט בשלושה מקטעים (Leg 1-3) בהתאם למבנה של המערכת. באמצעות נוסחאות ב-Excel (פעולות חשבוניות ומשפט אם פשוט לעמידה בתנאי) חושבו המרחקים ביחס לתנאי העמידה בתחום הקוורנטיות של הליזר, במטרה לוודא כי הפער אינו חורג מאורך הקוורנטיות (~30 ס"מ), תנאי חינוי לקבלת תבנית ההתאבכות תקפה.

| G      | H           | I            | J           | K                        |
|--------|-------------|--------------|-------------|--------------------------|
|        | DOI         | DOI במעלות   |             |                          |
| RX     | 54.5        | 0.5          | -1.4100729  | זווית ציר שולחן-אובייקט: |
| OX     | 32.5        | 0.5          | 7.319019376 | זווית ציר שולחן-רפרנס:   |
| RY     | 7           | 0.5          |             |                          |
| OY     | -0.8        | 0.1          |             |                          |
| Z=     | 32.50984466 | 0.5196152423 |             |                          |
| Theta= | 8.729092275 | 0.2821846145 |             |                          |

.אייר 31: חישוב הזווית בExcel.

לצורך חישוב הזווית בין הקרניים, נמדדו המיקומים של נקודות הפגיעה של קרן הרפרנס והאובייקט על החישון. כאשר בוצע שינוי רק במיקום  $O_y$  (מיקום האובייקט על הבמה) באמצעות הזזת האובייקט

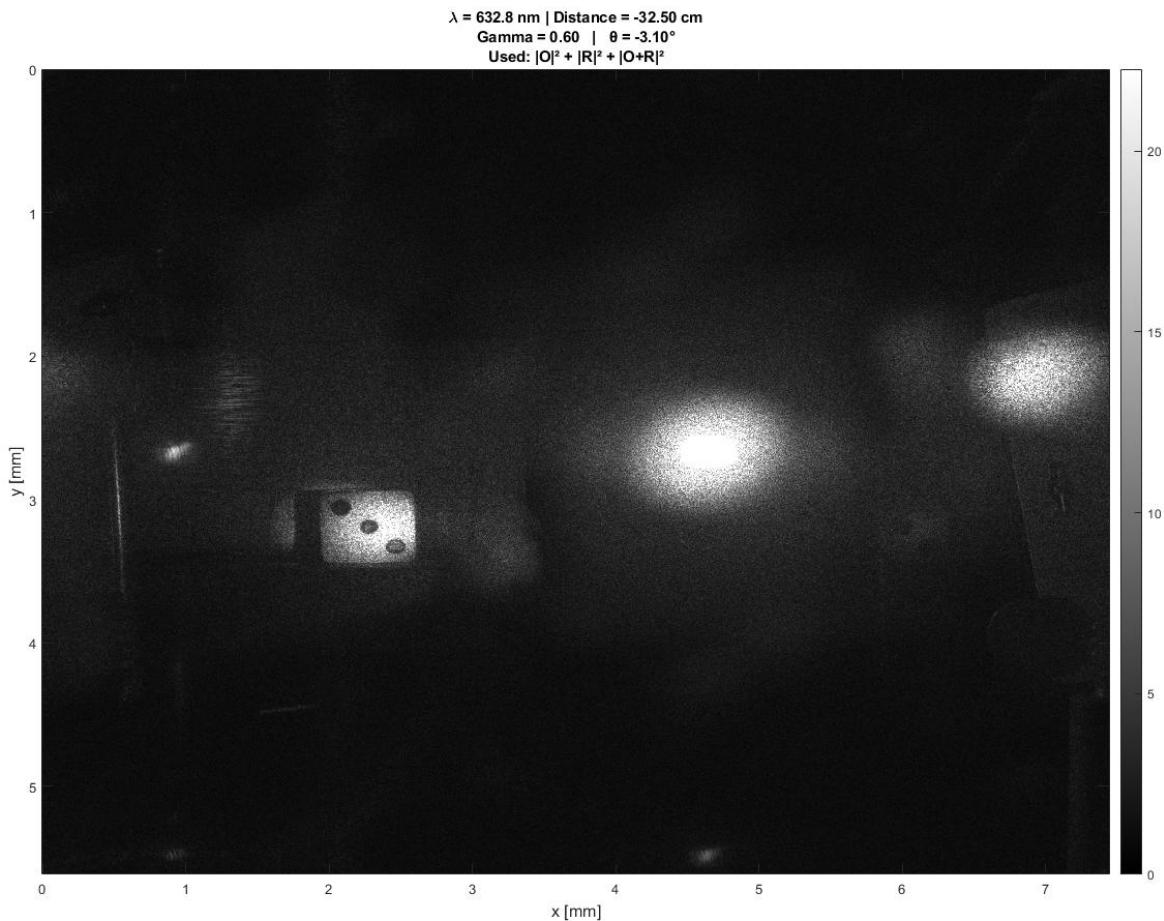
ורישום מיקומו על גבי הנייר המיקרומטר שהוצב על גבי הבמה. לאחר מכן באמצעות תוכנת אקסל חושבה הזריות ע"י שימוש בפונקציות טריגונומטריות.

| זרויות מעוגלות            | גובה יחסית                  | גובה המיקרומטר            |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| זרית שחושבה               | גובה המיקרומטר              | גובה יחסית                |
| $3.0 \pm 0.1 \text{ cm}$  | $2.04^\circ \pm 0.18^\circ$ | $2.0^\circ \pm 0.3^\circ$ |
| $2.4 \pm 0.1 \text{ cm}$  | $3.09^\circ \pm 0.19^\circ$ | $3.1^\circ \pm 0.3^\circ$ |
| $1.0 \pm 0.1 \text{ cm}$  | $5.55^\circ \pm 0.23^\circ$ | $5.5^\circ \pm 0.3^\circ$ |
| $0.2 \pm 0.1 \text{ cm}$  | $6.96^\circ \pm 0.25^\circ$ | $7.0^\circ \pm 0.3^\circ$ |
| $-0.2 \pm 0.1 \text{ cm}$ | $7.67^\circ \pm 0.26^\circ$ | $7.7^\circ \pm 0.3^\circ$ |
| $-0.4 \pm 0.1 \text{ cm}$ | $8.02^\circ \pm 0.27^\circ$ | $8.0^\circ \pm 0.3^\circ$ |
| $-0.8 \pm 0.1 \text{ cm}$ | $8.73^\circ \pm 0.28^\circ$ | $8.7^\circ \pm 0.3^\circ$ |

טבלה 3: הזריות שחושבו והזריות שנבחרו בניסוי.

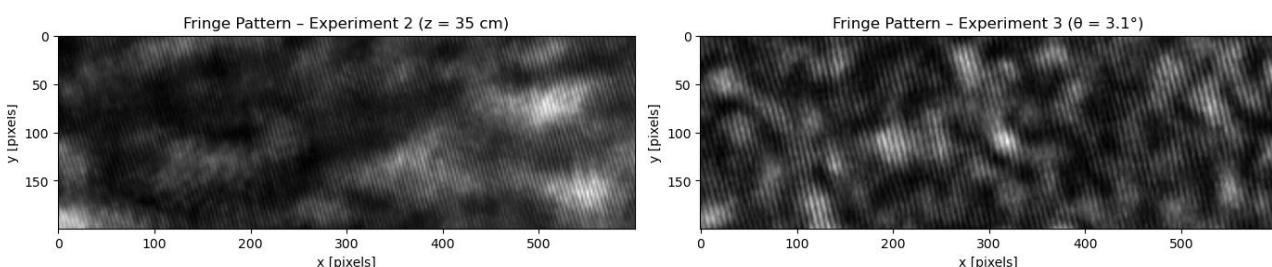
הזריות שבטבלה חושבו על-פי מיקום האובייקט על גבי הנייר המיקרומטר, כפי שהוסבר לעיל. לצורך אחידות בתהיל' השחזור, השתמשנו בזריות מעוגלות (בטור הימני), שלهن הוגדרה אינדאות אחידה של  $0.3^\circ \pm 0.3^\circ$  שמכסה את טווח איהוודות שחושב עבור כל מהמדיות.

כעת נבחן את התמונות המשוחזרות שהתקבלו במערכת שהורכבה מחדש:



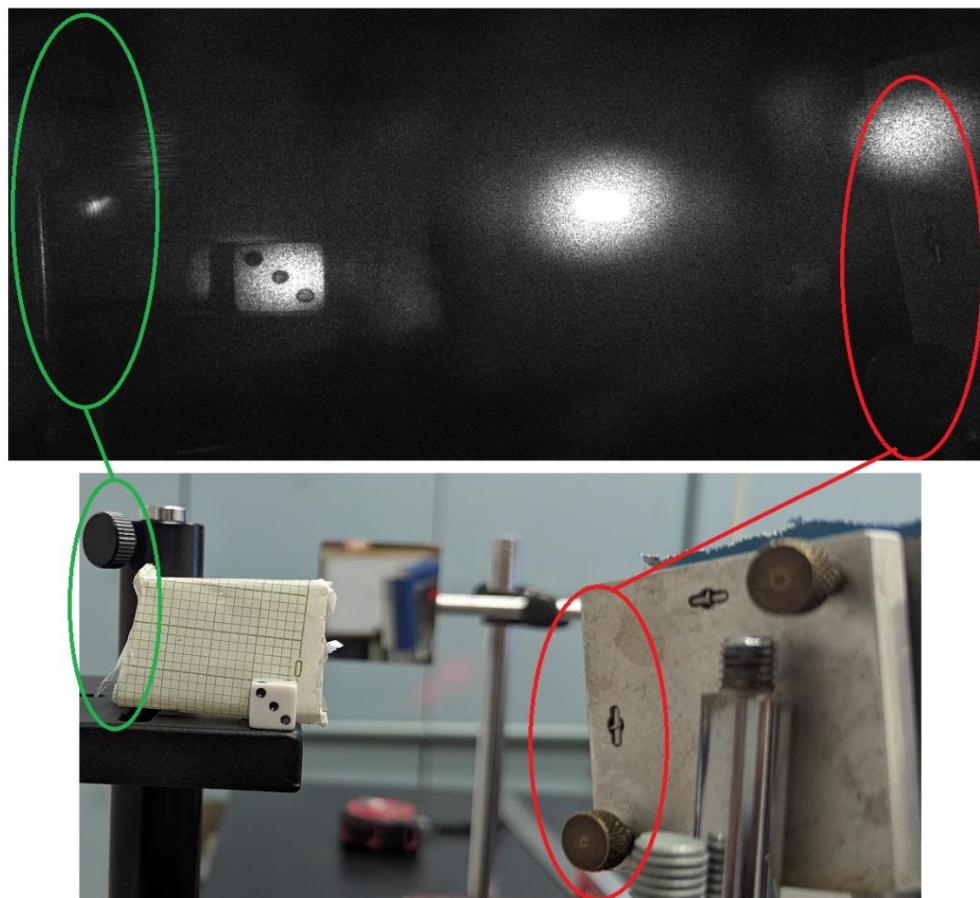
איור 32: התמונה המשוחזרת עבור  $\theta = 3.1^\circ$  בניסוי זה.

כדוגמה מייצגת לאיכות התמונות המשוחזרות לאחר בניית המערכת הגיאומטרית מחדש, מוצגת באיור 32 תוצאה השחזור עבור זווית  $\theta \approx 3.1^\circ$ . ניתן לראות כי תמונה האובייקט (קוביות המשחק) מופיעה בבהירות ובדות גבוהה בהרבה מאשר לניסוי הקודם. גבולות הפאות, המספרים על הקובייה, ואף הצללים – משוחזרים באופן ברור, דבר המעיד על איכות ההתארכות במערכת שנבנתה מחדש על סמך הלקחים מתת-ניסוי 2 כמו יישור הזווית האופקית לכל הניתן, ניקיון הרכיבים האופטיים, שימוש בסט המקטבים תוך שמירה על זווית שמצונת שמעוותת מעט ככל הניתן את קרן הרפנסוס וכן הקפדה על מערכת המאפשרת בידוד של הנבדק מבלוי להשפע על "משתני הבקרה". באיור 33 ניתן לראות השוואת בין תבניות ההתארכות ב-2 תת-הניסויים, שתי התמונות מוצגות בקנה מידה זהה תוך ביצוע הגדלה פי 2 על מנת להציג את מבנה פס ההתארכות. ניתן להבחין בבירור שבתת-ניסוי 3 מתකבות תבניות חדה וברורה יותר – עם ניגודיות טובה יותר ורעש רם נמוך.



איור 33: התמונה מציגה השוואת ישירה בין חתכי תקריב של תבניות ההתארכות עבור שתי המערכת.

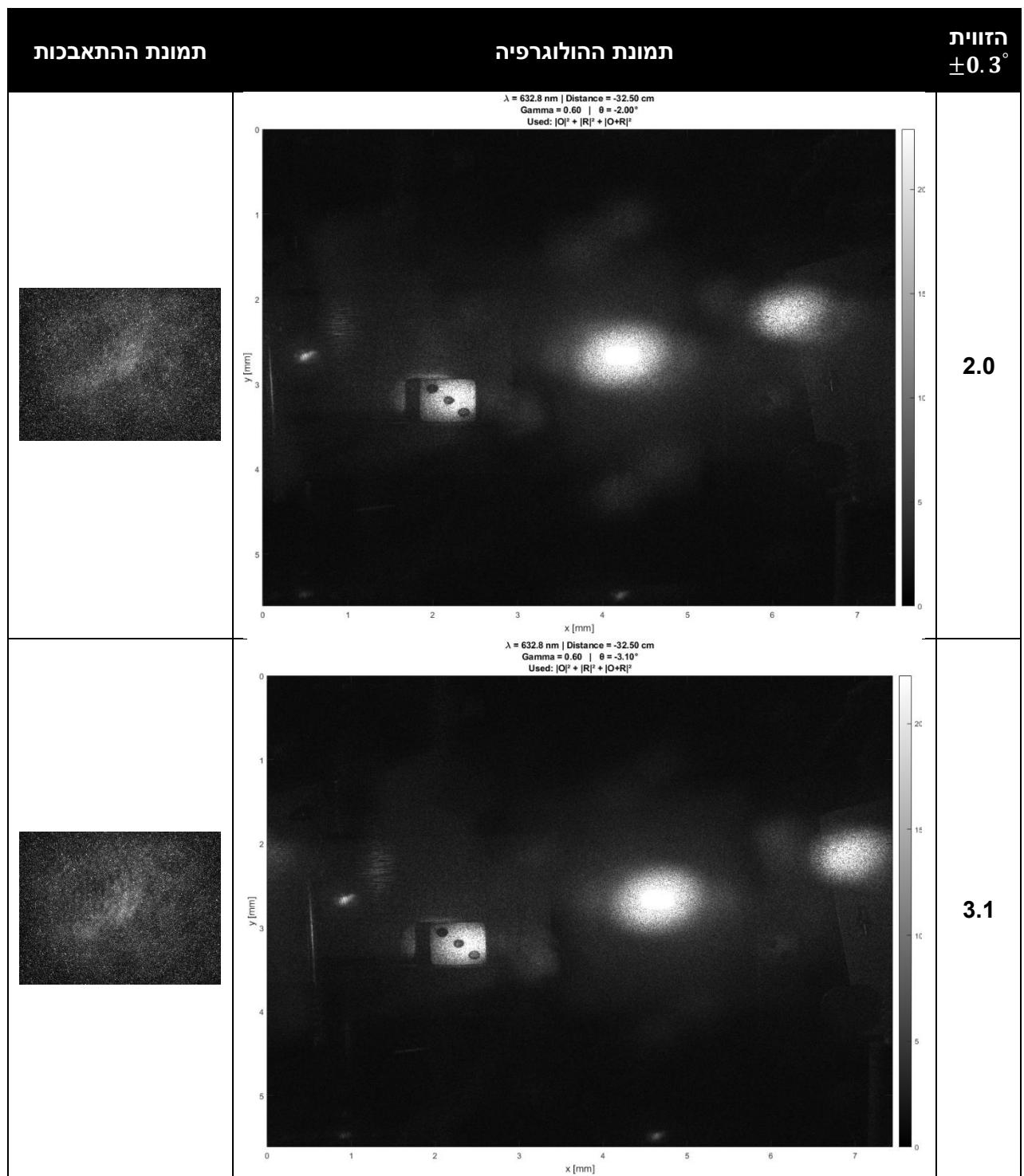
מעניין לציין כי באזוריים נוספים בתמונה המשוחזרת (למשל בצד הימני) מתקבלות תופעות אופטיות נוספות, כמו מהחזר אוור מאובייקטים נוספים במרחב שנקלטו במשור החישן, בתמונה אנו מעריכים כי ניתן לראות את צידה האחורי של מראה M – השערה זו נתמכת על ידי השוואת לתמונה שצולמה מהכיוון הכללי של החישן באמצעות מצלמה סלולרית:

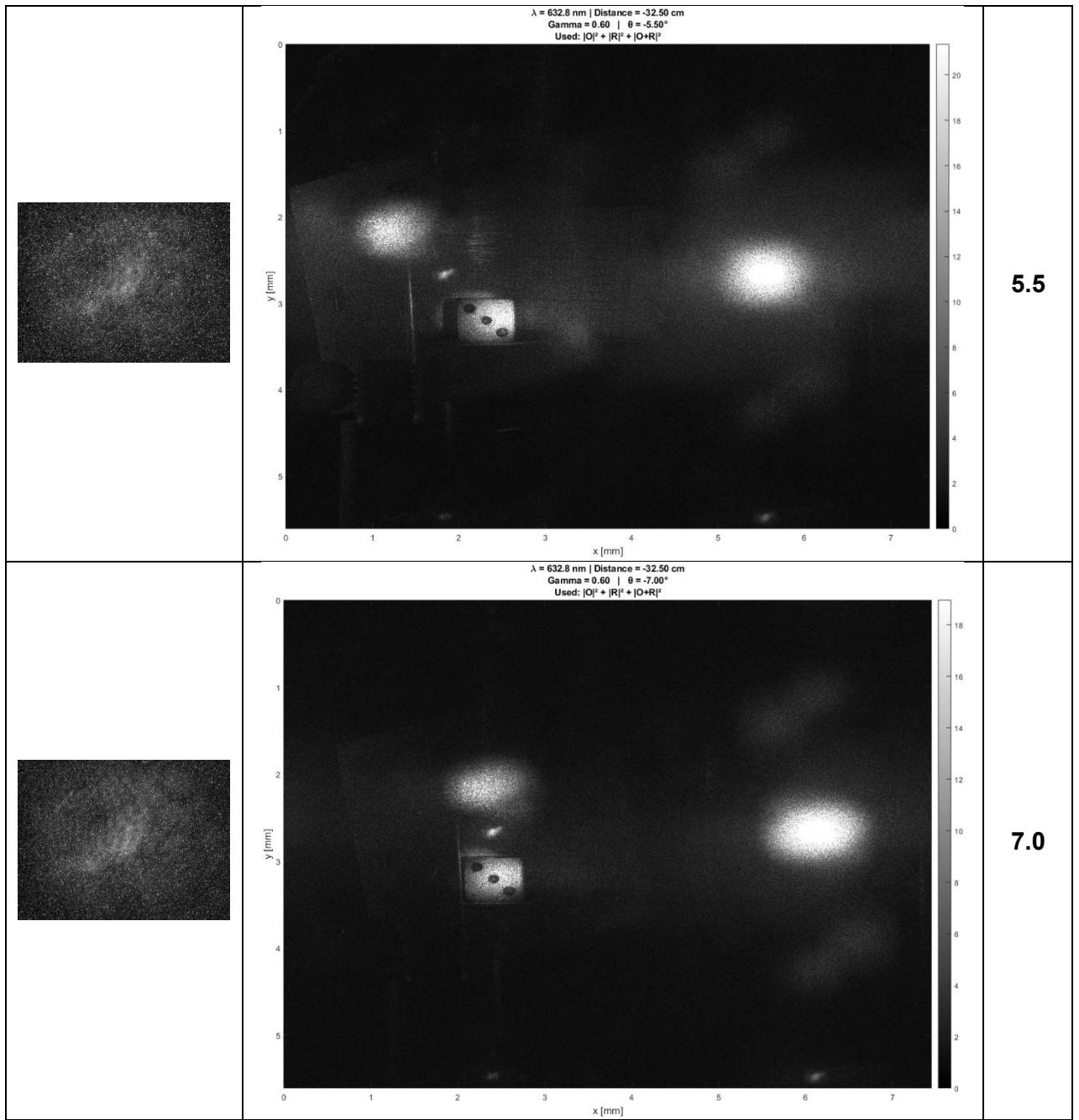


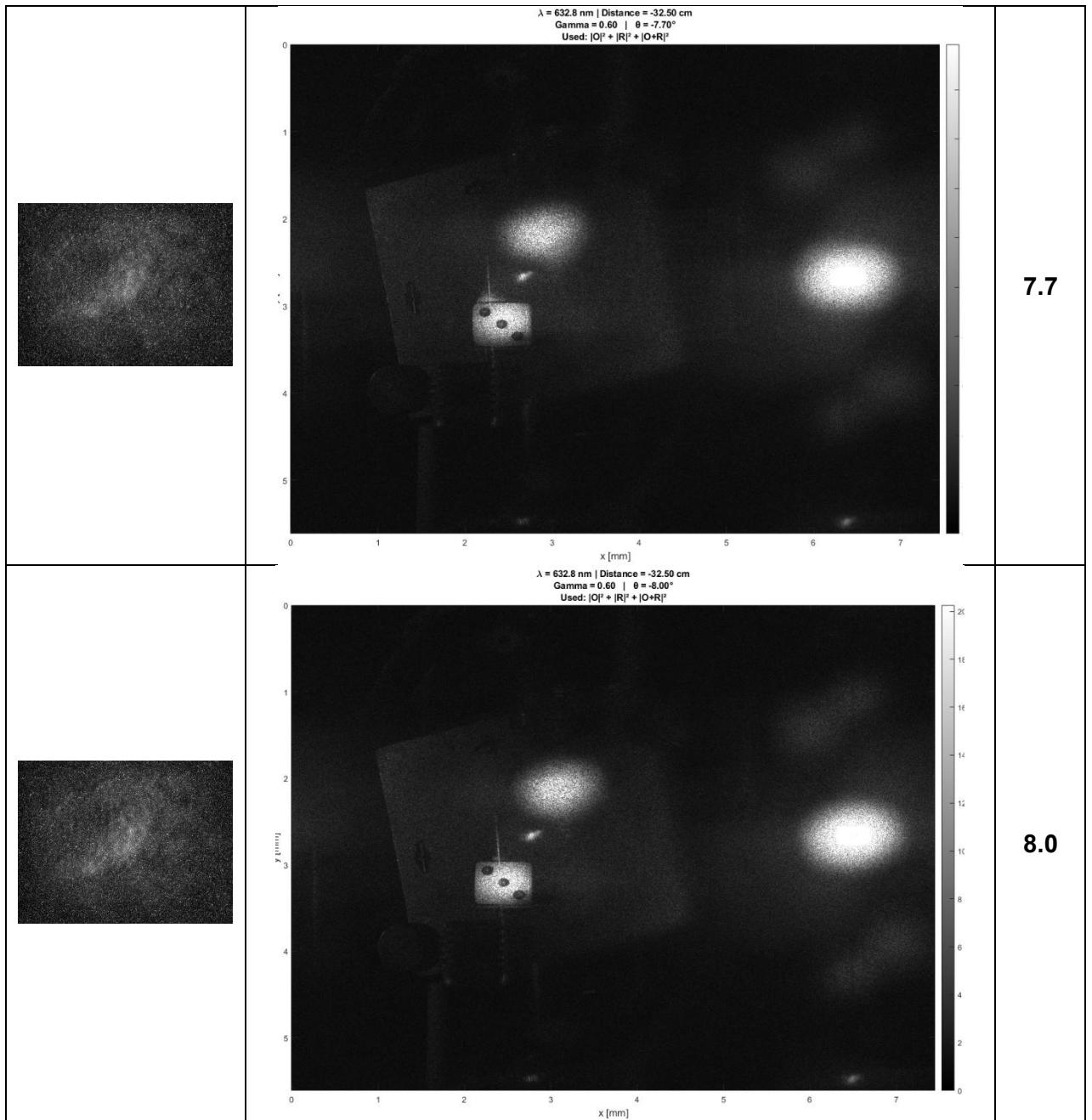
איור 34: באדום ניתן לראות את החלק האחורי של מראה M המתבל ככל הנראה מהחזר אוור המגיע ממנו ומצד ימין, בירוק ניתן לראות חלק נוסף מהבמה עליו מונח האובייקט בצורה חדה ומבנהו קודם.

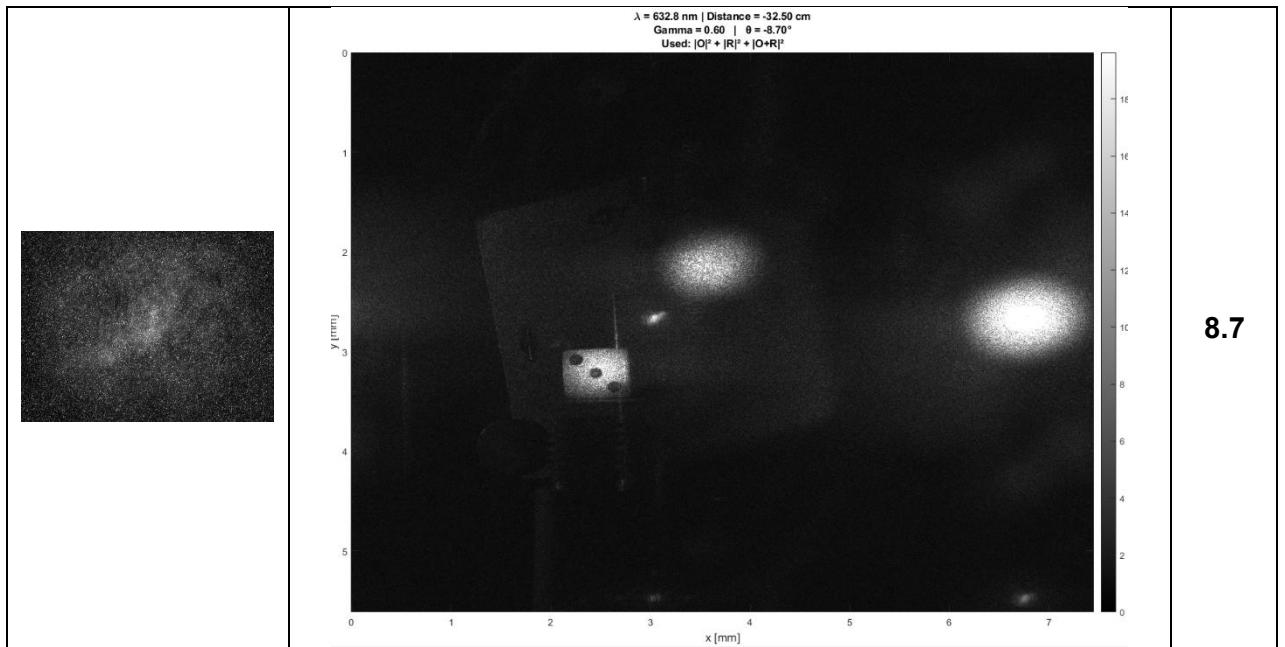
העובדת שניתן להזות אזורים מוארים מנויים ומרוחקים יחסית מחוץ לאובייקט הראשי מדגימה את חוזקה של השיטה – המידע המרחבי נשמר באופן עקבי, כולל גם החזירים עקיפים מהסביבה. בכך מתקבלת שחזור אופטי מלא של שדה הגל, ולא רק הדמיה חלקית של האובייקט.

באופן דומה לתת-ניסוי 2, נציג כעת את כל התמונות המשוחזרות לצד תמונה התאבכות שליהן:



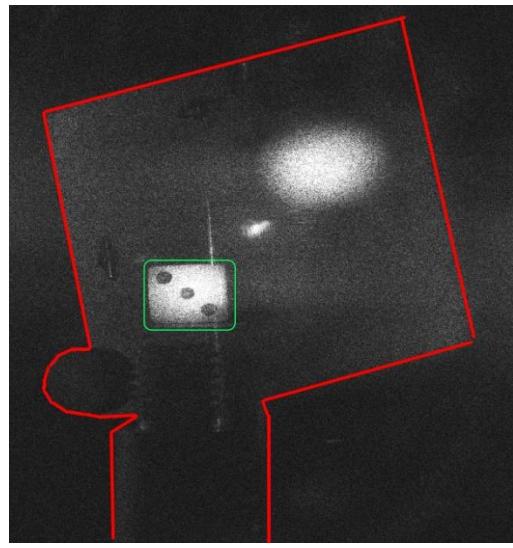






טבלה 4: ריכוד התמונות המשוחזרות ותמונה התאבכות בתת-ণיסוי 3.

בטבלת ההשוואה בין תמונות התאבכות המשוחזרות עברו חזיות התאבכות השונות ניתן להבחין כי האיכות הכללית של התמונות נשמרת היטב לכל אורך הניסוי – ללא ירידה בחדות, ניגודיות או רמת רעש – זאת ככל הנראה משוםSCP של חזיות שנבחרו ממציאות מתחת גבול החזיות המקסימלית המותרת לשחזור. בנוסף, עברו חזיות הגבירות יותר נראית האריה אחידה וברורה של קוביית המשחק עם הפקתה של הצללות חלקיים שהופיעו בהזויות נמוכות יותר. עובדה זו מצביעה על שיפור בכיוון התאורה הישירה אל האובייקט ככל שהחזית גדולה, כתוצאה מהמיוקם החדש של קרן האובייקט.



.איור 35: תקריב על התמונה המשוחזרת כאשר  $\theta \approx 8.7^\circ$

בטבלת ההשוואה בין תמונות התאבכות המשוחזרות עברו חזיות השונות, ניתן להבחין בתופעה ויזואלית עקבית: ככל שהחזית התאבכות גדולה, אזור בהיר הנראה כתצורה מלכנית מצד ימין של התמונה (גב מראה M2) נע בהדרגה שמאלה ומופיע קרוב יותר לאובייקט המרכזי – קוביית המשחק.

בზוויות הגבוהות ביותר החפיפה בין גב המראה לקובייה כמעט מוחלטת, בעוד שבחזויות הנמוכות מופיע הגב הרחק מהאובייקט ולא חפיפה. תנועה מערכית זו חוזרת על עצמה בכלל התמונות וניתנת לזהות בקלות בזכות הצורה המוכרת של גב המראה.

## 5.5 דיון ומסקנות:

1. **שיפור באיכות התמונה:** ניתן לראות שבמהלך תתרניטוי זה איכות השחזר נותרה גבוהה בכל התמונות גם כאשר זווית התאבכות גבוהה. בנויגוד לניסוי הקודם שבו שינוים בגיאומטריות המערכת הובילו לירידה באיכות התמונה. ניסוי זה כל הزواית נותרה בתחום המותר מבחינה תיאורטית, וכך מתאפשרת לבניית התאבכות תקופה לכל זווית. בנוסף, עבור הزواיות הגבוהות יותר ניכרת הארה טובה יותר של האובייקט (קוביות המשחק) – באופן אפשרי ש恢 Zur בורר ללא הצללות שימושיות. זאת ככל הנראה תוצאה של זווית הפגיעה המשופרת של קרן הליזר באובייקט, אשר מחייב יותר אור לעבר החישין.
2. **הופעת השתקפויות בתמונה המשוחזרת (Parasitic Holograms) [7]:** לאורך סדרת תמונות השחזר בزواיות שונות התגלתה תופעה עיקבית של הופעת צורה מלכנית בהירה בצד ימני של השחזר הנעה בהדרגה שמאלה ככל שזוית התאבכות בין קרן האובייקט לקרן ההתייחסות גבוהה. צורה זו זזהה כגב מראה 2M – חלק במערכת האופטית שלא נמצא במישור האובייקט, אך ככל זאת הופיע בולט בתמונה המשוחזרת. בהולוגרפיה דיגיטלית  $\text{z-axis off}$  כל קרן אוור קורנתית שמשתקפת ממשטחים לא מתוכנים (למשל, מהזוכיות האחורי של מראה) יכולה להתאחד עם קרן הייחוס וליצור פס' התאבכות "טפילים". פס' התאבכות בלתי רצויים אלה מתקדים כהולוגרמה משנה של המשטח המחזיר, וגורם להופעת "תמונה רפאים" בשחזר. לדוגמה, החזרות רבות בתוך המערכת (למשל בצילמות שכן מרכיבת עליהם עדשה או מגן זכוכית לשזהוא, יתכן) השתקפויות פנימיות שיגרמו לתופעה דומה) עלולות ליצור ארטיפקטים נראים.
- א. גב המראה או כל משטח מחזיר בלתי מתוכנן מתקף כאובייקט שני: הגל המוחזר ממנו מתערבב עם קרן הייחוס ויוצר לבנייה התאבכות שמקודדת אובייקט מדומה. ההולוגרמה זו של הרפאים נרשמת יחד עם ההולוגרמה הרצiosa, ובשחזר מתאפשרת תמונה של גב המראה בתוך שדה האובייקט.
- ב. אם קרן הייחוס תסומן  $C_r - U$  וקרן האובייקט  $C_o - U$  כדי突出 עצמת קרן האובייקט יחד עם קרן הייחוס על הגלאי נרשמת  $C_o |U_r|^2 + U_r = (y, x) I$  (شمיכלה כמובן את האיברים כמו שראינו עד כה) אך אם יש קרן נוספת  $U_g$  הנובעת מהשתקפות "טפילית" – נוסף לעצמה הנרשמת איברים כמו למשל:  $C_o |U_g|^2 + U_g^* U_g + U_r^* U_g + U_r U_o + U_o^* U_r + U_o |U_g|^2 = (y, x) II$  כשההולוגרמה כוללת מידע גם על ההשתקפות שהתאבכה עם קרן הרפנס שתשוחזר כתמונה בפני עצמה.
- ג. כדי להימנע מהולוגרמות לא רצויות (parasitic holograms) יש לתכנן את גיאומטריית המערכת כך שתמזרע השתקפויות קורנתיות ממשטחים

שאינם האובייקט. ראשית, יש להטוט מראות ומשתחים מחדירים בזווית צזו שההשתקפות האחוריות לא יוננו לכיוון החישן ככל הניתן. שניית, יש לבחור זווית התאבכות שאינה קטנה מדי, כדי למנוע חפיפה בין תמונה האובייקט וההשתקפות. בנוסף, אם ניתן - רצוי להשתמש בצלפים אנטוי-רפלקטיביים ובשילוב של קיטוב מותאם בין קרן האובייקט לבין הייחוס כדי לדכא התאבכות לא רציה עם השתקפות, ניתן גם לדijk את מיקום הגלאי כך שייהי מחוץ לציר החרזרות האפשריים ובכך להפחית משמעותית את היוצרות השתקפות במישור החישן.

## **6. ניסוי (4): ניסוי הרחבה – תמונה הפהaza ככלי מדידה**

### **6.1 מטרת הניסוי:**

בניסוי הholigrafia שביצעו עד כה הتمקדנו בעיקר בשחזור חזותי של תמונה האמפליודה של האובייקט, תוך שימוש של האלגוריתם הנומרי והבנה של מגבלות השחזור התיאורטי והניסויי. עם זאת, חלק מהשילוב מתאפשר גם תמונה הפהaza של השדה המכיליה מידע על פני השטח של האובייקט, אשר לא נצל במלואו במסגרת הניסויים הקודמים.

לכן, מטרת ניסוי הרחבה הייתה לבחון באופן שיטתי את תמונה הפהaza ולבירר האם ניתן להשתמש בה כבסיס לכיוון מדוק של עומק וגאומטרית פני שטח. מטרה זו עולה בקנה אחד עם יישומים מוכרים של הוליגרפיה דיגיטלית בתחוםים כמו profilometry contact-non-contact – מיקרוסקופיה דיגיטלית, ובדיקה חספօס, אשר משמשים בפועל בתחוםי מחקר שונים – למשל באפיון wafers בהנדסת מוליכים למחצה, במדידות תלת-ממדיות ברפואה ועוד.

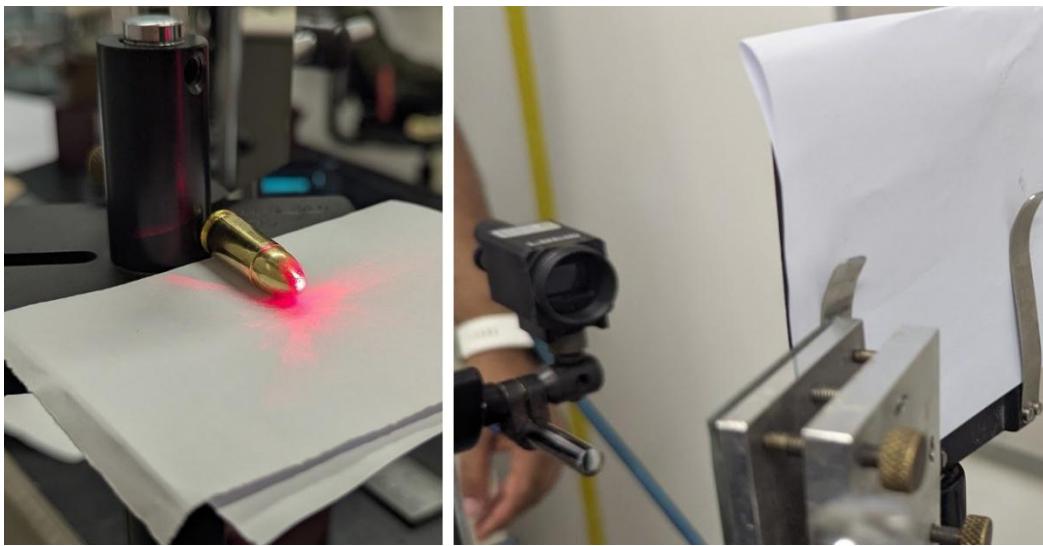
כך שלמעשה רצינו לבדוק:

- מדידת הבדלי גובה מיקרומטריים בין אזורים שונים באובייקט ע"י הפרשי פאהז.
- הערכת חספօס משטח ממוצע.
- ביצוע המדידות על בסיס מערכת הניסוי הקיימת בה השתמשנו בתת-הניסוי האחרון.

### **6.2 מערכת הניסוי:**

מערכת הניסוי בניסוי הרחבה התבססה על אותה תצורה אופטית ששימשה בתת-הניסויים הקודמים, תוך שימוש רכיבים פיזיים וגיאומטריים כר' שניתן לקבוע את מרחוק האובייקט וחוויות היחס – כמעט מושלמת:

- כאשר נבדק אובייקט תלת-ממדי הוא הונח על גבי הבמה באופן דומה כך אשר נבדקו משטחים שונים הם הוצבו בתוך מסגרת הידוק מתכתית המיועדת לקיבוע שקופיות.
- **האובייקטים שנבחרו:**
  - דגם פלסטי קטן בצורת דמות תלת-ממדית מצוירת המיצג אובייקט בעל פרטים עדינים ורמות גובה משתנות. למרות שמקור הדגם אקריא (דוגמת דמות פופולרית) תפקידו בניסוי היה לשמש כמודל גיאומטרי לבחינת רגישות השחזור לפרטים קטנים.
  - קליע כדורי בקוטר 9 מ"מ מסוג 9x19 FMJ, אשר שימש אובייקט מדידה לבחינת פרטיהם גיאומטריים מוכרים – כגון שקעים, חיתוכים והבלטה של שלו' הcadro. במודל זה ניתן לבצע מדידה כמותית של עומק, תוך השוואה לערכיהם סטנדרטיים.
- **משטחים שנמדדו:**
  - דף נייר חלק סטנדרטי.
  - קרטון גלי לבידוד כוותק קפה – בעל טופוגרפיה גיאומטרית גלית ברורה (בקירוב פרופיל סינוסואידלי).
  - סוגים שונים של ניירות שיוף בדרגות חספօס משתנות.



איור 36: אובייקט תלת-ממדי מונח על הבמה לצד משטח המואمد למחזק שקופיות.

### 6.3 מהלך הניסוי:

בניסוי ההרחבה השתמשנו בשיטת שחזור השדה המלא כפי שהראנו בניסויים קודמים אך כדי לבצע חישובים ומדידות מרוחביות נרצה לבצע שימוש במידע הפאזי העומד לרשותנו לאחר שחזור השדה - באמצעות תמונה הפאהזה נישם ובוצע חישובים של עומקם, מדידת חספויו, ואנליזת פאהזה מקומית.

במעבדה, נבצע שחזור מלא של התמונה באופן דומה לניסויים קודמים ע"י צילום 3 התמונות באופן דומה וננצל כעת את כל המידע המתתקבל בשחזור.

#### 6.3.1 פאהזה כ הפרש דרך אופטי:

כאשר קرنלייזר מאירה על פני אובייקט תלת-ממדי האור המפוזר ממנו נושא עמו מידע מרוחבי על פני שטח האובייקט. בקרן הרפרנס לעומת זאת נשמרת חיזית גל נקייה משינוי פני השטח אלו. במערכת הולוגрафית מסוג off-axis, שתי הקרניים נפגשות במישור הגלאי ויוצרות תבנית התאבכות המיקודדת ע"י הפרשי הפאהזה את הפרש הדרכ האופטי (OPD – Optical Path Difference) בין הקרניים. המידע שנמדד במצלמה הוא למעשה מידע על הפרש המסלול האופטי בין קרן האובייקט לבין הרפרנס. בהנחה שמקדם השבירה אחיד והקרניים נעוטות כלפיו אויר, הפרש זה נובע אך ורק מהפרש גובה של פני השטח. לכן, ניתן לפרש את מפת הפאהזה כ"מפת גובה יחסית" של פני האובייקט.

כאמור, לאחר ביצוע שחזור של השדה המרוכב ע"י פרנל (Fresnel back-propagation) הפאהזה  $\phi(x, y)$  בנקודה מתבקשת מהתוך השדה המשוחזר  $(y, x)$  גלי שנייתן לראות בחלק 3.4.1 בו הצגנו את האלגוריתם לשחזור:

$$\phi(x, y) = \arg\{\Gamma(x, y)\}$$

הקשר בין הפאהזה המשוחזרת ל-OPD נתון על-ידי:

$$(67) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta OPD$$

אם נניח שהקרניים נעות בתווך הומוגני עם מקדם שבירה  $1 \approx n$ , כך שאורך הדרך האופטית שווה לאורך הדרך הגיאומטרית, כלומר  $\Delta z \approx DOPD \Delta \sin(\theta)$  נקבל כי:

$$(68) \quad \Delta z = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \sin(\theta)} \cdot \Delta \phi$$

- $\Delta z$  – הפרש הגובה בין 2 נקודות על גבי האובייקט.
  - $\Delta \phi$  – הפרש הפאזה בין 2 נקודות (לאחר unwrapping).
  - $\theta$  – הזווית בין קרן האובייקט לקרן הרפרנס. הזווית  $\theta$  היא למשה  $\theta_{eff}$  ומוספעת זו מהזווית האופקית שנמדדה גיאומטרית ומתרומה הזווית האנכית הקטנה (שainaña נמדדה).
- גישה זו מאפשרת המרה של מדידת פאזה ביחידות רדייאנים לחידות מרוחביות (למשל מיקרומטרים) וכן לעשות שימוש בהולוגרפיה הדיגיטלית כטכניקת מדידה תלת-ממדית.

### Phase Unwrapping 6.3.2

הפאזה המוחשבת מהשחזור מתתקבלת בתחום ערכים מצומצם של  $[\pi, -\pi]$  וכך כל מעבר של הפאזה את התחום הזה יוצר קפיצות חדות ולא פיזיולוגיות בגודל של  $2\pi$  (הפאזה הראשונית היא למשה מודולו  $2\pi$ ). תופעה זו נקראת *wrapping* ונורצת להסירה כדי לאפשר מדידה רציפה של הפרשי הגובה בדומה לפריסת היקף מעגל לצורת קו בתהליך שנקרא *unwrapping*. במערכת שלנו ישנו ארבע שיטותائلו (בוחן אפשר לבחר באמצעות ה-UI):

- פתיחת פאזה בציר אחד ( $x$  או  $y$ ).
- פתיחת פאזה דו שלבית ( $x$  ואו  $y$ ).
- פתיחת פאזה בשיטת *least-squares*.

שיטות פשוטות מסתמכות על פтиיחה חד-כיוונית – כלומר חיבור קפיצות של  $\pm 2\pi$  לאורך שורות (ציר  $x$ ) או عمودות (ציר  $y$ ) בהנחה שהשינוי בין פיקסלים סמוכים קטן מ- $\pi$ . ב-*Matlab* קיימת פונקציה פשוטה צזו באופןה אך עם זאת, שיטות אלו רגישות לרעש ולשינויים מרוחביים חדים, ונתקלות בעיות כאשר יש לולוות או קפיצות פתאומיות במפה.

### 6.3.3 יישום וביצוע מדידות:

לאחר ביצוע השחזור ופתיחה הפאזה (phase unwrapping) נוכל לבצע אנליזה דרך הממשק הגרפי שבנינו:

- **מדידת עומק** – המשמש בוחר שתי נקודות על גבי תמונה הפאזה. בכל נקודה מחושב ממוצע פאזה מקומי בסביבה ריבועית (ברירת מחדל:  $3 \times 3$  פיקסלים), כדי להפחית רעש ולשפר את הדיוק. הפרש הפאות מומר לעומק באמצעות המשוואה לעיל. תצוגה גרפית מצינית את הנקודות ומדפיסה את ערכי הפאזה והעומק שהתקבלו.
- **מדידה אינטגרלית לאורק קו** – נסמן שני קצוות, מתבצעת דגימה של  $200 = N$  נקודות לאורק הקו בינהן. בכל נקודה נמדדת פאזה ממוצעת והפלט הוא עומק ממוצע המבוסס על אינטגרציה נוראית (שיטת טרפז) לאורק הпроופיל. גישה זו מתאימה במיוחד לאובייקטים בעלי שיפועים או מבנים ליניארים, ומספקת ממד גיאומטרי שאין תליי בנקודות בודדות.

- מדידת חספוי שטח (RMS Roughness) – ניסינו לחשב על שיטה כמותית להשוואת חספוי פני השטח בין דגמים או משטחים שונים שנמצאו במערכת הholographia ולשם כך, הצענו ממד מבודד-פאזה המתבסס על ההנחה הפיזיקלית כי מפת הפאזה הלא-עטופה (unwrapped phase) שמתකלת לאחר השחרור משקפת את פרופיל הגובה של פני השטח בהנחה שהשינויים בפאזה נובעים רק מהפרשי גובה אומטריים, ולא משינויים באינדקס השבירה או בהשפעות תרמיות במקורה זה.

בקשר זה, חיפשנו ממד שיאפשר לנו לאפיין את הפיזור המוקומי של הגבהים באזורי נתון, כמובן, למדוד עד כמה פני השטח "חריגים" מהמשור הממוצע. לשם כך בחרנו לשימוש במדד  $\text{Root Mean Square}$ .

מדד RMS מוגדר באופן כללי כ-"שורש ממוצע ריבועי של ערכים", כלומר:

$$(69) \quad RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

זהו ממד מקובל למשל לאנרגיה או עצמה ממוצעת במערכת פיסיקלית אך משמש גם כמדד לפיזור של ערכים או רעש סביב מנג' ייחוס. כאשר מחשבים RMS של סטיות מהערך הממוצע מקבלים את סטיית התקן:

$$(70) \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

במקורה של חספוי פני שטח – נתיחה לפיזור הגבהים יחסית למישור הממוצע. כאמור, ה-  $\text{RMS Roughness}$  שקול בדיק לסטיית התקן של הגבהים באזור המדידה. וכן ככל עפ"י משווהה (68) לתרגם את סטיית התקן של הפאזה (unwrapped) לערך RMS לפי:

$$(71) \quad Rq = RMS_z = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \sin(\theta)} \cdot \sigma_\phi$$

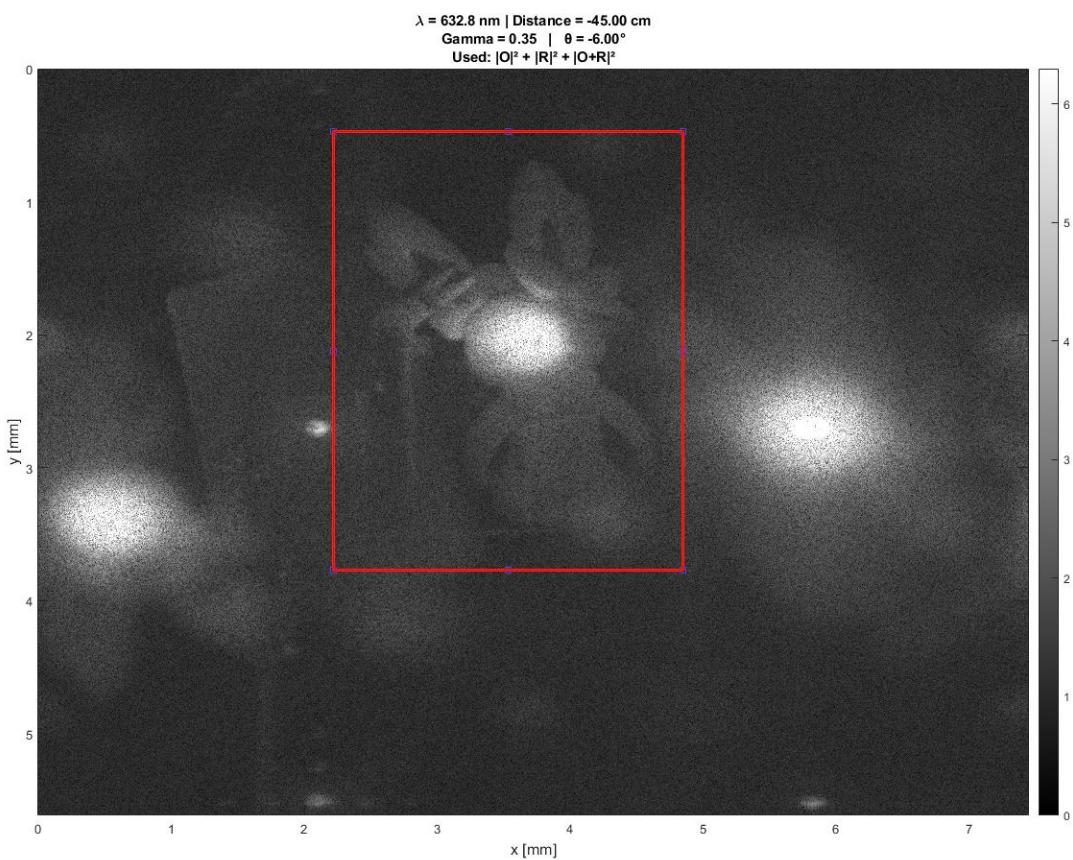
כאשר  $\sigma_\phi$  היא סטיית התקן של ערכי הפאזה באזור הנבחר ( $ROI$ ) והתוצאה  $Rq$  היא חספוי  $RMS$  בגובה ביחסות מרוחביות.

## 6.4 תוצאות הניסוי ועיבודן

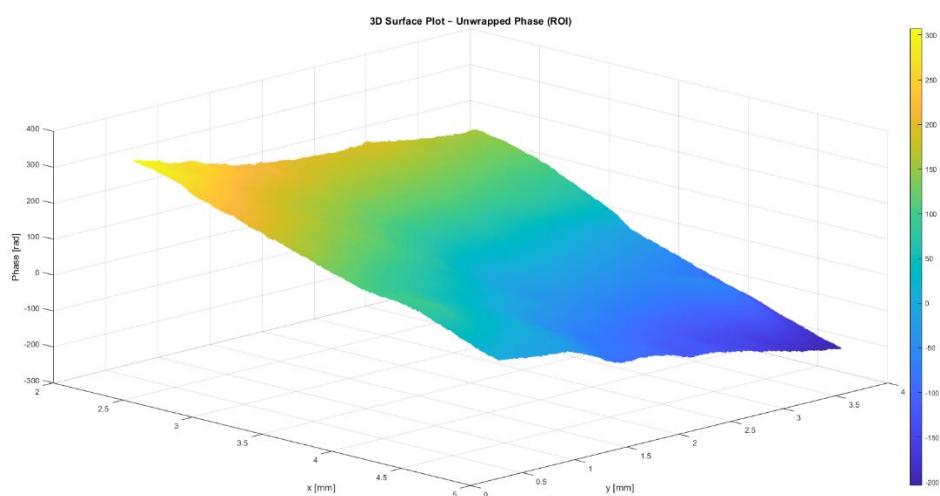
תהליך העיבוד בוצע בשלבים, כאשר תחילת נתחו אובייקטים תלת-ממדיים ברורים לצורך אימויות התקינות השיטה, ובהמשך הורחב הניתוח למדידות עומק וחספוי באמצעות תמונה הפאזה.

### 6.4.1 שחזור אובייקט תלת-ממדי - דמויות:

כניסיו רצוננו לבדוק את תהליכי שחזור תמונה הפאזה בחרנו באובייקט תלת-ממדי ברור – דמות פלסטיק קטנה (צעצוע). המטרה הייתה לבדוק האם מבנים מרוחביים בעלי בליטות ושקעים ברורים באים לידי ביטוי בשחזור הפאזה ובਮפות העומק שנוצרות ממנה. עם זאת, תוצאה השחזור שהתקבל לא הייתה מספקת: האובייקט התקבל מוטושטש, חסר פרטים, ולא סימנים מובהקים של טופוגרפיה ברת מדידה. כן, לא ביצעונו עבורו מדידות עומק והוא לא כלל בהמשך הניתוח.



איור 37: תמונה האמפליטודה המשוחזרת וה-ROI הנבחר.



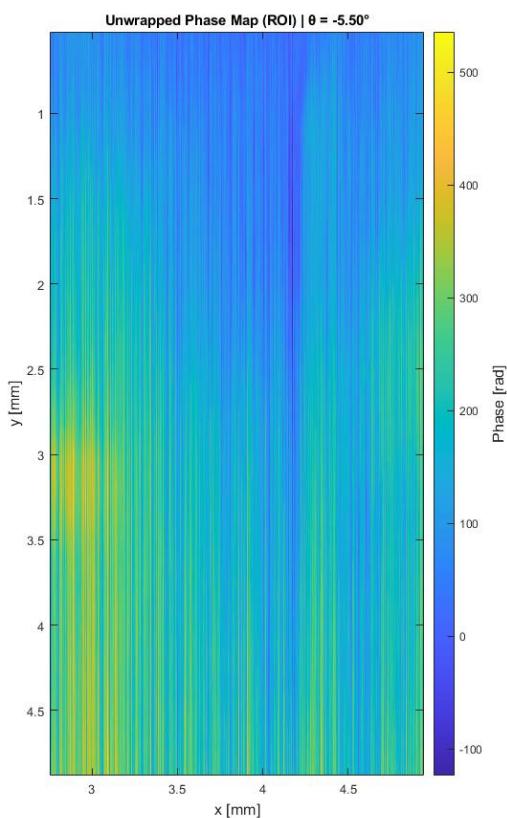
איור 38: תמונה הפазה התלת-ממדית עבור ה-ROI הנבחר.

#### 6.4.2 אובייקט תלת-ממדי כמקרה בוחן – תרמיל 9x19 FMJ:

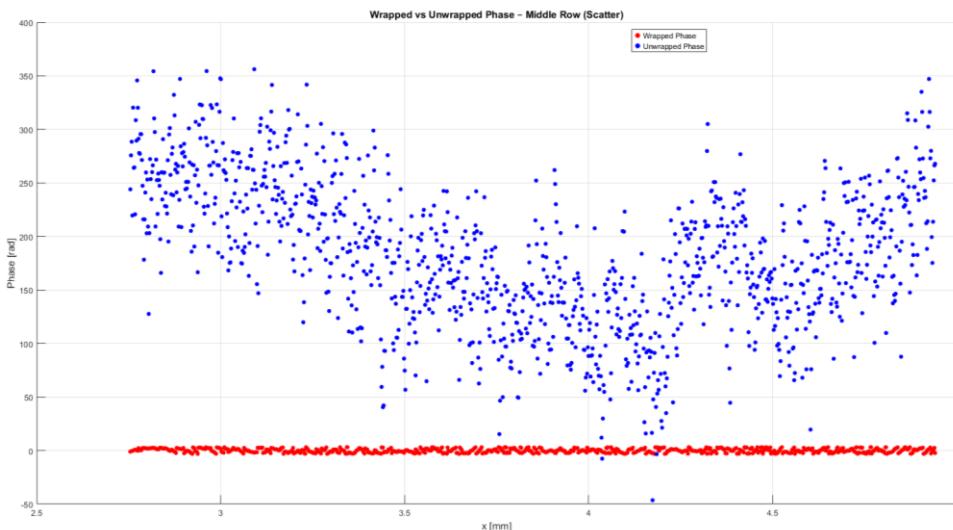
לצורך בדיקת תהליכי השחזור יוכלו הבדיקות הגאומטרית בעיבוד, נבחר קליע 9x19mm FMJ שהיה ברשותנו כאובייקט מבחן. יתרונו של אובייקט זה בשני היבטים:

- ראשית, קיימן עבורי תיעוד גאומטרי מדויק המאפשר לבצע השוואה כמותית.
- שנית, מבנהו הכלול קוי מתאר ברורים, שיפורים גליליים, וחריצי יקפי (groove) בתחום תחתית התרמיל – כל אלו הופכים לאובייקט נוח למדידה ולבחינה ויזואלית.

בשלב הראשון של תהליכי העיבוד ישמה תמונה הפaza המשוחזרת wrapped באמצעות הפונקציה המובנת ב-Matlab שלאחר ניסיונות רבים התברר כי מיועדת לפחות פריסה של הפaza בציר בודד בלבד. ניסינו תחילה לפתח שורת פיקסלים אופקיים יחידה החוצה את מרכז ה-ROI ולאחר מכן את כל הפיקסלים לאורק ציר x או y בלבד. אך מכיוון שנחנכו מעוניינים בפaza המייצגת אובייקט תלת-ממדי ניסינו לשלב פריסה ב-2 שלבים, ציר x ולאחר מכן ציר y.



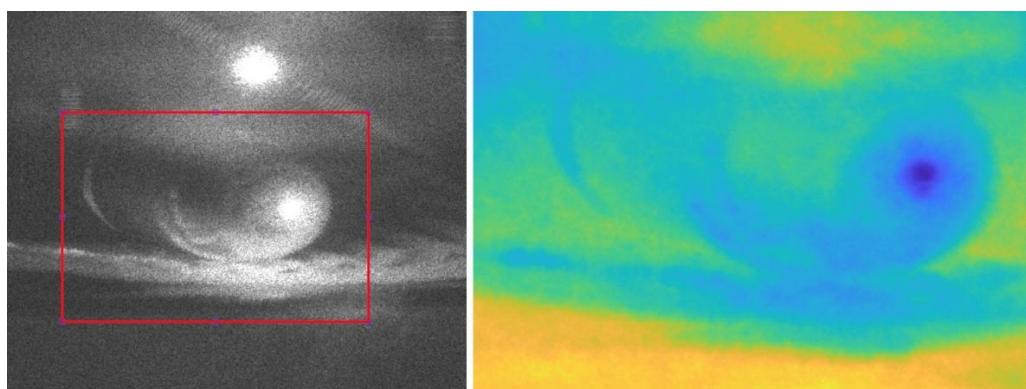
איור 39: תמונה הפaza ב-2 צירים ע"י unwrap/unwrap מובנה.



איור 40: גרפּה wrap-unwrap עבור חיתוך שורה בודדת לפונקציה המובנת.

כפי שניתן לראות באירועים 39, 40 – פונקציות אלו לא היו מסוגלות להתמודד עם שדה פאזה תלת-ממדי מסווג זה. הן גרמו לקפיצות שריריות ובפרט בשיטה הדו-מידית הפешטה הפתרון לא משמר עקביות בין הציריים, והתוצאה אינה רציפה.

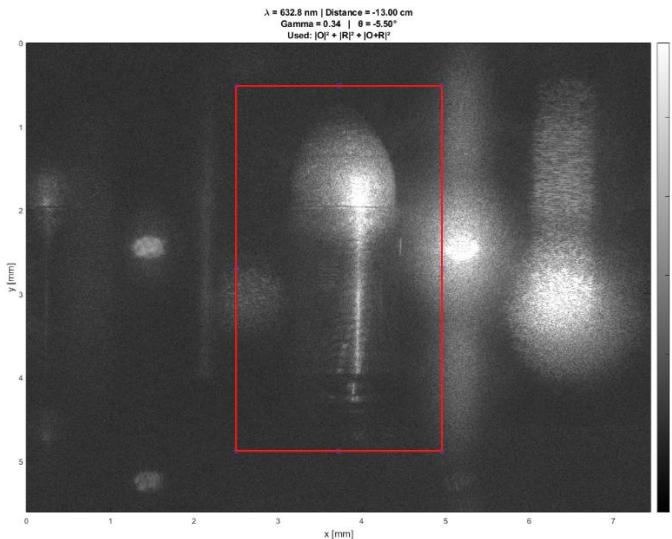
כדי לפתור בעיה זו, עברנו לשימוש באלגוריתם נומרי לפתיחה פאזה המבוסס על פתרון של משוואות פואסן בגישה Least Squares (LSQ). שיטה זו, המופיעה בספרות המדעית (Ghiglia & Romero, 1994), מבוססת על חישוב גרדיאנט של הפאזה העוטפה, הערכת תרומות השגיאה ופתרון משוואות פואסן ע"י קירוב נומרי איטרטיבי. השיטה מחזירה מפה רציפה של הפאזה תוך שמירה על עקביות מרחבית. לצורך היישום נעשה שימוש בקוד מוקן מאגר MATLAB File Exchange [8].



איור 41: תמונה הפאזה לאחר שימוש באלגוריתם LSQ.

לאחר הפעלת השחזר בשיטה נראה כי התרמילי ( $9 \times 19$  FMJ) סיפק פאזה חלקה ובורורה יחסית, המגיבה היטב לשינויים גאותרמיים. שתי תמונות נשמרו: האחת במבט עליי (כאשר התרמילי שוכב) והשנייה במבט פרופיל (כאשר התרמילי עומד אנכית). בהשוואה לאובייקט הצעוף שנבדק קודם לכן ממנה התקבלה מפה פאזה רועשת וחסרת מבנה עקבי – פנוי השטח של התרמילי שהיבו פאזה נקייה ורציפה לאחר עיבוד עם פריסת LSQ. תכונה זו באה לידי ביטוי במיחד כאשר משווים בין שני מצבים צילום: בתמונה העליונה מתקבלת תצוגה מרחבית ויזואלית של מבנה פנוי השטח,

ואילו בתצוגת הפרופיל מתתקבל שדה פאזה מדורג ואופייני המאפשר מדידה כמותית של מבנים בעלי עומק.



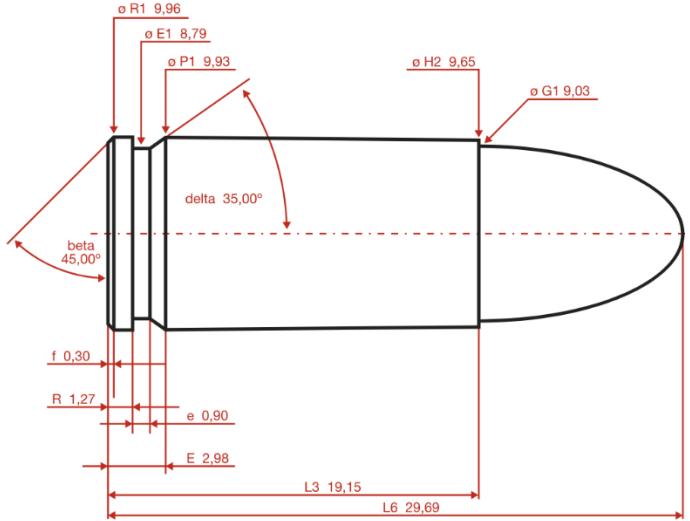
איור 42: תמונה הפרופיל של האובייקט.

בהתבסס על כך, נבחרה תמונה הפרופיל כבסיס לביצוע מדידה כמותית של עומק החריץ ההיקי (groove) בתחתית התרמילי. על מנת להעיר את העומק הנמדד מול ערך תיאורתי, נעזרנו בשרטוט התקני של קלייער  $9 \times 19 \text{ mm}^2$  שמוופיע באיר 43. מהשרטוט נלקחו שלושה קטרים רלוונטיים:

- $E1 = 8.79 \text{ mm}$  – קוטר החריץ עצמו.
- $P1 = 9.93 \text{ mm}$
- $H2 = 9.65 \text{ mm}$

בפועל, באזור שמעל החריץ ההיקי בתחתית התרמילי קיימת הצורה הדרגתית של הקוטר הנעה בהתאם למבנה הגאומטרי של בסיס התרמילי. לאחר והמערכת הניסויית אינה כוללת מדידה ישירה של מיקום נקודת הדגימה בצורה מדוייקת בהתאם למיקום על התרמילי או היזוקת הייחסית האנכית, לא ניתן להעיר בודדות את הקוטר המקומי. כאשר הממוצע:

$$d_{avg} = \frac{9.65 + 9.93}{2} = 9.79 \text{ mm}$$



איור 43: מידות התרמייל עפ"י תקן [19].

מכאן נחשב את עומק החירץ במיקרוניים:

$$\Delta d = d_{avg} - E1 = 9.79 - 8.79 = 1.00 \text{ mm}$$

$$\Delta z_{theory} = \frac{\Delta d}{2} = 0.50 \text{ mm} = 500 \mu\text{m}$$

אך מכיוון שמדובר בטוווח ערכיים:

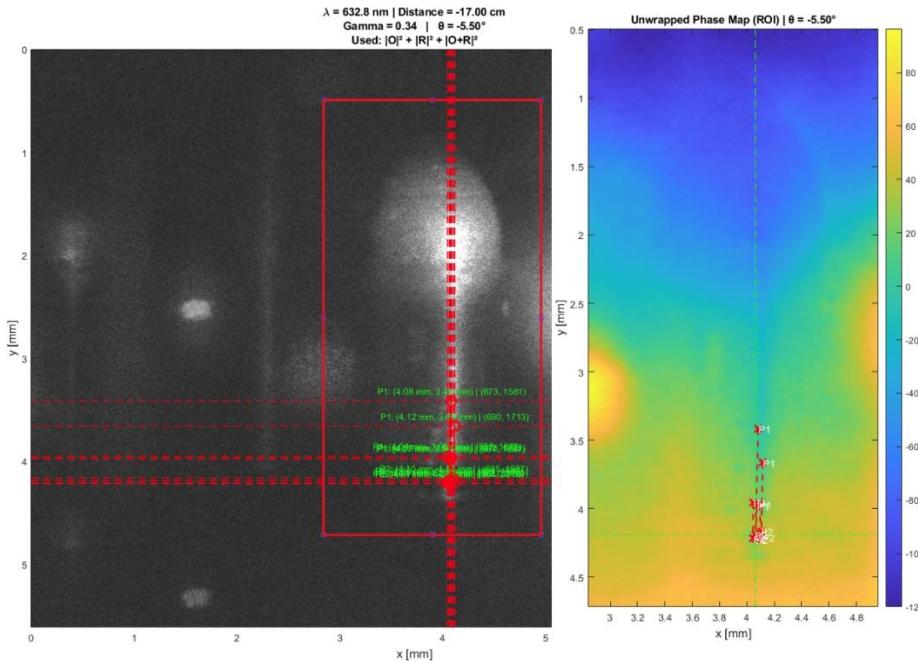
$$\Delta z_{theory} = \frac{d_{outer} - d_{groove}}{2} \rightarrow \Delta z \in \left[ \frac{9.93 - 8.79}{2}, \frac{9.65 - 8.79}{2} \right] = [570.430] \mu\text{m}$$

נקבע את הערך התיאורטי עם איזודאות שאיןה מייצגת רעש מדידה או פיזור סטטיסטי, אלא נובעת מ מגבלות מבניות וגיאומטריות בטליל ההשוואה – בעיקר בשל היעדר מידע מדויק על מיקום הדגימה ביחס למבנה התרמייל:

$$\Delta z_{theory} = 500 \pm 70 \mu\text{m}$$

ערך זה ישמש להשוואה מול התוצאה הניסיונית של מדידת העומק באמצעות הפרשי הפазה.

לאחר מכון בוצעה מדידה של עומק החריץ ע"י מימוש הנוסחא עבור  $Z$  כרך שניית לדקור בממשק ה-  
UND 2 נקודות בינהן מתבצע חישוב הפרש הפaza וממנו הפרש הדרכים האופטיות. כדי למזער את השפעת הרעש מתבצע ממוצע של ערך הפaza בכל אחת מהנקודות שנבחרו בסביבתה ברדיוס של 2 פיקסלים. בכל מדידה בוצעה גם אינדיקציה גרפית בתמונה הכלולת קווים וסימונים כרך שניית לדעת היכן ממוקמות נקודות הדגימה שנבחרו גם על גבי תמונה האmplיטודה המשוחזרת.



איור 44: ביצוע מדידת הפרשי הדריכים האופטיות כרך שניית לדגום על גבי התמונה המשוחזרת.

כדי להתמודד עם רעש אופטי, שונות מקומית בחריץ התר밀, והטיות סובייקטיביות בבחירת נקודות הדגימה למדידה – בוצעו שמונה מדידות בלתי-תלוויות בנקודות שונות:

| $\Delta z [\mu\text{m}]$ | $\Delta\phi [\text{rad}]$ | מדידה מס' |
|--------------------------|---------------------------|-----------|
| 196.82                   | 21.33                     | 1         |
| 268.19                   | 29.06                     | 2         |
| 321.62                   | 34.85                     | 3         |
| 440.64                   | 47.75                     | 4         |
| 380.48                   | 41.23                     | 5         |
| 345.12                   | 37.41                     | 6         |
| 335.62                   | 36.37                     | 7         |
| 356.89                   | 38.67                     | 8         |

טבלה 5: מדידות חרץ.

כרך שהתקבל:

- ערך ממוצע:  $m = 330.7 \pm 25.8 \mu\text{m}$
- ստטיסטית תקן:  $s = 73.1 \mu\text{m}$  (**פיזור הערכים**)
- שגיאה ממוצעת:  $\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{73.1}{\sqrt{8}} = 25.8448$  (אי הוודאות של הערך המשוקל)

בהתאמה לערך התיאורטי שחושב מתוך מדידות התקן – התוצאה הניסיונית שהתקבלה קטנה ב- $\sim 34\%$  מהערך הצפוי ונמצאת מחוץ לטווח אי הוודאות של הערך התיאורטי.

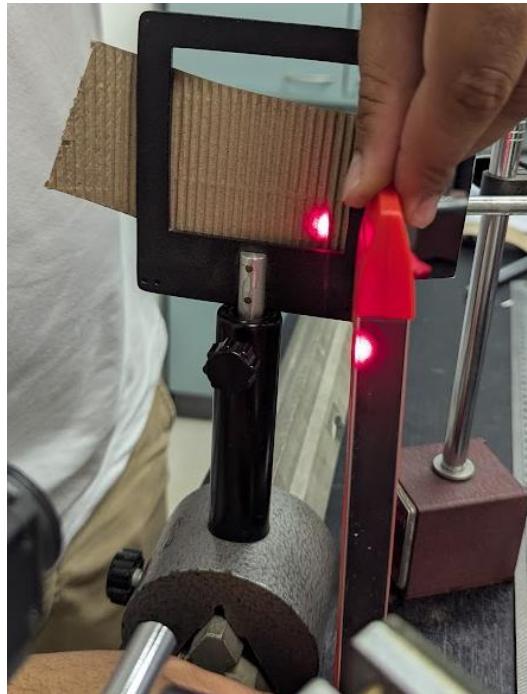
#### 6.4.3 מדידת חספוי משטחים:

נרצה לישם את העיקרון שתואר באופן תאורטי בסעיף [6.3.3](#) לצורך מדידה חספוי משטחים במעבדה. לצורך, תחת ההנחה שהשוניים בפaza נובעים רק מהפרשי גובה פיזיים, ניתן לתרגם את סטיית התקן של ערכי הפaza באוצר מדידה לערך חספוי גובה באמצעות יחס לינארי.

כדי למדוד סטיית התקן לערך הפaza נבחר אזור עניין (ROI) על גבי מפת הפaza הלא-עטופה שהוא תת-מטריצה מתוך התמונה עליו חושבה סטיית התקן כאשר  $N$  יהיה מס' הפיקסלים באוצר,  $\alpha$  הוא ערך הפaza בפיקסל ה- $i$ - $j$  והוא ממוצע ערכי הפaza באיזור.

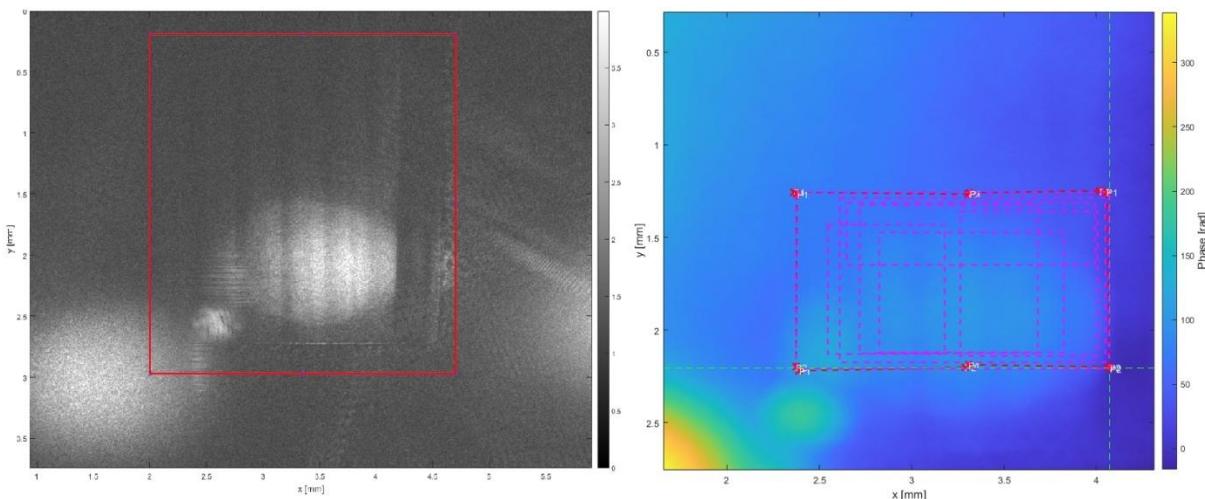
לצורך דוגמא מופשטת, נניח שה-ROI הוא איזור עם 4 פיקסלים עם ערכי פaza (ברדייאנים):  $\{0.1, -0.2, 0.2, -0.1\}$ . נניח כי אורך הגל זהה למערכת במעבדה ועבור דוגמא פשוטה זו נתעלם מזווית הייחוס ונחשב את החספוי:  $0.158 \text{ rad} = \sqrt{0.025} \approx 0.158 \text{ rad}$ .  $Rq = \frac{0.6328}{2\pi} \cdot 0.158 \approx 0.016 \mu\text{m}$ .

בהמשך לכלי מדידת העומק, ישנו את העיקרון לעיל בתוכנת Matlab שבניינו לניסוי כך שבעת לחיצה על מדידת Roughness המשמש בוחר מלון/ $ROI$  מתוך מפת הפaza באמצעות העכבר והקוד שומר את גבולות המלבן, מחלץ את תת-המטריצה המתאימה מתוך מפת הפaza ומחשב את סטיית התקן וערך RMS. מפת הפaza עצמה לא מציגה ישירות את תכונות פני השטח היא "יעורת" לטקסטורות חזותיות. לכן, כדי לבחור  $ROI$  מדויק ורלוונטי המשמש מסתמן על תמונה זו האמפליותה המשוחזרת (המייצגת את המראה החזותי של האובייקט). נקודות ייחוס בתמונה זו מאפשרות לזהות אזורים רלוונטיים – במיוחד כאשר מדובר במשטחים שהteksturora שלהם אינה בולטת בפaza. לכל משטח נבחרו מספר איזורי  $ROI$  בהתאם לשוניים ובמיקומים מגוונים. כל מדידה כזו מספקת ערך חספוי יחיד. את המדידות ריכזו בטבלה מהן חושב ממוצע החספוי וסטיית התקן – כהערכת אי-הווידאות למדידה עבור כל משטח שנדגם.



איור 45: משטח הקרטון הגלוי מוצב במערכת, בתמונה ניתן לראות גם דוגמא לביצוע יישור של הרכיבים באמצעות פלס כדי לצמצם את הזווית האנכית הכל הנitin.

המשטח הראשון שבו נבדקה השיטה הוא קרטון גלי, כפי שראויים באIOR 45 (מחסוג המשמש לבידוד חום של כוסות קפה). מדובר במשטח פשוט יחסית מבחינת הגאומטריה – בעל פרופיל מחזורי דמיוני. יתרונו בכך שהוא מאפשר את רגישות שיטת המדידה לכיווניות: הקרטון צולם בשתי זוויות שונות, כאשר כיוון ה"רכסים" היה אופקי או אנכי ביחס לציר ה- $x$  של המצלמה. בפועל, רק באוריאנטציה אחת התקבלו תוצאות שחזור תקינות – כאשר כיוון הרכסים היה מאונך לאנכי למשורר השולחן. באוריאנטציה השנייה, בה הרכסים היו מקבילים לציר ה- $x$  של התמונה, התקבל עיגול בוהק באזורי ההארה (השתקפות של קרן הליזר) אך לא הופיעו פרטים נוספים בתמונה השחזר. סביר להניח כי במצב זה, בניית הקרטון לא גורם להחזר משמעותי של קרן האובייקט לעבר המצלמה, ולכן לא התקבלה התאבסות אפקטיבית.



איור 46: המדידות באמצעות הסקריפט ב- Matlab.

| no' מדידה | RMS Phase [rad] | RMS Roughness [ $\mu m$ ] |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 1         | 20.64           | 397.151                   |
| 2         | 14.88           | 286.250                   |
| 3         | 10.49           | 201.937                   |
| 4         | 10.99           | 211.572                   |
| 5         | 19.46           | 374.479                   |
| 6         | 13.13           | 252.727                   |
| 7         | 19.37           | 372.727                   |

טבלה 6: מדידות RMS - קרטון גלי.

מדידות חוזרות באזוריים שונים על-פני הקרטון העלו תוצאות מדידת החספוי האפקטיבי לקרטון הגלי, במצב האנכי:

$$Rq_{cardboard} = 299.83 \pm 74.94 \mu m$$

#### 6.4.4 הקשר בין Grit Level לבין RMS:

בשלב זה התעניינו ביכולת של מערכת הholограмפה הדיגיטלית לשמש כאמצעי מדידה של חספוי פני שטח עדין במיוחד, באמצעות השוואה בין מספר דגמים של ניריות שיוף בדרגות גסות שונות (Grit Levels) וניר חלק לבן ששימש כרפרנס שטוח. מטרת הניסוי הייתה לבדוק האם קיימת התאמה בין דירוג ה-Grit לבין חספוי RMS של פני השטח, כפי שהוא מתקיים ממפט פזה.



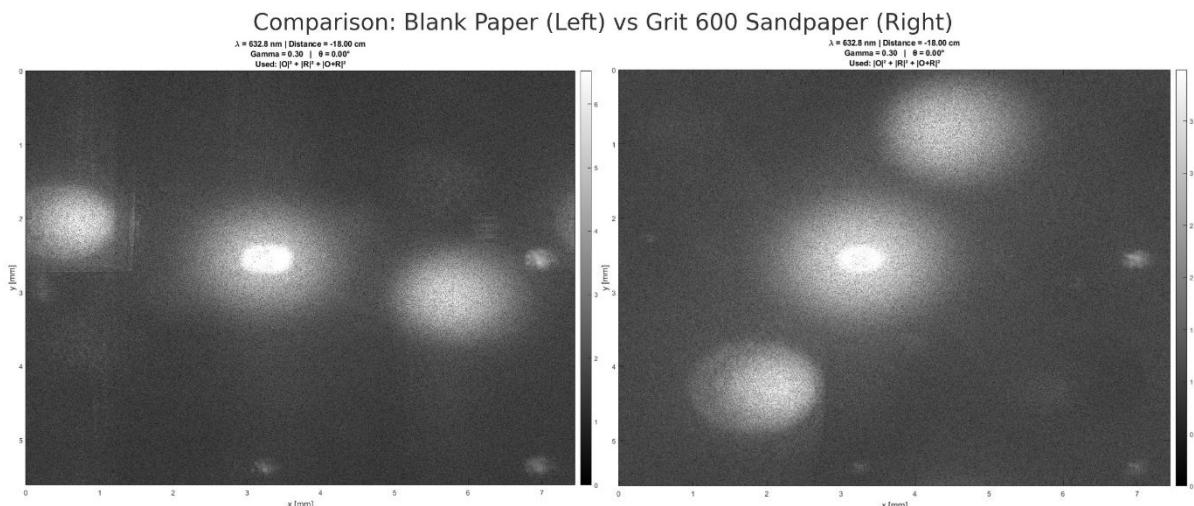
איור 47: המשטחים ממוקמים במערכת הניסוי - מימין: הניר החלק מקובע באמצעות מחזיק השקפים. משמאל: ניר השיפוע הגס ביחס לנקודות לאובייקטיבים עקב צורתו העגולה וה恂ורת שלא מאפשר קיבוע שטוח במחזיק השקפים.

דירוג Grit מתאר את גודלם של גרגרי החומר השווק (abrasive particles) המשובצים בניריות שיוף. גודל זה מראה ממד עקיף לחספוי פני השטח שיתקבל לאחר שיוף באמצעות ניר צהה. ממד ה-Grit נקבע בהתאם למספר הגרגרים שיכולים לעבור דרך מסנן בגודל אין' מרובע, ולפיכך מהוות ממד הפור לגודל הגרגרים: ככל שמספר ה-Grit גבוה יותר, הגרגרים קטנים יותר, והשיוף עדין וחלק יותר [11]. ניתן לחשב את גודל הגרגרים בקירוב לפי נוסחה לוגריתמית (שנהוגה אמפירית לפיה התאמה שנעשהה לטבלאות תקן FEPA):

$$(72) \quad d(\mu m) \approx \frac{30,000 \mu m}{Grit^{1.1}}$$

כך למשל ניר שיוף 100 מורכב מגרגרים בגודל  $\mu m = \frac{30,000 \mu m}{100^{1.1}} \approx 189 \mu m$ , ניר 600 מגרגרים של  $\mu m \sim 27$  ~ ונייר 1000 מגרגרים של  $\mu m \sim 15$ . על פי עיקנון זה, ניתן להניח שה-Grit roughness של פני השטח צפוי לרדת עם עלייה במספר ה-Grit כל עוד המדידה רגישה מספיק לרגולציה גבוהה האופיינית של גרגרי השיפוע.

מצורפות תמונות האמפליטודה שהתקבלו לאחר שחזור ההולוגרפיה עבור נייר שיפ בדרגת 600 ועבור נייר לבן חלק:



איור 48: תמונות האמפליטודה שהתקבלו עבור נייר רגיל וניר שיפ 600.

ניתן לראות כי שתי התמונות אינן מציגות פרטים ברורים וסובלו מERRU גובה וחוסר קונטראסט. אין איזור מובהק שנייתן להגדיר ROI ולכן לא ניתן לבצע מדידה מדוייקת של פروفיל הפאזה, ואך סביר שתמונה הפאזה עצמה אינה תקינה כי תמונה הפאזה שהתקבלו חלקות. לפיכך, לא ניתן היה לבצע את מדידת ה-RMS בפועל. עם זאת, תכנון הניסוי והמתודולוגיה נותרים בתוקף, וכן ניתן לשוב ולבצעו בתנאים משופרים או באמצעות סימולציה.

לו הייתה מתקבלת תמונה פאזה איקוטית עבור כל אחד מסוגי ניירות השיפ – תכנו לחשב את חספוי ה-RMS בכל תמונה באופן שבו חושב ה-RMS עבור הקרטוןagal. המטרה הייתה לבדוק האם קיימת קורלציה בין מאפייני המשטח (כפי שמוגדרים על פי דירוג ה-Grit) לבין פיזור הגובה המתkeletal בשחזור הפאזה עליידי יצירת גרפ חספוי RMS כפונקציה של גודל הגרגרים (שהומר באמצעות הנוסחה האמפירית, 72) לכל Level Grit שנבדק. העקרון הבסיסי הוא שאגררים גדולים יותר מייצרים חספוי גובה יותר ולכן עבור דירוגי Grit נמוכים. ולפיכך צפינו לקבל התאמה מנותנית עולה בין גודל הגרגרים לערך RMS אך אחר וגודל הגרגרים עצמו נגזר לצורך לא לנארית מה-Grit. "תכן שדווקא הצגה של ערך Grit (כיצ'ר א) על סקללה לוגריתמית הייתה מפיקה התאמה לנארית מדיקת יותר מול RMS, אך זאת יש לבחון אמפירית.

## 6.5 דיון ומסקנות:

1. בשל מגבלות זמן במעבדה – לכשಗענו לשלב ניסוי ההרחבה עקב אילוצים שונים, חלק מהמדידות שתכננו לא הושלמו או התבגרו ללא שימוש. יחד עם זאת, פיתוח והטמעה של תהליך עיבוד מלא – החל משחזור הפאזה ועד מדידות עמוקה מדוייקות – התבגרו כתגר משמעותי אליו הופנה עיקר זמני.

2. **aicoot שחזור נמוכה לדמות הצעצוע:** המקירה ממחיש את מגבלות הריגשות של המערכת ומדגיש את הצורך בהתאמת בין תנאי הניסוי לבין האובייקט הנמדד – מבחינות מיקום, חומר, גודל ושدة ראייה. על אף שלא נבחנו ממכים מדדים תמונה נשמרה שימושה אותנו כדי לוודא את תקינות שרשרת השחזור והציג הפאזה. יתכן ואיכות השחזור הנמוכה נובעת מכך שהחומר או הציפוי של הדמות לא

סיפקו החזרים אופטיים מספקים וכן גם קווטר אלומת הליזר לא התאים לגודל וגיאומטרית הדמות כך שהתמונה הטובה ביותר שתהתקבל עברו הדמות כך שכולה תופיע בשחזר התקבלה עבור מצב בו ישנה סטרוציה במרכז הדמות ושאר הדמות מוארת בצורה חלשה - בשילוב עם סוג החומר וההזרים שהוא אפשרי וכך שהפרטים בדמות בעלי עומק רדוד יחסית גרמו לשחזר לא איקוני מספיק לניסוי זה.

- 3. מדידת עומק החריץ בתרמיל:** תוצאה המדידה שהתקבלה נמוכה בכ- 34% מהערך התיאורתי בהתאם לشرط התקני של התרמיל. פער זה מובהק סטטיסטי, ונמצא מחוץ לגבולות אי-יהודאות של הערך הצפוי, אך הוא עשוי להיחשב סביר לאור מאפייני המערכת ושיטת השחזר. מספר גורמים תורמים לכך:
- א. אי-יהודאות בזווית האנכית:** הזווית האנכית בין קרן הייחוס לאובייקט לא נמדדה ולא נכללה במודול החישוב, כל הטיה זוויתית באובייקט תגרום להערכת חסר בחישוב הפרשי הדריכים האופטיות.
  - ב. שונות גיאומטרית בהצורה הדרגתית של קווטר התרמיל:** הקווטר העליון של החריץ משתנה בין 9.65 ל- 9.93 מ"מ לאורך שיפוע חיצוני. לאחר שאין בידינו מידע על מידות הדגימה המדוק לארוך השיפוע, נלקח ערך ממוצע להערכתה. אולם בפועל השונות הגיאומטרית בין תרמילים שונים (עקב טולרנסים בתkan או הבדלים בין יצנים) ייחד עם מגבלת הזווית האנכית שלא נמדדה יוצרים אי-יהודאות מערכתית אמיתית. משום כך, הערך התיאורתי הוצג כתווח ולא כערך חד-משמעות.
  - ג. מגבלות רגולציה ובחירה נקודות המדידה:** מדידת העומק התביצה באמצעות בחירה ידנית של שתי נקודות בתמונה ומחריך והחריך בתחלת התרמיל הוא מבנה ציר יחסית (פחות מ- 1 מ"מ ברוחב), יתכן כי נקודות המדידה נפלת חלקית על שפת החריץ או אף מחוץ לו. בנוסף, רגולציה המצלמה הגבילה את יכולת לזהות את גבולות החריץ בדיק גובה והצרך בממוצע מוקומי לצורך הפקחת רוש פוגע בבדיקה המיקום.
  - ד. כל אלה תורמים לאי-יהודאות נוספת במדידה, אשר לא נכללה במפורש בשגיאת המדידה (בעיקר עקב מגבלות שלנו ברמת היישום בקורס), אך משפיעת בפועל על תוצאה השחזר.**

- 4. שיקולים בבחירה פרמטר השחזר Z והשפעתם על איקות מפת הפaza:** במהלך השחזר זיהינו כי תהליכי השחזר הholoגרפי הגיע לבחירת פרמטר של המרחק Z המיציג את המרחק בין מישור המצלמה לאובייקט. על אף שימוש  $cm = z$  היה המרחק הפיזיקלי שנמדד במעבדה, נמצא כי סטיטה קלה מהערך האמתי (מעל או מתחת, כתלות בצורת האובייקט) למשל ביצוע שחזר כאשר מגדרים  $cm = 12$  או  $z = 18$  הוביל לשחזר פaza חדים יותר ורגשים לפרטים קטנים לאובייקט או במשטה שנמדד על אף שתמונה האמפלייטודה המשוחזרת שהתקבלה הייתה לא ממקדת (out-of-focus).

בקשר זה חשוב להבין כי מוקד האמפלייטודה ומוקד הפaza אינם תמיד חופפים - תמונה המקסמת את הקונטרסט באמפלייטודה (כמו בתמונה חזותית) אינה בהכרח ממקסמת את החדות של הפaza. לכן, יתכן שהבחירה של Z שונה במקצת מהערך הפיזיקלי האמתי הוביל לשחזר פaza מדוקן יותר לצורכי מדידה, גם אם זה בא על

חישוב אינטגרל האמפליטודה. בתחום המבוקשים במקroxופית הולוגרפיה>Digital (DHM) שיטה זו נקראת *tuning focal plane*.

מסקנה זו מעידה כי קיימים צורך בגישת אופטימיזציה מבוססת סימולציה או כיוון מוקדם למציאת ערך Z מיטבי – במיוחד כאשר המטרה היא הפקת מדידות כמותיות מדויקות ממפת הפaza.

**5. מדידת חספօס במשטח קרтон גלי:** במדידה זו בוצעה הערכת חספօס אפקטיבי של משטח קרטון גלי מהסוג המשמש לבידוד חום בשרוולי קפה. אל אף שלצערנו לא ביצענו מדידה פיזית של מידדי הקרטון במעבדה באמצעות קליבר ביצענו השוואת של התוצאה שהתקבלה מהשחזור הologрафי לערכיהם טיפוסיים המפורטים על ידי יצרנים מסחריים. לפי מקורות טכניים [10], גובה הגלים (flute height) עבר קרטונים מסוג זה (כל הנראה micro-flutes) נع לרוב בתחום של 0.3–0.8 מ"מ (300–800 מיקרון). בהנחה שהקרטון הנבדק במעבדה הוא מן הסוג הנ"ל, ניתן להשתמש בטוויה זה כהערה ראשונית לצורכי אינטגרציה תוצאות המדידה.

חשוב להבחין בין שני מושגים פיזיקליים שונים: גובה הגל המיצג את המרחק האנכי המרבי בין שיא לשפל בגל, ואילו RMS roughness (סט"ת תקן של הפaza) מתאר את הפיזור ההסתברותי של הגובה ביחס למוצע – ככלומר, מדד סטטיסטי לרעש גובה מקומי. לפיכך, גם כאשר פni השטח הם מחזוריים וודוריים, ערך RMS צפוי להיות נמוך משמעותית מגובה הגל המלא ע"י הקשר  $\frac{\text{amplitude}}{\sqrt{2}} = \text{RMS}$ . ככלומר, גם אם גובה הגל הוא למשל 600 מיקרון (peak-to-peak) ערך RMS הצפוי הוא רק כ-212 מיקרון. במדידה הologрафית התקבלו ערכי חספօס בטוויה של  $\pm 300 \mu\text{m}$ , הממוקמים בסמוך לחלק התיכון של טווח הגבהים הידוע של קרטון micro-flute. תוצאה זו נחשבת סבירה ואף توامة את הציפיות, במיוחד כאשר לוקחים בחשבון גורמים ניסיוניים שיכולים להשפיע על עיקריות גובה הגבעות בקרטון: לחיצה חלקית של הקרטון באזוריים מסוימים כתוצאה מגע עם הסטנד והאמצעים המקבילים וקיפולים מקומיים של המשטח.

**6. הקשר בין Grit Level לבין RMS:** בחלק זה ניסינו לבדוק את יכולת המערכת הologрафית להבחין בחספօס עדין במיוחד במיוחד על מנת לבצע השוואת כמותיות בין משטחים מחוספסים שאנוחנו יכולים לצפות בהם. בעיבוד ראיון שלא הצלחנו לקבל תמונה אמפליטודה משוחזרת אינטגרלית (התמונה שהתקבלה רועשת וחסורה בפרטים) או תמונה פaza עם מידע מספק. להערכתנו, כשל זה נובע מהמגבילות:

**א. יחס בין אורך הגל לעומק פni השטחהוביקט:** הologרפיה מבוססת על מדידת האור המוחזר מהאובייקט ביחס לקרן הרפוננס. כאשר הפרש הגובה על פni האובייקט מתקרב או חורג מ- $\frac{\lambda}{2}$  (�� 316 במערכת הניסוי) מתרחשת

wrapping והאות מאבד את חד-ערךיותו. על אף שבניסוי יישמו אלגוריתם של wrapping העומקים העדינים במיוחד במשטחים מחוספסים אלו עשויים לחזור מחצי אורך הגל ולגרום לפספוס של המידע כתוצאה מכיסוי של מחזורי הפaza.

**ב. תנאים ניסיוניים ואופטימיזציה אפשרית:** יתכן שהכישלון בשחזר עבר נירחות השיפוף נבע לא רק מגבולות פיזיקליות עיקריות אלא גם מתנאים

ניסוניים לא אופטימליים. ניתן לשפר את איכות התארכות הholוגרפיה (ובפרט את יחס האות-לרעש של מופע הקرن המוחזר מהאובייקט) על ידי מיצוי אופטימי של שלושת הפרמטרים המרכזיים: מרחק האובייקט, עצמת הראה, ואחדות גודל האלומה.

ו. מרחק אובייקט-מצלמה (z): ככל שהאובייקט ממוקם קרוב יותר

לחישון, האור המוחזר מתפזר פחות והמשרעת מגיעה בעצמה  
גבואה יותר למישור ההקלטה. עם זאת, קיים גבול תחתון למרחק  
זה שנקבע על פי קритריון פרנל כפי שציינו ברקע התאורטי.

ii. עוצמת הליזר-זמן החשיפה: נשאף לכawan את עצמת הראה כך  
שתגיע ממש מתחת לסף הרויה ע"י שני זמן החשיפה בהתאם לכל  
מדידה באופן פרטני. הארה חלה מדי תוביל לאיבוד מידע.

iii. הגדלת האלומה: בדומה לנעשה בין ניסוי 2 ל-3, נשאף להרחב את  
קוטר קרן הליזר כך שתאריר את כל האובייקט באופן אחד.

ו. אם תנאים אלה היו מומשים במלואם במעבדה, ניתן היה לצפות  
להחזיר חזק יותר מהaggerים המהויספים של ניר השיווף כך  
שתת�בל תבנית התארכות ברורה יותר ממנה יוכל לחוץ מידע.

ג. מגבלות ברזולוציית המצלמה ביחס למרחק מהמשטח: בשיטות  
מייקרוסקופיה holוגרפיה (DHM) נהוג לשלב עדשה אובייקטיבית שمبرעת  
הגדרה ומאפשרת דגימת פרטיים עדינים יותר על פני החישון ובכך להתגבר  
על מגבלות הרזולוציה של הפיקסל הבודד. אמן שילוב עדשה במערכת  
היאטה מאפשרת שיפור ברזולוציה ובאיכות השחזור במיקוד נקודתי יותר אך  
הדבר כרוך בהקטנת שדה הראייה (Field of view) ודורש כיול אופטי קפדי  
בהרבה לפיו על עיונות שהעדשה מכינה לחזיתagal.

7. למרות שמספר מדידות שביצענו במעבדה לא צלחו עקב העבודה הניסונית שלנו  
במעבדה, תכנון הניסוי הדגים את הפוטנציאלי של holוגרפיה דיגיטלית ככלי מדידה  
תלת-ממדי. בנוסף, חלק ניכר מהמאיץ בניסוי יכול היה פיתוח כל Matlab "יעדי"  
המאפשר שחזור תמונה holographic, מפת הפאזה, פריסת הפאזה וכלי חישובים  
למדידות. על אף שלקח זמן רב לגרום לכל חלק בקורס לעבד כראוי ויתכן כי עדין  
קיימות בו טעויות נגררות - אשמה לשhaft את כל קבצי הקוד בפורמט .m של  
Matlab כך שמי שעשה את המעבדה בהולוגרפיה ורצה למדוד ממנו או לשפר  
ולתקן בו דברים שפספסתי יכול לעשות זאת. וכਮובן להשלים את מדידת החספונים  
שלא הצלחנו להשלים הסמסטר.

## 7. ביבליוגרפיה

- [1] שורטט\אויר\צלם\נערק ע"י עדן בנאים ו\או אריאל שווץ.
- [2] [Wikipedia](#): Dennis Gabor, Holography, Wave interference, EM Waves
- [3] [Yaroslavsky, L. P. \(2004\). Digital Holography and Digital Image Processing: Principles, Methods, Algorithms. Springer Science+Business Media.](#)
- [4] [Kreis, T. \(2005\). Digital Holography: The Reconstruction of Wavefronts. Springer.](#)
- [5] [Thorlabs – HNL Series Red HeNe Laser Guide.](#)
- [6] Introduction to Fourier Optics by Joseph W. Goodman.
- [7] [Phase aberration compensation and parasitic fringes elimination in digital holographic microscopy based on polarization. H Chen.](#)
- [8] [2D Weighted Phase Unwrapping by Firman with Ghiglia and Romero algorithm \(1994\), Matlab File Exchange](#)
- [9] [9x19mm Parabellum, Wikipedia](#)
- [10] [A Review Study on Various Types of Flute Shapes Used in Corrugated Paperboards Used for Packaging.](#)
- [11] [Sandpaper – Grit sizes, Wikipedia](#)