



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

מעבדה באלקטרואופטיקה

**361.1.4383**

**דו"ח מסכם - סימולציית 3D-OptiX**

מגישים: בר הראל 313611113

עדן בלדב 315360479

תאריך הגשה: 8.5.22

## 1. תקציר

לפני מספר שבעות ביצענו את הניסוי באופטיקה גיאומטרית. בניסוי השתמשנו בעדשות, מראות וחומרים שונים אשר ייצרו שבירת קרניים (לוח זכוכית, אקוריום). נרצה ללמוד להשתמש בכלים חישוביים נוחים ויעילים על מנת לבצע סימולציות עבור ניסויים אופטיים, שכן בעתיד הם יוכלו לעזור לנו להגיע מוכנים יותר לבניית מערכים אופטיים מורכבים ולהשוואת תוצאות. נשתמש בסימולצית 3D-OptiX ובקבצים של המערכים שמדרך המעבדה הכין מראש.

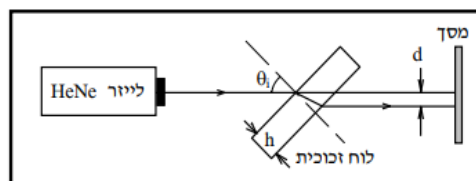
## 2. מטרות הסימולציה

1. להכיר את תוכנת הסימולציה 3D-OptiX.
2. לחזור על הניסויים שביצענו במעבדה אופטיקה גיאומטרית: חוק סנל, זווית קריטית, החזרה פנימית מלאה והדמאה.
3. לבצע השוואה בין תוצאות הסימולציה, התיאוריה ותוצאות הניסוי.

## 3. מהלך הניסוי

### 3.1 חוק סנל

- 3.1.1 בניסוי זה נרצה לחשב מקדם שבירה לא ידוע של לוח 7N-BK ע"י מדידה של זווית הסחה עבור שינוי בזווית ההטייה של הלוח. לשם כך בנינו את המערכת המתוארת באיור 2.6 בסימולציה. נמדוד את הסטייה המקבילית של הקרן, עבור זווית הטייה של הלוח



איור 2.6: מתקן למדידת הסטייה מקבילית של הקרן.

בתחום 0-60 כל 10 מעלות. לאחר מכן, נמצא את מקדם השבירה מתוך משוואה (eq.1).

$$(eq.1) \quad n_2 = \frac{n_1 * \sin(\theta_1)}{\sin(\arctan(\frac{\sin(\theta_1) - d/h}{\cos(\theta_1)}))}$$

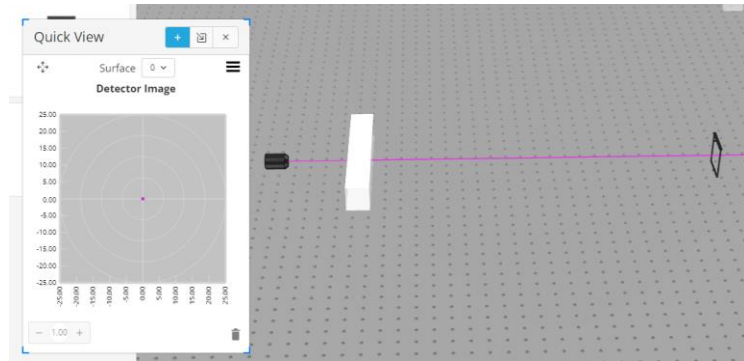
כאשר עובי הלוח הוא  $h = 37mm$ ,  $n2$  זהו מקדם השבירה אותו אנו מחפשים,  $n1$  זהו התווך של האוויר,  $\theta 1$  זוהי זווית הפגיעה ו- $d$  זהו ההיסט האנכי הנמדד של הקרן. עבור על זווית הטייה נחשב את מקדם השבירה המתקבל, התוצאות נתונות להלן:

מקדם השבירה של הלוח $n2$	הסטייה של הקרן $d [mm]$	זווית הטייה של הלוח $\theta [^\circ \text{Degrees}]$
1.189	1.046	10
1.194	2.266	20
1.196	3.763	30
1.197	5.754	40
1.198	8.569	50
1.2	12.755	60

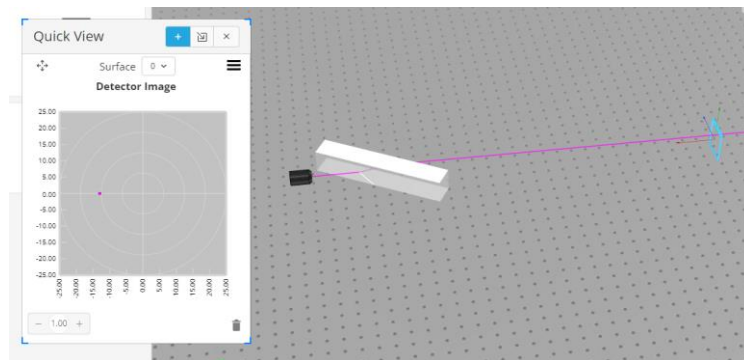
ממצע מקדם השבירה שנמדד הוא 1.196, כאשר ידוע כי מקדם השבירה של 77N-BK הוא 1.2. קיבלנו שגיאה יחסית של 0.3% שנובעת משגיאת העיגול של הערכים המחושבים בסימולציה עד הספרה ה-3 אחרי הנקודה. התוצאה שהתקבלה מאוד מדויקת בכל אחת מהמדידות ולכן לא נצטרך להיעזר בגרף התאמה שמייצר cftool.

התוצאות שונות מאלו שקיבלנו במעבדה, שכן הניסוי במעבדה בצע על לוח זכוכית לו מקדם שבירה של 1.5, והתוצאות שקיבלנו הניבו ערך ממצע של 1.37 כלומר שגיאה יחסית של 8.6% שהיא גדולה משמעותית מזו של הסימולציה (למרות שבעזרת כלי ה-cftool הגענו לדיוק גבוה יותר בסדר גודל).

להלן תמונות מהסימולציה:



תמונה 1- מדידת סטיית הקרן בסימולציה עם זווית הסטה  $0^{\circ}\text{C}$



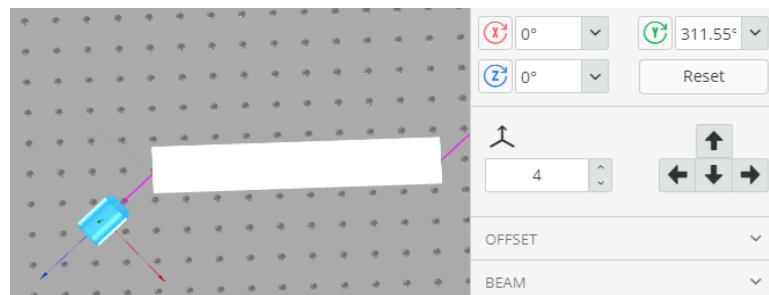
תמונה 2- מדידת סטיית הקרן בסימולציה עם זווית הסטה  $60^{\circ}\text{C}$

### 3.2. החזרה פנימית מלאה

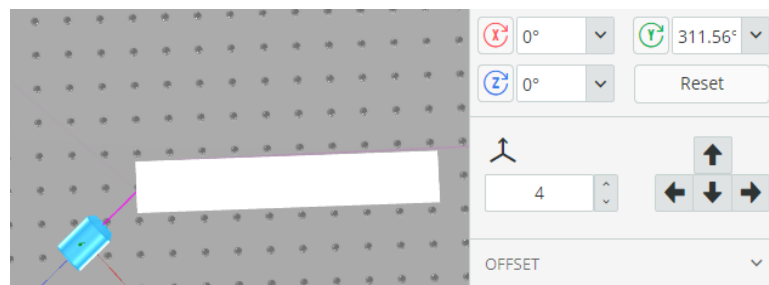
כעת נרצה למצוא את המפתח הנומרי, כלומר את סינוס זווית הפגיעה המקסימלית,  $\theta_i$ , עבורה

מתקיימת החזרה מלאה בתוך 7N-BK-אוויר.

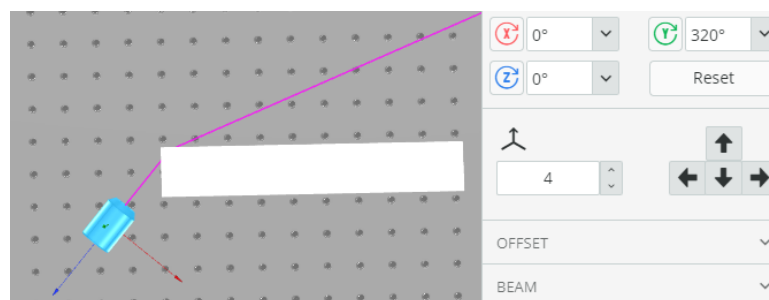
**הערות עם [EB1]**  
צריך להוסיף הסבר על התמונות: הערות עם [EB1]  
ולקשר לפסקה שיש למטה



תמונה 3 – החזרה פנימית מלאה



תמונה 4 -המצב הגבולי לפני החזרה מלאה



תמונה 5 – שבירה דרך הלוח בזווית שרירותית

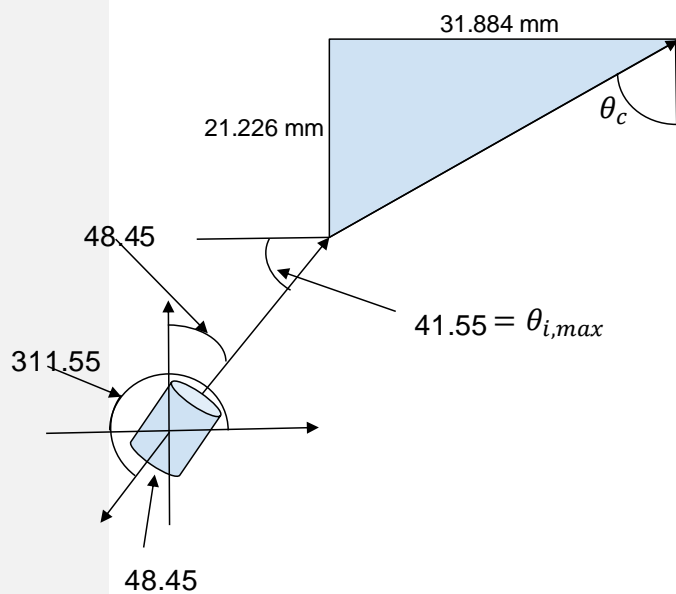
מהדוד המכין נקבל את משוואה (eq. 2), נמצא את זווית הפגיעה המקסימלית

$\theta_{i,max}$  עבורה נקבל החזרה מלאה, ואת הזווית הקריטית  $\theta_c$ , עבור  $n = 1.2$ :

$$(eq. 2) \quad \theta_{i,max} = \arcsin(n * \cos(\arcsin(\frac{1}{n}))) = 41.55^\circ$$

$$\theta_c = \arcsin(\frac{1}{n}) = 56.44^\circ$$

כעת נמצא זאת בעזרת הסימולציה. הדיוק של הסימולציה בזווית ההטיה הוא בספרה השנייה אחרי הנקודה. שינינו את הזווית של הלוח עד שהגענו לדיוק המקסימלי האפשרי בזווית  $311.56^\circ$  הייתה שבירה של הקרן (תמונה 4) ועבור זווית סיבוב  $311.55^\circ$  (תמונה 3) קיבלנו החזרה מלאה, או בהתאם זווית פגיעה של  $\theta_{i,max} = 41.55^\circ$ , כמו שקיבלנו בפיתוח האנליטי. מציאת הזווית נעשתה משיקולים גיאומטרים באמצעות שרטוט 1 המופיע למטה:



שרטוט 1 – מציאת  $\theta_{i,max}$  ו-  $\theta_c$

מדדנו מרחקים אלה באמצעות הפונקציה של מדידת מרחק בין 2 נקודות בסימולציה, ועבורם קיבלנו שהזווית הקריטית הינה:  $\theta_c = 56.34^\circ\text{C}$ , כלומר שגיאה יחסית של 0.17% שנבעה מחוסר דיוק בהשמת העכבר על הנקודות הדרושות (בצורה מדויקת) על הלוח ושגיאת עיגול של הערכים בסימולציה.

כעת נעשה חישוב הפוך, נשתמש בזווית הקריטית שמדדנו למציאת מקדם השבירה של הלוח לפי חוק סנל (eq. 3):

$$(eq. 3) \quad n_1 \cdot \sin(\theta_c) = n_2 \cdot \sin(90^\circ)$$

$$n \cdot \sin(\theta_c) = 1 \Rightarrow n = \frac{1}{\sin(\theta_c)} = \frac{1}{\sin(56.34)} = 1.2014$$

נשים לב כי  $n_2 = 1$  כיון שזהו תווך אוויר. קיבלנו שגיאה יחסית של 0.11% מהערך האמיתי 1.2, והיא נובעת משגיאת המדידה של ניצבי המשולש כמו שהסברנו קודם.

בחישוב המקביל בניסוי המעבדה מדדנו:  $\theta_c = 40.45^\circ$ ,  $\theta_{i,max} = 61.01^\circ$ ,

עבור ערכים אנליטיים:  $\theta_c = 48.75^\circ$ ,  $\theta_{i,max} = 61.267^\circ$ , כלומר שגיאה יחסית של 17% בגודל הזווית הקריטית ו-0.4% בגודל (זווית הפגיעה).

בחישוב של מקדם השבירה בניסוי המעבדה קיבלנו את התוצאה  $n_{water} = 1.348$ , שהיא בעלת שגיאה יחסית של 1.1%, כלומר שגיאה קטנה אך עדיין גדולה מזו שקיבלנו בסימולציה עבור ערכים שונים של  $n$ .

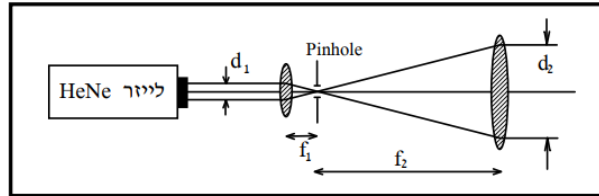
איפה החישוב של זווית הפגיעה? הערות עם [EB2]

ומה לגבי מקדם שבירה (ובלי קשר) הערות עם [EB3] לציין שזה היה מקדם שבירה אחר)

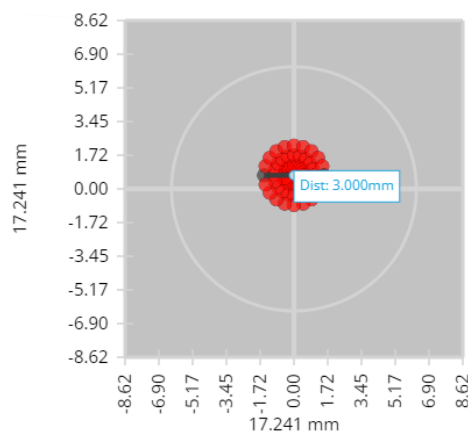
3.3.1. נרצה לבנות מרחיב קרן. לשם כך נשתמש בעדשות עם מרחק מוקד  $f_1 = 50mm$  ו-

$f_2 = 500mm$ . משיקולי אופטיקה גיאומטרית, נצפה להגדלה:  $M = \frac{f_2}{f_1} = 10$  הצבנו

את העדשות לפי איור 2.4.

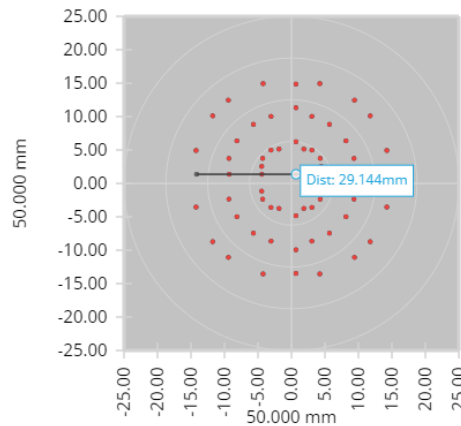


איור 2.4: מבנה מרחיב קרן.



תמונה 6 - לפני העדשה הראשונה (לפני הגדלה)





תמונה 7 – אחרי העדשה השנייה (לאחר הגדלה)

מהמידות נקבל כי רוחב הקרן השתנה מ  $3mm$  ל-  $29.144mm$ , כלומר הגדלה של  $9.715$ . המרחק האופטימלי בין העדשות שהביא לאפקט ההרחבה הקבועה של הקרן (כלומר, האלומה לא מתבדרת לאחר העדשה השנייה) הוא  $533.94mm$ . נחשב מה המרחק בין שני מרכזי העדשות ונתחשב בעובי שלהם:

$$width\ of\ lenses = \frac{2.07mm}{2} + \frac{3.79mm}{2} = 2.93mm$$

$$total\ distance = 533.94mm + 2.93mm = 536.87mm$$

משיקולים של אופטיקה גיאומטרית היינו מצפים לראות כי המרחק הוא  $f_1 + f_2 = 550mm$ . הפיתוחים של האופטיקה הגיאומטרית מניחים כי העדשות בעלות רוחב קטן מאוד, אולם בסימולציה (וגם במעבדה) העדשות הן בעלות אורך סופי ולכן הערך הצפוי שונה מזה הנמדד בסימולציה.

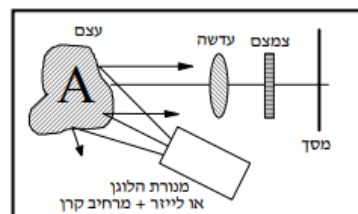
בניסוי המעבדה בנינו את המערך כמו באיור 2.4 והצבנו את העדשות במרחקים התיאורטיים שחישבנו. קיבלנו הגדלה פי 10, אך זהו לא מספר מדויק שכן התמונה שהתקבלה על גבי הדף הייתה מטושטשת בקצוותיה, לכן השוואה מדויקת של השגיאות בין הניסוי לסימולציה לא אפשרית פה.

לא ברור מה אתה מחשב במשוואה: הערות עם [EB4]  
הראשונה ומזה זר הערכים האלו ולמה חלקי 2

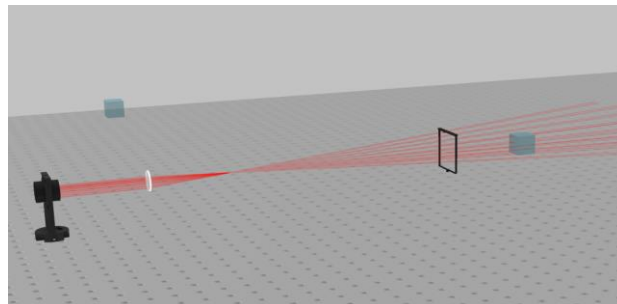
לא הזכרת מה היה בניסוי: הערות עם [EB5]

### 3.4 הדמאה בעזרת עדשה

3.4.1. נרצה לבצע הדמיה באמצעות עדשה בודדת, לשם כך נבנה את המערך המופיע באיור 2.3. המערך בסימולציה הוא לפי תמונה 8.



איור 2.3: מערך לביצוע הדמיה.



תמונה 8

את ההדמאה ביצענו באמצעות עדשה עם  $f = 100\text{mm}$  ובעדשה נוספת עם  $f = 200\text{mm}$ . נריץ את הסימולציה כאשר המרחקים בין הרכיבים מקיימים את משוואת הדימות (eq.4) עבור המקרים הבאים (כאשר  $S$  זהו המרחק בין העצם לעדשה):

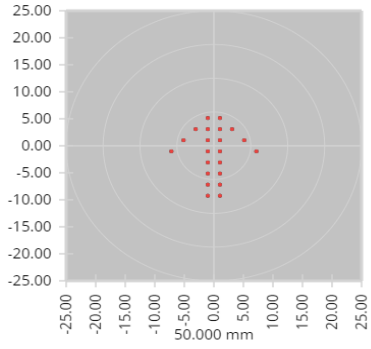
$$1. \quad f < S < 2f$$

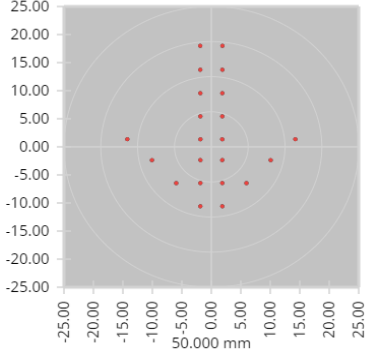
$$2. \quad S = 2f$$

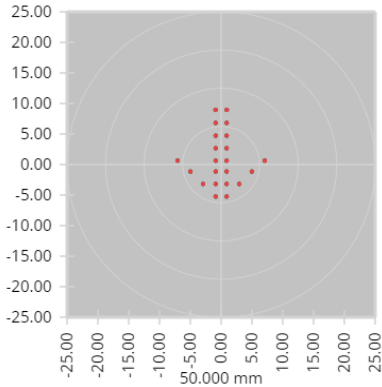
$$3. \quad S > 2f$$

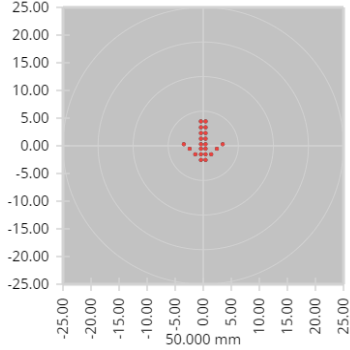
$$(eq.4) \quad \frac{l}{s} + \frac{l}{v} = \frac{l}{f}$$

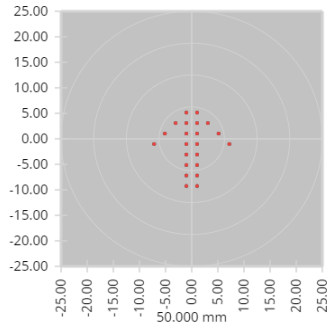
התוצאות מתוארות בטבלה הבאה:

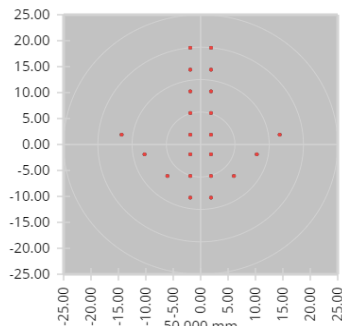
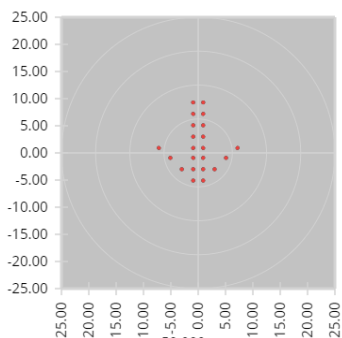
f = 100 mm		
העצם (לפני העדשה)	תמונה	
	גודל העצם [mm]	14.14

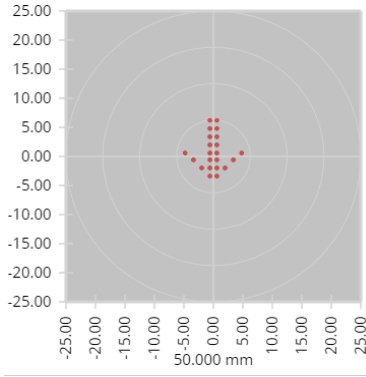
ערך	פרמטר	מיקום העצם, S [mm]
	תמונה	150 $(f < S < 2f)$

	מיקום הדמות, $v$ [mm]	300
	תיאור הדמות	הפוכה ומוגדלת
	גודל הדמות [mm]	28
	הגדלה	1.98
	הגדלה - חישוב אנליטי	2
200 ( $s = 2f$ )	תמונה	
	מיקום הדמות, $v$ [mm]	200
	תיאור הדמות	הפוכה וללא הגדלה כלל
	גודל הדמות [mm]	13.93
	הגדלה	0.985
	הגדלה - חישוב אנליטי	1

300 ( $s > 2f$ )	תמונה	
	מיקום הדמות, $v$ [mm]	150
	תיאור הדמות	הפוכה ומוקטנת
	גודל הדמות [mm]	6.83
	הגדלה	0.48
	הגדלה - חישוב אנליטי	0.5

$f = 200 \text{ mm}$		
העצם (לפני העדשה)	תמונה	
	גודל העצם [mm]	14.14

מיקום העצם, $S$ [mm]	פרמטר	ערך
300 $(f < S < 2f)$	תמונה	
	מיקום הדמות, $v$ [mm]	600
	תיאור הדמות	הפוכה ומוגדלת
	גודל הדמות [mm]	28.35
	הגדלה	2.004
	הגדלה - חישוב אנליטי	2
400 $(S = 2f)$	תמונה	
	מיקום הדמות, $v$ [mm]	400
	תיאור הדמות	הפוכה וללא הגדלה כלל
	גודל הדמות [mm]	14.136

	הגדלה	0.999
	הגדלה - חישוב אנליטי	1
500 ( $S > 2f$ )	תמונה	
	מיקום הדמות, $v$ [mm]	333.33
	תיאור הדמות	הפוכה ומוקטנת
	גודל הדמות [mm]	9.405
	הגדלה	0.665
	הגדלה - חישוב אנליטי	0.666

נציין שבכל המדידות התקיים  $S > f$  ולכן תמיד קיבלנו דמות ממשית והפוכה. את המסך מיקמנו בנקודה  $V$  המקיימת את משוואת הדימות (eq. 4). חישוב ההגדלה האנליטי הוא לפי הנוסחה (eq. 5):

$$(eq. 5) \quad M = -\frac{v}{s}$$

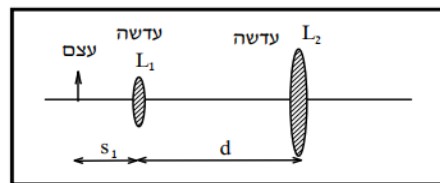
ככל שהגדלנו את מרחק העצם  $S$ , כך הדמות התקבלה במרחק קרוב יותר לעדשה,  $V$ , ומידת ההגדלה הלכה וקטנה בהתאם.

התוצאות שקיבלנו קרובות מאוד (סטייה במאות-אלפיות ה-mm) לתוצאות האנליטיות עבור שתי העדשות. השגיאה הקטנה נובעת מכך שהמרחקים  $S$  ו- $V$  כללו גם כן שגיאה ברמת המאות-אלפיות ה-mm בסימולציה עצמה (מגבלות הסימולציה). למרות זאת, תוצאות אלו מדויקות יותר

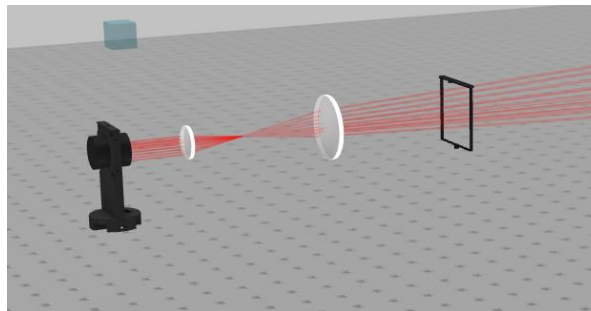
מהתוצאות שקיבלנו בניסוי המעשי שם החוסר דיוק נבע ממגבלת רזולוציה במכשיר המדידה עצמו, במדידת המרחקים ובמדידת ההגדלה עצמה.

### 3.5 הדמיה בעזרת מערכת עדשות

3.5.1. כעת נרצה לבצע הדמיה בעזרת שתי עדשות לפי הפרמטרים בשאלת הכנה 4.7 ולבצע השוואה. העדשות בעלות מרחק מוקד  $f_1 = 50\text{mm}$ ,  $f_2 = 100\text{mm}$  ומרחק העצם מהעדשה הראשונה הינו-  $S_1 = 100\text{mm}$ .



איור 2.5 : מערכת של שתי עדשות.



תמונה 9

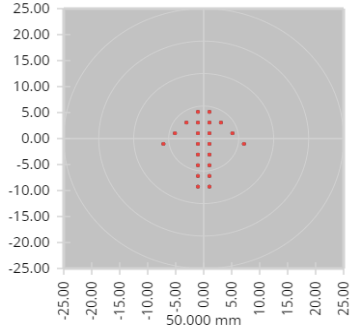
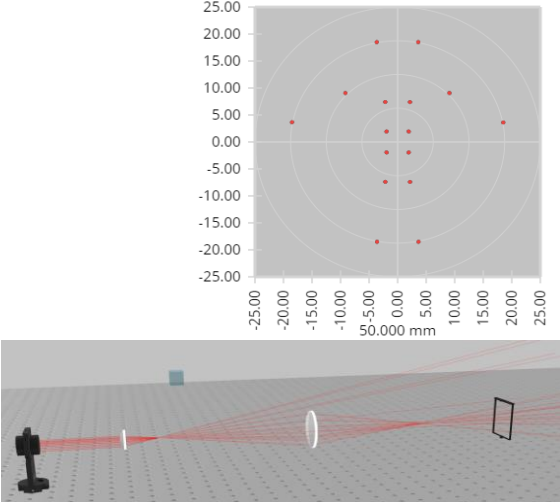
נרצה להשוות בין מידת ההגדלה האנליטית של הדמות לבין הגדלה שמתקבלת בסימולציה. מידת ההגדלה נתונה ע"י המשוואה (eq. 6):

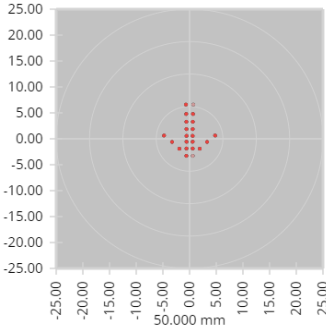
$$(eq. 6) \quad M_{total} = M1 \cdot M2 = -\frac{v1}{u1} \cdot -\frac{v2}{u2}$$

כאשר  $u1, u2$  הם מיקומי העצם, ו-  $v1, v2$  הם מיקומי הדמות של עדשות 1 ו-2 בהתאמה. מהדוח מכין נמצא את מיקום הדמות לאחר מעבר בעדשה השנייה בו נמקם את המסך בסימולציה.



פרמטר d, כפי שמוצג באיור 2.5, משתנה ונתון בטבלה מטה:

מציאת גודל ייחוס		
העצם לפני העדשה הראשונה	תמונה	
	גודל העצם [mm]	14.14
d [mm]	פרמטר	ערך
250	תמונה	
	מיקום הדמות (מימין לעדשה האחרונה) [mm]	300

	סוג הדמות	ממשית ישרה מוגדלת
	גודל הדמות [mm]	36.289
	הגדלה	2.566
	מידת הגדלה אנליטית	2
150	תמונה	אין אפשרות לקבל תמונה
	מיקום הדמות (מימין לעדשה האחרונה) [mm]	-100
	סוג הדמות	אנליטית הדמות שאמורה להתקבל הינה דמות מדומה הפוכה ומוגדלת
	גודל הדמות [mm]	אין אפשרות למדוד
	הגדלה	אין אפשרות למדוד
	מידת הגדלה אנליטית	2
50	תמונה	
	מיקום הדמות (מימין לעדשה האחרונה) [mm]	33.33
	סוג הדמות	ממשית הפוכה
	גודל הדמות [mm]	9.701
	הגדלה	0.686
	מידת הגדלה אנליטית	0.666

נציין שהתצאות האנליטיות לקוחות מתוך הדוח מכין. עבור מרחק  $d = 150 \text{ mm}$  לא היה ניתן לקבל את הדמות על המסך כיוון שזוהי דמות מדומה (המתקבלת  $100 \text{ mm}$  משמאל לעדשה השנייה). עבור המדידה במרחק  $d = 250 \text{ mm}$  קיבלנו שגיאה גדולה, קיבלנו שהדמות מוגדלת פי 2.5 בקירוב לעומת הגדלה פי 2 לפי החישוב האנליטי. הסיבה לכך היא שהמיקומים בסימולציה מדויקים ברמת עשירות המילימטר בלבד וכל תזוזה קטנה של העדשה/המסך משפיעה רבות על ההגדלה. בנוסף כפי שניתן לראות בתמונה המצורפת באותה עמודה – חלק מהקרניים שעברו דרך העדשה הראשונה לא עוברים דרך העדשה השנייה. זה יכול לגרום לעיוותים ולקבלת מידע חסר על הדמות. בניגוד למדידה זו, במדידה עם  $d = 50 \text{ mm}$  קיבלנו תצאה קרובה מאוד לתצאה האנליטית

התצאות תואמות לתצאות שהתקבלו בניסוי בפתל שכן גם שם מקור השגיאה נבע ממדידת המרחקים באמצעות מכשיר מדידה עם מגבלת דיוק.

#### 4. סיכום

ראינו כי הסימולציה היא כלי טוב להערכת טיב ונכונות תוצאות הניסוי בפתל. התצאות שהתקבלו כן היו שונות במקצת עבור ניסויים מעשיים עקב שגיאות מדידה שקיימות במעבדה ולא בסימולציה. קיבלנו באופן גורף כי התצאות של הסימולציה קרובות יותר לתצאות האנליטיות מאשר אלו שקיבלנו במעבדה, שכן השגיאות בניסויים במעבדה נובעות עקב מכשירי מדידה עם מגבלת דיוק גדולה יותר מזו שקיימת בסימולציה העקב שגיאה של גורם אנוש (למשל זיהוי המעבר בין קבלת שבירה מלאה לבין שבירה חלקית) שכמעט ולא באה לידי ביטוי בסימולציה.

