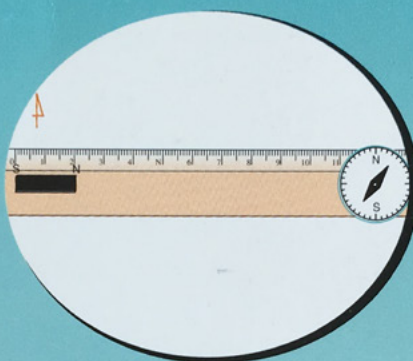


חקר מודרך בפיזיקה

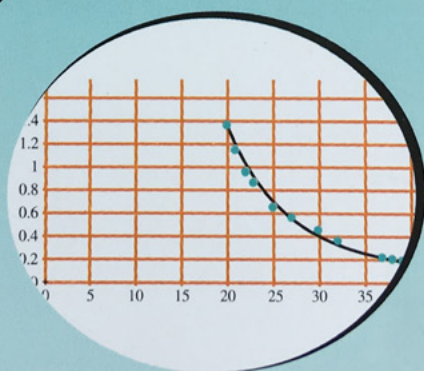
(בניסויים ובגיליון אלקטרוני)

דוד סלע

עדי רוזן



$\tan \theta$	θ ($^{\circ}$)	r (cm)
1.376	54	20
1.150	49	21
0.966	44	22
0.869	41	23



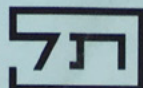
$$B \propto \frac{1}{r^{2.96}}$$

מהדורה ניסויית



המחלקה להוראת המדעים
מכון ויצמן למדע, רחובות

הפיקוח על הוראת הפיזיקה
האגף לתכניות לימודים
משרד החינוך התרבות והספורט



חקר מודרך בפיזיקה (בניסויים ובגיליון אלקטרוני)

כתיבה: עדי רוזן, דוד סלע

מהדורה ניסויית

המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
הפיקוח על הוראת הפיזיקה האגף לתוכניות לימודים משרד החינוך התרבות
והספורט

יוצא לאור ביוזמתו ופיקוחו של המרכז הישראלי להוראת המדעים ע"ש
עמוס דה-שליס:

משרד החינוך, התרבות והספורט, האוניברסיטה העברית בירושלים מכון
ויצמן למדע ברחובות
ואוניברסיטת תל-אביב

הדפסה ועריכה במחשב:

יעל עמנואל-אדרי

גרפיקה ממוחשבת:

שלומית זהרוני

עיצוב והפקה:

שלומית זהרוני, אגי (רחל) בוקשפן

הרצות ולוחות:

גרפאור בע"מ

דפוס:

ניידט בע"מ

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאכסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני או אחר כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה. שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה אסור בהחלט אלא ברשות מפורשת בכתב מהמו"ל.

כל הזכויות שמורות
מכון ויצמן למדע
ומשרד החינוך התרבות והספורט
נדפס בישראל תשנ"ט – 1998

פתח דבר

הספר כולל 25 פעילויות חקר בפיזיקה. פעילויות אלה מיועדות לתלמידים הלומדים פיזיקה בחטיבה העליונה. רוב הניסויים המופיעים בספר מתאימים לבחינת הבגרות במעבדה גם ב"מתכונת הרגילה".

פעילויות 1 ו-2 מיועדות לשמש רקע בסיסי לפעילויות האחרות. פעילות 1 נועדה להכרת פונקציית החזקה, ופעילות 2 עוסקת בהרחבה בניתוח ממצאי ניסוי (ללא ביצוע). פעילויות 3-23 הן ניסויים מתחום המכניקה, החשמל והמגנטיות, והאופטיקה הגאומטרית. פעילויות 24 ו-25 נועדות לבניית מודל וניתוחו באמצעות גיליון אלקטרוני.

בספרי הלימוד השונים מופיעות דוגמאות רבות של תרגילים פתורים. מאידך גיסא, אין ספרי מעבדה הכוללים "דוגמאות פתורות". לכן, החלטנו ללוות את כל פעילויות החקר המופיעות בספר בממצאים של ניסויים שערכנו, בניתוחם ובתשובות לשאלות.

התחבטנו בין שתי גישות לגבי התפקיד שממלאים ניסויים: גישה א: ממצאי ניסויים נבחנו לאור תיאוריה קיימת. לדוגמה, נניח שתיאוריה קובעת קשר ריבועי בין שני משתנים; על-פי גישה זו מסרטטים את הפרבולה המתאימה ביותר לממצאי הניסוי, ובוחנים באיזו מידה הקשר בין ממצאי הניסוי הוא ריבועי.

גישה ב: מחפשים פונקציה שתתאר את הקשר בין ממצאי הניסוי, ללא הסתמכות על תיאוריה. גישה ב מעוררת קושי מסוים, משום שלרוב ניתן למצוא פונקציות רבות שמתארות קשר בין ממצאי ניסוי, למרות זאת אנו נקטנו בספר זה בגישה ב.

כל הקשרים המתקבלים בניסויים שבספר הם קשרים פשוטים: פונקציה לינארית, פונקציית חזקה או פונקציה מעריכית. מטרת חלק מן הפעילויות היא לתאר את הקשר בין ממצאי הניסוי בעזרת אחת מפונקציות פשוטות אלה.

חלק מן הפעילויות המופיעות בספר שימשו כבחינות בגרות במעבדה ב"מתכונת החקר". פעילויות אלה עברו שינויים מהותיים, מהסיבות הבאות:

- השאלונים המקוריים נוסחו לצורך בחינה, שמתבצעת בזמן קצוב. לעומת זאת הפעילויות בספר נועדו לצורך לימוד, במסגרת גמישה יותר של זמן. לכן הרחבנו את היריעה.

- הנחיות לניתוח ממצאי הניסויים בשאלוני הבחינה, נוסחו בדרך-כלל עבור ניתוח בעזרת נייר מילימטרי. בספר זה ניתנות הנחיות לניתוח ממצאי ניסויים בעזרת גיליון אלקטרוני, תוך ניצול עוצמתו של הגיליון האלקטרוני בהתאמת פונקציה לדיאגרמת פיזור נתונה.
- בספר ניתן דגש על מבנה אחיד ושיטתי של הפעילויות, הכולל הצגת שאלת חקר, העלאת השערות, זיהוי משתנה תלוי ומשתנים בלתי תלויים, קביעת מערך מחקר, והנחיות לביצוע ניסויים וניתוחם.
- ניתן להשתמש בפעילויות המופיעות בספר בדרכים שונות:
- ללומד מוצגת רק שאלת החקר, ועליו לקבוע את מערך מחקר, לבצע ניסוי ולנתח את ממצאיו, וזאת ללא הנחייה.
- ללומד מוצגים דפי הפעילות במלואם. הוא מבצע את הניסוי, מנתח את הממצאים על-פי ההנחיות המופיעות בדפים אלה.
- ללומד מוצגים דפי הפעילות וגם ממצאים ניסויים (אך ללא ניתוח הממצאים וללא התשובות לשאלות), ועליו לנתח את ממצאי הניסוי, ולענות על השאלות שבדף הפעילות, ללא צורך בביצוע הניסוי.
- הלומד מקבל את דפי הפעילות עם הפתרון המלא, לצורך לימוד עצמי.

תודות

- ★ ליעקב גוטליב, צבי גלר, פנחס ורדין, ד"ר דוד זינגר ואשר כץ, שהיו שותפים למחברי הספר בפיתוח ניסויי חקר, כפי שנוסחו בשאלוני הבחינות.
- ★ לקורינה פולינגר, אתי מודריק וקלריסה ברקוביץ שקראו פעילויות, והעירו הערות מועילות.
- ★ ליעל עמנואל-אדרי, שלומית זהרונאי ואיריס מור-מזרחי, מצוותי הכתבנות הגרפיקה והייצור במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע, אשר מלאכתן המסורה תרמה רבות לגיבוש החומר בצורתו הנוכחית.

דוד סלע	עדי רוזן
מפמ"ר פיזיקה	המחלקה להוראת המדעים
משרד החינוך התרבות והספורט	מכון ויצמן למדע

תשרי תשנ"ט – ספטמבר 1998

תוכן העניינים

מבוא לפעילות החקר

- חקר 1: הייצוג הגרפי של פונקציית החזקה 7
חקר 2: דליפת מים ממכל גלילי – ניתוח ממצאי ניסוי 21

ניסויים במכניקה

- חקר 3: תנועת כדור בנוזל צמיג 33
חקר 4: גרירת גוף על – ידי קפיץ 41
חקר 5: תלות הקבוע של קפיץ באורכו 51
חקר 6: תלות הקבוע של קפיץ בעוביו 65
חקר 7: תנודות אופקיות של גוף המחובר לקצה פס פלדה 75

ניסויים בחשמל ומגנטיות

- חקר 8: מציאת התנגדות בעזרת תיל אחיד שהתנגדותו ידועה 83
חקר 9: מתח הדקים ומתח על נגד טורי 89
חקר 10: תכונות מעגל חשמלי הכולל נגד משתנה סיבובי 95
חקר 11: מעגל חשמלי הכולל שני מקורות מתח 105
חקר 12: אופיין של נורת להט 111
חקר 13: אופיינים של רכיבים חשמליים מוסתרים 115
חקר 14: פריקה של קבל טעון 123
חקר 15: השדה המגנטי של מגנט מוט 129
חקר 16: השדה המגנטי של תיל ישר וארוך 139
חקר 17: השדה המגנטי של סילונית 149

ניסויים באופטיקה גאומטרית

- חקר 18: מערכת של עדשה ומראה מישורית 157
חקר 19: מקור אור נקודתי בקרקעית כלי המכיל מים 165
חקר 20: דמויות ממשיות הנוצרות על – ידי עדשה קמורה 175
חקר 21: שבירת אור בתיבה שקופה 184

ניסויים במכניקה של גוף קשיח

- 193 חקר 22: תנודות פס מתכת סביב ציר
205 חקר 23: מטוטלת פיתול

בניית מודל, וחקירתו באמצעות גיליון אלקטרוני

- 213 חקר 24: וילהלם - טל, בנו והתפוח
221 חקר 25: הספק מרבי במעגל חשמלי

חקר 1 הייצוג הגרפי של פונקציה החזקה

שאלת חקר

הייצוג האלגברי של פונקציית חזקה הוא
איך נראה הגרף שלפונקציית חזקה, וכציד משפיעים מעריך החזקה והמקדם
על צורת הגרף?

העלאת השערה

מהן השערותייך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך

תכנון

1. תכנן פעילות בעזרת גיליון אלקטרוני, שבאמצעותה ניתן יהיה לענות על
שאלת החקר.

כלי המחקר

גיליון אלקטרוני

עיצוב ראשוני של הגליון האלקטרוני

2. פתח גיליון אלקטרוני, ובנה בו, לפי סעיפים א'-ה' שלהנן, טבלה בת
שתי עמודות X ו Y (ראה טבלה 1) לשם בניית הגרף $Y=2X^3$ עבור $X>0$

	C	B	A	
1		y	X	
2				
3				
4				
5				

טבלה 1: תיאור העיצוב הראשוני של הגיליון האלקטרוני

- א. הקלד בתא A1 את הכותרת x, ובתא B1 את הכותרת y.
- ב. הקלד לתא A2 ערך התחלתי של x השווה ל-0, ולתא B2 הקלד נוסחה לחישוב הערך המתאים של y, כלומר, $A2^3 = 2 \cdot y$.
- ג. לתא A3 הקלד ערך x הגדול מהערך הקודם (בתא A2) בשיעור 0.2, כלומר הקלד את הנוסחה $A2 + 0.2$. לתא B3 שכפל את הנוסחה מתא B2.
- ד. סמן את תאים A3 ו-B3 ושכפל אותם עד לשורה שבה $x = 5$.
- ה. סרטט גרף של y כפונקציה של X.

כדי לחקור את תלות צורת העקומה במעריך החזקה b יש לשנות את b מ-3 לערך אחר. הדבר מחייב בנייה מחודשת של הגיליון. בהמשך נרצה לשנות שוב את b, ואולי גם פרמטרים נוספים, כגון את מקדם החזקה a, את השיעור שבו x גדל בכל פעם שיסומן ב-dx ואת הערך הראשון של x שיסומן x0. כל שינוי כזה מחייב בניית הגיליון מההתחלה. נבנה, את הגיליון בצורה מתאימה יותר. לצד הטבלה של x ו y נבנה רשימה של כל הפרמטרים הרלוונטים. נתכנן את העיצוב כך, שאם נשנה את ערכו של פרמטר ברשימת הפרמטרים, טבלת ערכי x ו y תעודכן בהתאם, ולא נצטרך לשנות ישירות ערכים בטבלת ערכי x ו y; גם הגרף יעודכן בכל פעם באופן אוטומטי. עיצוב כזה נוח לפעילויות חקר.

עיצוב גיליון האלקטרוני המתאים לפעילות חקר

3. פתח גיליון אלקטרוני חדש, ועצב אותו בצורה המתוארת בטבלה 2, על-פי שלבים א - ט שלהלן:

א. הפרמטרים הרלוונטים בבעיה הם: מקדם החזקה, a ; מעריך החזקה, b ; הערך ההתחלתי של x , x_0 ; והשיעור שבו x גדל בכל פעם, dx . בתאים A6 ו A7 הקלד את הכותרת: רשימת פרמטרים (ראה טבלה 2). תחת הכותרת, בעמודה A, הקלד את הפרמטרים:

2	הקלד בתא A7:	מקדם החזקה, a -
3	הקלד בתא A8:	מעריך החזקה, b -
0	הקלד בתא A9:	ערך ההתחלתי של x , x_0 -
0.2	הקלד בתא A10:	השיעור שבו x גדל בכל פעם, dx -

ב. יתכן כי כרגע אתה זוכר שהמספר המופיע בתא A7 הוא מקדם החזקה a . אך אם תקרא את הגיליון בעוד חודש למשל, קרוב לודאי שלא תזכור מה מציין כל פרמטר. לכך כדאי להוסיף בתא שמשמאל לכל פרמטר אות המציינת אותו.

חשוב להבין כי סימון זה, מיועד לאדם שקורא את הגיליון; בשלב זה אם תקליד נוסחה הכוללת את האות b , המחשב "לא ידע" שהערך של b נמצא בתא A8.

הקלד לתאים B7 - B10 את האותיות המתאימות (ראה טבלה 2).
ג. בעיצוב הראשוני של הגיליון האלקטרוני, הנוסחאות שהקלדתה היו מורכבות מכתובות של תאים. יש לכך חיסרון: לא נוח לקרוא נוסחאות הבנויות מכתובות של תאים, בעיקר כאשר הן ארוכות, וכאשר קוראים זמן רב אחרי ההקלדה. לכן, לשם נוחיות, מוצע לכנות בשמות את ארבעת הפרמטרים הרשומים בתאים A10 - A7. נוח להתאים לכל פרמטר את הסימון שכבר מוצג בתא שמשמאלו. כך תוכל לבנות נוסחאות מאותיות, שיש להן משמעות.

אחת הדרכים למתן שמות לפרמטרים בגיליון האלקטרוני Excel 97 נסמן (נשחיר) את שמונת התאים הנמצאים במלבן ששתיים מפינותיו הן B10 - A7; לאחר מכן נבחר בתפריט "הוספה" באפשרות "שם", ובה נבחר ב"יצירה". במצב זה נפתחת תיבת דו-שיח. בתיבת הדו-שיח נסמן את האפשרות "בעמודה השמאלית". לאחר שנקיש על "אישור", המחשב יתן לכל פרמטר שם, שהוא האות (או צרוף האותיות) הנמצאת בתא שמשמאל לפרמטר. (שים לב, לא ניתן לכנות בשם המהווה כתובת של אחד מתאי הגיליון. למשל, לא ניתן לכנות בשם R1).

כדי לוודא שהפעולה הצליחה, נסמן תא שבו מאוחסן פרמטר, למשל את תא A7. אם הפעולה הצליחה - בתיבת השם (הנמצאת משמאל לשורת הנוסחאות) צריכה להופיע האות a, במקום הכתובת A7. מעתה, כאשר נקליד נוסחאות, נוכל להשתמש בשמות הפרמטרים, ולא נצטרך להשתמש בכתובות של התאים שבהם הפרמטרים מאוחסנים.

ד. תיעוד: מוצע לרשום, במשטח מלל, כותרת לנושא שבו עוסק הגיליון (ראה בטבלה 2 משטח מלל המשתרע על מלבן שפינותיו הן A1 - B4).
ה. כותרות לטבלה בשורה 1: בתא C1 הקלד x (המשתנה הבלתי תלוי), ובתא D1 הקלד y (המשתנה התלוי) (ראה טבלה 2).

E	D	C	B	A	
	y	x	חקר 1: פונקציית חזקה חקר צורת הגרף המתאים לפונקציית חזקה (תבנית מתמטית $y = ax^b$).		1
					2
					3
					4
					5
			פרמטרים	רשימת	6
			a	2	7
			b	3	8
			x0	0	9
			dx	0.2	10

ו. כנה את כל הערכים שיהיו בתאים של עמודה C בשם של כותרת הטבלה (x).

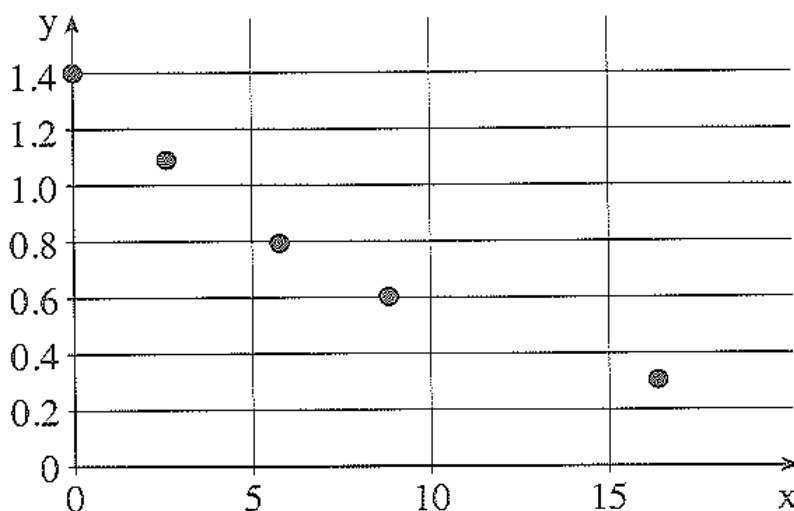
כינוי בשם של כל הערכים המופיעים בעמודה ב - Excel 97

סמן עם העכבר את האות C שבראש העמודה השלישית (כתוצאה מכך העמודה מושחרת). חזור על ההליך המתואר לעיל לגבי מתן שמות לפרמטרים (תפריט "הוספה"), אלא שבתיבת הדו-שיח בחר באפשרות "בשורה העליונה".

- ז. נוסחאות בשורה 2: לתא C2 הקלד נוסחה שתעתיק לתא זה את התוכן של תא A9 ($=x0$). לתא D2 הקלד נוסחה לחישוב הביטוי ax^b .
- ח. נוסחאות בשורה 3: לתא C3 הקלד נוסחה שתגדיל את הערך הקודם של x ב- dx. שכפל את תוכן תא D2 לתא D3.
- ט. סמן את שני התאים C3 ו-D3, ושכפל אותם עד לשורה שבה $x = 5$. בסעיפים 4-8 שלהלן נחקור את צורת עקומת החזקה עבור **a חיובי**.
4. א. סרטט גרף של y כפונקציה של x. התבונן בצורת העקומה.
- ב. שנה את הערך של b (תא A8) ל-2 ואחר-כך ל-1.5. התבונן בכל פעם בצורת העקומה.
- ג. ציין תכונות משותפות לשלוש העקומות.
- ד. כיצד משתנה העקומה כאשר מעריך החזקה b קטן מ-2 ואחר-כך ל-1.5?
5. א. שער (בשלב זה אל תשתמש בגיליון לשם בדיקה), כיצד תשתנה צורת העקומה אם מעריך החזקה b ילך ויקטן, ולבסוף יהיה שווה ל-1?
- ב. שנה את הערך של b ל-1. כיצד נראית העקומה המתאימה לפונקציית חזקה זו? האם היא תואמת את תשובתך לסעיף 5א?
6. א. שער, כיצד תשתנה צורת העקומה אם מעריך החזקה b יהיה שבר אמיתי וחיובי?
- ב. שנה את הערך של b ל-0.5. כיצד נראית העקומה המתאימה לפונקציית חזקה זו? האם היא תואמת את תשובתך לסעיף 6א?
7. א. שער, כיצד תשתנה צורת העקומה אם מעריך החזקה b יהיה שלילי?
- ב. שנה את הערך של b ל-1. כיצד נראית העקומה המתאימה לפונקציית חזקה זו? האם היא תואמת את תשובתך לסעיף 7א?
- ג. התבונן בתוכן של תא D2. מה הסיבה להודעה שמופיעה בתא זה? כדי למנוע זאת, שנה בתא A9 את ערכו של xO מ-0 ל-0.5 עבור פונקציות חזקה שבהן מעריך החזקה הוא שלילי.
- ד. שנה את הערך של b ל-2, והתבונן בעקומה. במה היא שונה מהעקומה שבה $b = -1$?
8. תאר כיצד נראות הטקומות המחאימות לפיוהטיוה החזקה $y = ax^b$ (שבה $a > 0$) כאשר: א. $b > 1$. ב. $b = 1$. ג. $0 < b < 1$. ד. $b < 0$. (שבה $y = ax^b$)
9. כיצד ישתנו עקומות החזקה אם ערכו של a יהיה שלילי (למשל -2 במקום 2)?

שאלות

10. בתרשים 1 מתוארת דיאגרמת פיזור (נקודות במערכת צירים) של תוצאות מדידות.



האם לדיאגרמת פיזור זו יכולה להתאים עקומת חזקה? נמק.

11. בטבלה 3 רשומים ערכים x ו- y שהתקבלו בניסוי (נתעלם מהיחידות של הערכים שנמדדו).

3	2.5	2	1.5	1	X
0.48	0.68	1.11	1.87	4.30	Y

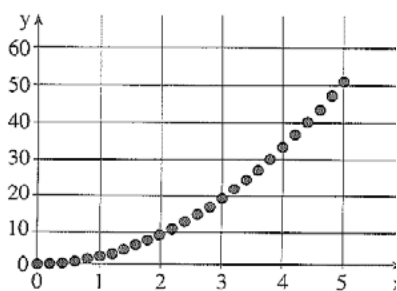
- א. סרטט דיאגרמת פיזור (נקודות במערכת צירים) של y כפונקציה של X .
 ב. בעזרת גיליון אלקטרונק סרטט את עקומת חזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור. מצא את משוואת העקומה ואת ריבוע מקדם המיתאם.

תשובות לשאלות

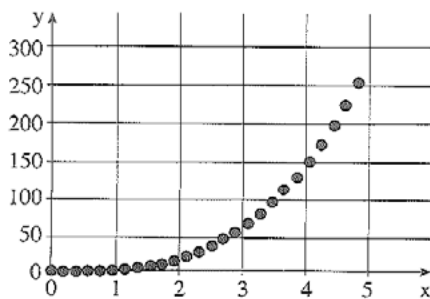
1. נסרטט באמצעות הגיליון האלקטרוני גרף חזקה עבור ערכים מסוימים של a ושל b . לאחר מכן נשנה מספר פעמים את הערך של b , ונשאיר את הערך של a קבוע. בכל פעם נבחן את צורת העקומה. מכך נוכל ללמוד על השפעת הפרמטר b על צורת העקומה.
לאחר מכן נסרטט סדרת עקומות חזקה שבהן b קבוע, ונשנה את הערך של a . מכך נלמד על השפעת הפרמטר a על צורת העקומה.
3. ג. את הערכים שבתאים A_7, A_8, A_9 ו- $10A$ כינינו בשמות a, b, x_0 ו dx בהתאמה.
ז. הנוסחה שהקלדנו לתא $C_2 = x_0$ (אם לא מכנים את המשתנים בשמות, יש להקליד לתא זה את הנוסחה: $= \$A\9).
לתא D_2 הקלדנו את הנוסחה: $= a * x^b$. (אם לא מכנים את המשתנים בשמות, יש להקליד לתא זה את הנוסחה: $= \$A\$7 * C_2^{\$A\$8}$).
ח. לתא C_3 הקלדנו את הנוסחה $= C_2 + dx$ (ללא שימוש בשמות משתנים, מקלידים $= C_2 + \$A\10).
4. א. הגרף שהתקבל בגיליון האלקטרוני מוצג בתרשים 2
ב. הגרף המתאים לפונקציית חזקה עם $b = 2$ מוצג בתרשים 3, והגרף המתאים לפונקציית חזקה עם $b = 1.5$ מוצג בתרשים 4.
ג. שלוש העקומות הן קעורות ועולות.

הגדרת עקומה קעורה

קטע של עקומה מכונה קעור אם המיתר המחבר שתי נקודות כלשהן הנמצאות על קטע העקומה, נמצא מעל לעקומה.

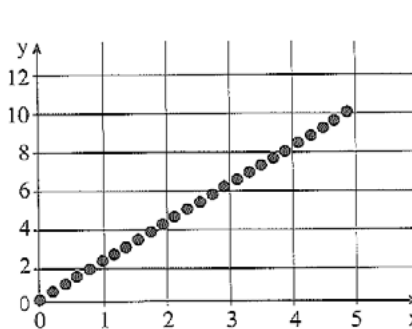


תרשים 3: $y = 2x^2$

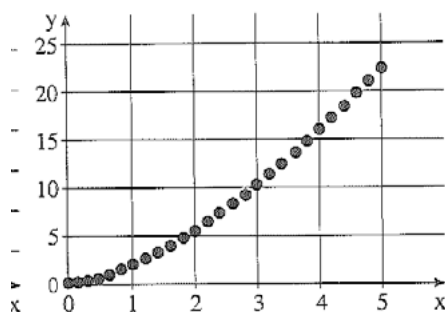


תרשים 2: $y = 2x^3$

ד. כאשר מעריך החוקה b הולך וקטן, העקומה עולה בקצב איטי יותר (כלומר מתקרבת יותר ויותר לצורה של קו ישר).



תרשים 5: $y = 2x^1$



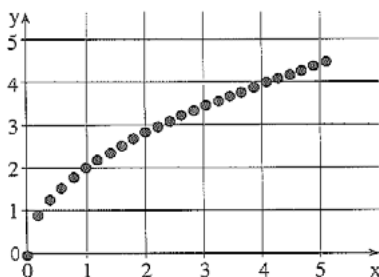
תרשים 4: $y = 2x^{1.5}$

5. ב. העקומה המתאימה לפונקציית חזקה שבה $b = 1$ היא קו ישר העובר בראשית הצירים (ראה תרשים 5). הייצוג האלגברי הוא $y = ax$. קשר זה מכונה יחס ישר בין x לבין y ; כאשר x גדל פי מספר מסוים – y גדל פי אותו מספר. (שים לב, ישר שאינו עובר בראשית הצירים הוא גרף לינארי, והוא אינו מבטא יחס ישר).

6. ב. הגרף המתאים לפונקציית חזקה שבה $b = 0.5$ מוצג בתרשים 6. זו עקומה קמורה ועולה.

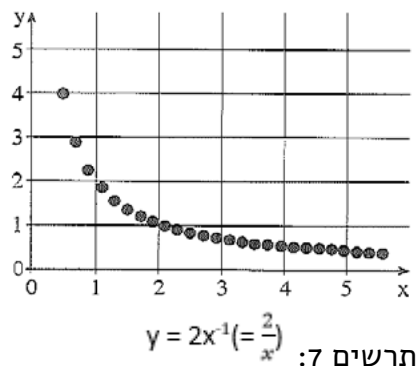
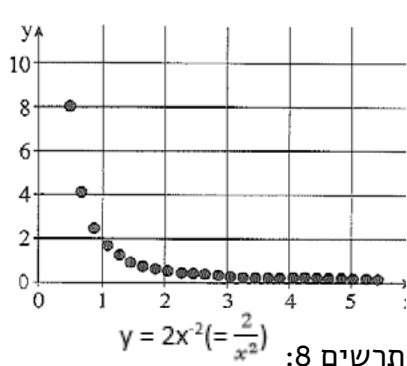
הגדרת עקומה קמורה

קטע של עקומה מכונה קמור אם המיתר המחבר שתי נקודות כלשהן הנמצאות על קטע העקומה, נמצא מתחת לעקומה.



תרשים 6: $y = 2x^{0.5} (=2\sqrt{x})$

7. ב. הגרף המתאים ו' $y = \frac{a}{x}$: ציית חזקה שבה $b = -1$ מוצג בתרשים 7. קשר זה מיוצג על-ידי $y = \frac{a}{x}$. והוא מכונה יחס הפוך: כאשר x גדל פי מספר מסוים – y קטן פי אותו מספר. במילים אחרות, המכפלה של y ב- x היא קבועה.



ג. בתא D2 מופיעה ההודעה #DIV/O!. משמעותה שבתא זה ניתנה למחשב הוראה לבצע פעולת חילוק ב-0. פעולת חילוק ב-0 אינה מוגדרת. פונקציית חזקה שבה מעריך החזקה הוא שלילי מוגדרת רק עבור ערכים חיוביים של x . לכן, שינינו בתא A9 את הערך של x מ-0 ל-0.5.

ד. הגרף המתאים לפונקציית חזקה עם $b = -2$ מופיע בתרשים 8. עקומה זו יורדת בקצב מהיר יותר מאשר העקומה שבה $b = -1$.

8. א. כאשר $b > 1$ עקומת החזקה עולה, ובתחום שבו $x > 0$ היא קעורה. (הפונקציה מוגדרת לכל x).

ב. כאשר $b = 1$ עקומת החזקה היא ישר העובר בראשית הצירים (הפונקציה מוגדרת לכל x).

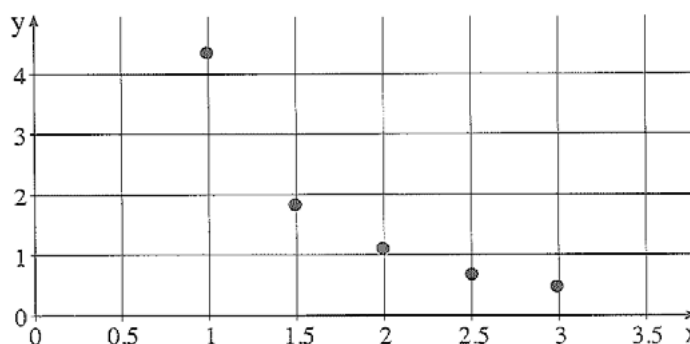
ג. כאשר $0 < b < 1$ עקומת החזקה עולה, והיא קמורה (הפונקציה מוגדרת עבור $x > 0$).

ד. כאשר $b < 0$ עקומת החזקה יורדת, והיא קעורה (הפונקציה מוגדרת עבור $x > 0$).

9. העקומות תהיינה דומות לאלו שהתקבלו עבור a חיובי, אלא שהן תהיינה ברביע הרביעי, כך שאם נשנה את a מ-2 ל-2-, העקומה השנייה תהיה סימטרית לראשונה ביחס לציר ה- x .

10. לא. עקומת חזקה יורדת ($b < 0$) אינה יכולה לחתוך את הציר האנכי, כי היא אינה מוגדרת ב $x = 0$.

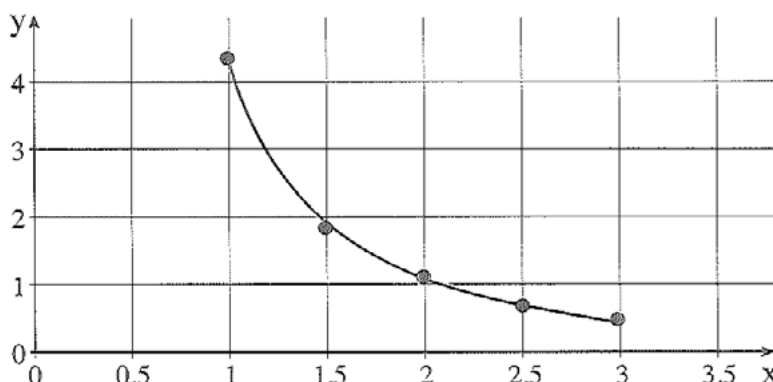
11. א. הקלדנו את ערכי x ו- y לגיליון אלקטרוני (ראה טבלה 4), וסרטנו בעזרת הגיליון דיאגרמת פיזור של y כפונקציה של x - ראה תרשים 9.



תרשים 9: דיאגרמת פיזור של y כפונקציה של x
 ב. נעלה השערה שהעקומה המתאימה לדיאגרמת הפיזור היא עקומת חזקה (שתבניתה המתמטית $y = ax^b$, כאשר $b < 0$). נציע שלוש דרכים לבדיקת הטענה, ולחישוב b .

דרך א: התאמת עקומת חזקה לדיאגרמת הפיזור

נוסיף, בעזרת הגיליון האלקטרוני, את עקומת החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור. העקומה מתוארת בתרשים 10.



תרשים 10: עקומת החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור שבתרשים 9

משוואת העקומה, כפי שהתקבלה בגיליון האלקטרוני:

$$y = \frac{4.29}{x^{1.99}} \quad (1)$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9995$.

מעט על ריבוע מקדם המיתאם

ריבוע מקדם המיתאם, R^2 , הוא מדד להתאמה של העקומה לדיאגרמת הפיזור. הערכים של R^2 מקיימים: $0 \leq R^2 \leq 1$. ככל ש- R^2 קרוב יותר ל-1 - ההתאמה של העקומה לדיאגרמת הפיזור טובה יותר. בדוגמה שלנו $R^2 = 0.9995$; ערך זה קרוב מאוד ל-1, ומשמעות הדבר היא שהנקודות אמנם אינן ממוקמות בדיוק על העקומה, אך המרחקים מהן לעקומת הם קטנים מאוד.

הוספת עקומת חזקה לדיאגרמת פיזור, ב-Excel 97

הצב את הסמן של העכבר על אחת הנקודות של דיאגרמת הפיזור, ולחץ על המקש הימני של העכבר. כתוצאה, מכך, הנקודות מסומנות, ונפתחת תיבת דו-שיח. בתיבת הדו-שיח בחר באופציה "הוספת קו מגמה". עתה נפתחת תיבת דו-שיח נוספת, שבה מספר סוגי מגמה/רגרסיה. בחר ב"חזקה". לחץ על הלשונית "אפשרויות" (בחלק העליון של תיבת הדו-שיח), וסמן בה את האפשרויות: "הצג משוואה בתרשים" ו-"הצג ערך R בריבוע בתרשים". לאחר מכן הקש על "אישור". בדיאגרמת הפיזור התווספה עקומת החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור, ומופיעים בה משוואת העקומה, וערך של ריבוע מקדם המיתאם.

דרך ב: חקירת $\ln y$ כפונקציה של $\ln x$

אנו בודקים את ההשערה ש- $y = ax^b$. אם השערה זו נכונה אזי. מחוקי הלוגריתם נובע כי:

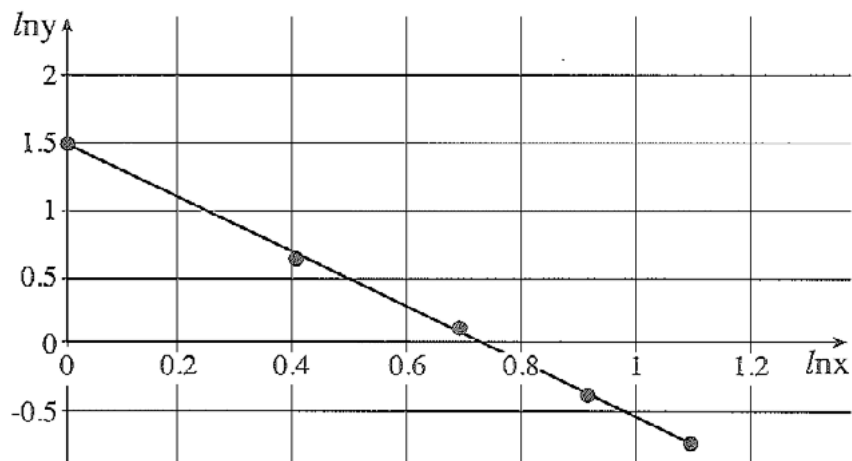
$$\ln y = b \ln x + \ln a \quad (2)$$

לכן, אם אכן מדובר בפונקציית חזקה, אזי הגרף של $\ln y$ כפונקציה של $\ln x$ צריך להיות קו ישר. בגיליון האלקטרוני (ראה טבלה 4) בנינו בעמודות E ו-F את ערכי $\ln x$ ו- $\ln y$.

H	G	F	E	D	C	B	A	
y	$x^2/1$	$\ln y$	$\ln x$	y	X	חקר 1: הייצוג הגרפי של		1
4.30	1	1.459	0	4.30	1	2		
1.87	0.444	0.626	0.405	1.87	1.5	פונקציית		3
1.11	0.250	0.104	0.693	1.11	2	החזקה		4
0.68	0.160	-0.386	0.916	0.68	2.5			5
0.48	0.111	-0.734	1.099	0.48	3			6
								7
								8
								9

טבלה 4: תיאור העיצוב של הגיליון האלקטרוני

באמצעות הגיליון האלקטרוני סרטטנו דיאגרמת פיזור של ערכי $\ln y$ כפונקציה של ערכי $\ln x$. כיוון שהנקודות נראו מפוזרות לאורך קו ישר, הוספנו לדיאגרמת הפיזור, בעזרת הגיליון האלקטרוני, את הקו הישר המתאים ביותר לדיאגרמת הפיזור – ראה תרשים 11.



תרשים 11: ערכי $\ln y$ כפונקציה של ערכי $\ln x$

משוואת הקו הישר (כפי שהתקבל רגסטרוס הוליוו).

$$\ln y = -1.99 \cdot \ln x + 1.456$$

(2) $\ln y = -1.99 \cdot \ln x + 1.456$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9995$.

מקשר (2) נובל להגיע לקשר (1):

נבטא את המספר 1.456 המופיע בקשר (2) כ- $\ln$ של מספר שנשמנו ב- z :
 $\ln z = 1.456 \Rightarrow z = e^{1.456} = 4.29$

לכן את קשר (2) נרשום כך: לכן:

$$\ln y = -1.99 \cdot \ln x + \ln 4.29$$

לכן

$$\ln y = \ln x^{-1.99} + \ln 4.29$$

או

$$\ln y = \ln \frac{4.29}{x^{1.99}}$$

לכן

$$y = \frac{4.29}{x^{1.99}}$$

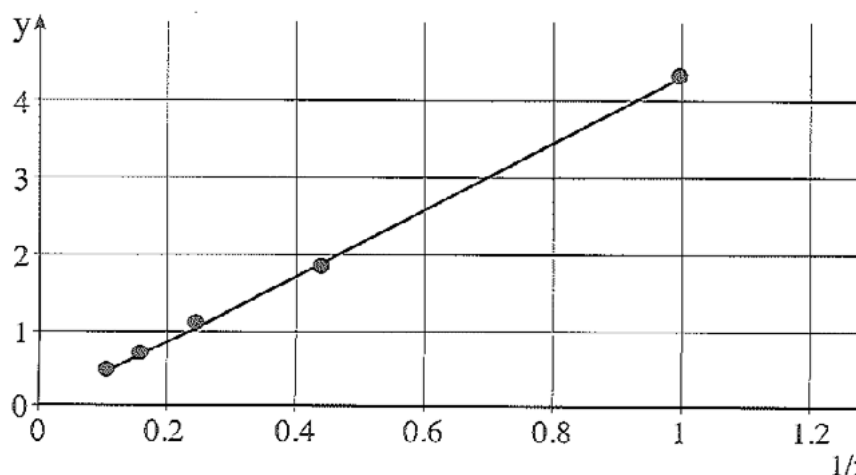
וזה קשר (1) שמצאנו לעיל.

דרך ג: "ניחוש" הקשר בין x ובחינתו

מהתבוננות בערכי x ו y ניתן לראות כי כאשר x גדל מ-1 ל-2, כלומר פי שניים, אזי y קטן מ-4.3 ל-1.11, כלומר בערך פי ארבעה. קשרים דומים ניתן למצוא לגבי הזוגות האחרים של x ו y . לכן יש מקום להשערה שהתבנית המתמטית של y כפונקציה של x היא:

$$y \propto \frac{1}{x^2}$$

כדי לבחון זאת, חישבנו בעמודה G של הגיליון האלקטרוני את הערכים של $1/x^2$, ולעמודה H העתקנו את ערכי y (ראה טבלה 4). סרטטנו גרף של y כפונקציה של $1/x^2$. הגרף מתואר בתרשים 12.



תרשים 12: ערכי y כפונקציה של $1/x^2$

משוואת הישר:

$$(3) \quad y = \frac{4.29}{x^2} + 0.002$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9997$.

נתבונן בקשר (3): המספר 0.002 מבטא את נקודת החיתוך של הגרף עם הציר y . האם "באמת" הישר חותך את הציר מעל נקודת ה-0, או שהוא עובר בדיוק בראשית, והמספר 0.002 התקבל בגלל שגיאות מדידה? לא נעסוק בעניין זה במסגרת הספר, נסתפק באמירה שערך זה קטן מאוד ביחס לתחום שבו משתנה ערכו של y , לכן נוכל לרשום, לפחות בקירוב,

$$\text{כי } y = \frac{4.29}{x^2}$$

וגם כך הגענו לקשר (1)

חקר 2

דליפת מים ממיכל גלילי – ניתוח ממצאי ניסוי



שאלת חקר

מים דולפים מנקב עגול המצר במרכז הקרקעית של מיכל גלילי.



- א. באילו גורמים תלוי משך הדליפה הדרוש כדי שבמיכל יתרוקן מן המים?
- ב. כיצד תלוי משך הדליפה בכל אחד מן הגורמים שציינת?
- ג. איזה ביטוי מתמטי מתאר את משך הדליפה בכל הגורמים?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

1. תכנן מערך ניסוי שבעזרת ממצאיו ניתן לענות על שאלות החקר.

ממצאי ניסוי

בטבלה 1 מוצגים ממצאי ניסוי. השתמשנו בסימונים הבאים -
 t - משך דליפת המים מן המיכל, עד שהמיכל מתרוקן (הערכים על רקע אפור).
 h - גובה המים במיכל (לפני הדליפה) (הערכים בשורה העליונה).
 d - קוטר הנקב (הערכים בעמודה הימנית).

כדי למצוא את תלות **משך הדליפה t בגובה המים h** רוקנו את מיכל המים פעמים אחדות דרך אותו נקב - בכל פעם גובה המים היה שונה.
 כדי למצוא את תלות **משך הדליפה t בקוטר הנקב d** רוקנו את מיכל המים פעמים אחדות החל מאותו גובה, דרך נקבים עגולים - בכל פעם קוטר הנקב היה שונה.
 את t מדדו באמצעות שעון עצר, ואת h ו- d מדדו באמצעות סרגל.

1	4	10	30	h (cm (d (cm
13.5	26.7	43.5	73.0	1.5
7.2	15.0	23.7	41.2	2
3.7	6.8	10.5	18.4	3
1.5	2.2	3.9	6.8	5

טבלה 1: ערכי זמן שבהם מים שגובהם h דלפו מנקב עגול שקוטרו d

ניתוח ממצאי הניסוי

- איזו תוצאה של מדידת זמן מדויקת יותר - זו של 73.0 שניות או זו של 1.5 שניות (ראה טבלה 1)? הסבר.
- מה ניתן היה לעשות בעת ביצוע הניסוי על מנת להגדיל את דיוק מדידת הזמן (עבור אותם ערכים של h ו- d , ותוך שימוש באותם מכשירי מדידה)?
- אילו מבין המשתנים הם בלתי תלויים, ואיזה משתנה הוא תלוי?

5. מצא, על פי הממצאים הרשומים בטבלה 1, קשר מתמטי של t כפונקציה של d . נסח את הקשר גם באופן מילולי.
6. א. קבע את הזמן הדרוש כדי לרוקן את המיכל כאשר קוטר הנקב הוא 4 ס"מ (בחר באחד הערכים של גובה מים: 30 ס"מ, או 10 ס"מ, או 4 ס"מ, או 1 ס"מ).
- ב. השב על השאלה שבסעיף 6 לעיל לגבי נקב שקוטרו 10 ס"מ.
- ג. האם החישוב בסעיף 6 מבוסס על אינטרפולציה או על אקסטרפולציה?
- ד. האם החישוב בסעיף 6 מבוסס על אינטרפולציה או על אקסטרפולציה?
7. מצא, על פי הממצאים בטבלה 1, קשר מתמטי המתאר את t כפונקציה של h . נסח את הקשר גם באופן מילולי.
8. בטא את t כפונקציה של d ו- h באמצעות קשר מתמטי אחד של פרופורציה.
9. א. מצא את ערכו המספרי ואת יחידותיו של קבוע הפרופורציה אשר יהפוך את הפרופורציה המבוקשת בסעיף (8) לשוויון.
- ב. האם קבוע הפרופורציה שחישבת הוא גודל אוניברסלי, או שהוא תלוי בפרמטרים שלא נדונו במפורש בהצגת הבעיה? אם הוא תלוי בפרמטרים - ציין פרמטרים אשר עשויים להשפיע על ערכו.

שאלה

10. א. אדם מדד 25 שניות עד שהמים באמבטיה שגובהם היה 20 ס"מ נוקזו. כעבור כמה זמן ינוקזו מים שגובהם 40 ס"מ מאמבטיה זו?
- ב. אילו הנחות הנחת לשם החישוב שבסעיף 10א שעיל?

תשובות לשאלות

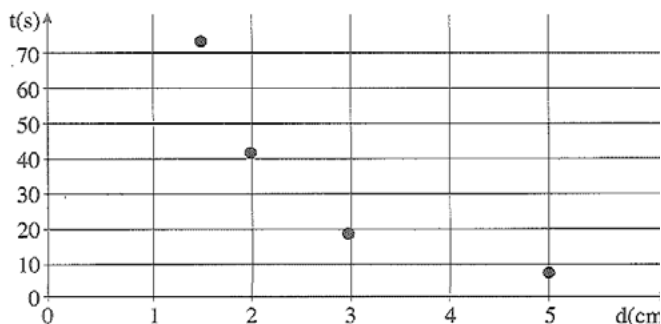
1. א. קובעים משתנים בלתי תלויים שבהם משך הדליפה (המשתנה התלוי) עשוי להיות תלוי.
 ב. לגבי כל אחד מן המשתנים הבלתי תלויים: דוגמים באמצעות ניסוי את משכי הדליפה עבור ערכים שונים של המשתנה הבלתי תלוי, כאשר שאר המשתנים הבלתי תלויים נשארים קבועים.
 ג. לגבי כל אחד מהמשתנים הבלתי תלויים: קובעים פונקציה שתתאר את תלות תוצאות המדידה של משך הדליפה בתוצאות המדידה של המשתנה הבלתי תלוי.
 ד. מבטאים את משך הדליפה כפרופורציונית למכפלת כל הביטויים שנמצאו בסעיף ג.
2. בכל מדידה יש אי-ודאות (שגיאה) אקראית, הנובעת מכך שלא ניתן לקרוא במדויק ערכים שביו שתי שנות סמוכות של מכשיר מדידה.
 נסמן את אי-הוודאות המוחלטת במדידת הזמן ב Δt אי-הוודאות היחסית במדידת הזמן היא: $\Delta t / t = \text{אי-ודאות יחסית}$.
 בשתי המדידות אי-הוודאות המוחלטת Δt היא שווה. אולם אי-הוודאות היחסית במדידת פרק בזמן של 73 שניות היא קטנה יותר. לשם המחשה, נניח כי אי-הוודאות המוחלטת במדידת הזמן שווה ל-0.5 שנייה. אי-הוודאות היחסית במדידה של 73 שניות שווה ל: $0.5 / 73 \approx 0.7\%$.
 לעומת זאת במדידת פרק הזמן של 1.5 שניות אי-הוודאות היחסית שווה ל- $0.5 / 1.5 = 33\%$. מכאן שהמדידה של 73 שניות מדויקת מזו של 1.5 שניות.
3. ניתן לחזור על כל מדידה מספר פעמים, ולחשב את הממוצע של הזמנים שהתקבלו במדידות.
4. המשתנים הבלתי תלויים הם גובה המים במיכל, h , וקוטר הנקב, d . המשתנה התלוי הוא משך הדליפה, t .
5. כדי לחקור את הקשר בין משך הדליפה לבין קוטר הנקב, נבחר ערכים המתאימים **לגובה קבוע של המים**. יש לנו ארבע סדרות של ערכים כאלה - העמודות שבטבלה 1.
 בטבלה 2 רשמנו את ערכי t ו d עבור מים שגובהם ההתחלתי $h = 30 \text{ cm}$.

(t(s	(d/(cm
73.0	1.5
41.2	2
18.4	3
6.8	5

טבלה 2: טבלת זמן - קוטר כאשר גובה מים התחלתי קבוע (30 ס"מ)
מעשיית, הקלדנו את הערכים שבטבלה 1 לגיליון אלקטרוני, במתואר
בטבלה 3, והוספנו לו משטח טקסט לשם תיעוד.

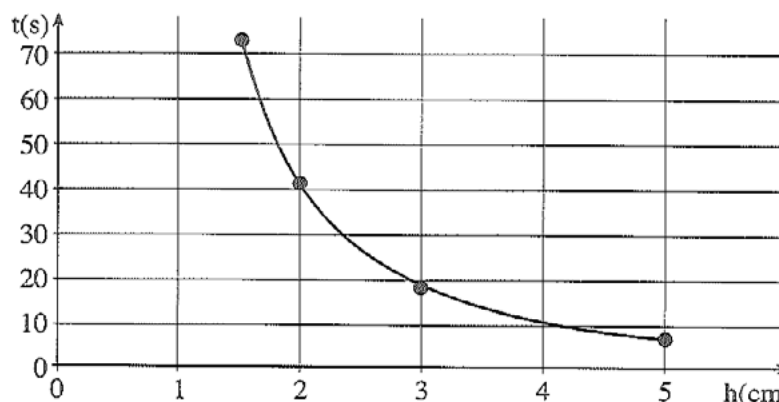
G	F	E	D	C	B	A	
1	4	10	30	h d->			1
13.5	26.7	43.5	73	1.5	חקר 2: אנליזה של ניסוי		2
7.2	15	23.7	41.2	2			3
3.7	6.8	10.5	18.4	3			4
1.5	2.2	3.9	6.8	5			5
							6
							7

טבלה 3: תוצאות המדידות המוקלדות בגיליון אלקטרוני
סרטנו (תרשים 2) את דיאגרמת הפיזור של משך הדליפה t כפונקציה של
קוטר הנקב d (ראה תאים עם רקע אפור בטבלה 3).



תרשים 2: דיאגרמת פיזור של משך הדליפה כפונקציה של קוטר הנקב
באשר גובה המים במכל היה 11 - 30 cm.
על-פי דיאגרמת הפיזור, ראוי לבחון את האפשרות שמדובר בפונקציית

חזקה (שתבניתה $t = ad^b$, ראה חקר 1). לשם כך נשתמש בשיטה הבאה:
 התאמת עקומת חזקה לדיאגרמת הפיזור
 נסרטט (תרשים 3) בעזרת הגיליון האלקטרוני את עקומת החזקה
 המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור.



משוואת העקומה שהתקבלה בגיליון האלקטרוני היא:
 (1) $t = \frac{161.8}{d^{1.972}}$

כאשר d נמדד בס"מ, ו- t בשניות. ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 \approx 1$
 באופן דומה, סרטטנו את הגרפים המתארים את משך הדליפה כפונקציה
 של קוטר הנקב גם עבור הגבהים 10 ס"מ, 4 ס"מ ו-1 ס"מ. הגרפים אינם
 מוצגים כאן; הסתפקנו בהצגת המשוואות של הגרפים.
 עבור $h = 10 \text{ cm}$ מצאנו כי:

(2) $t = \frac{96.1}{d^{1.999}}$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 \approx 0.9997$.

(3) $t = \frac{62.9}{d^{2.067}}$

עבור $h = 4 \text{ cm}$ מצאנו כי:

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 \approx 0.9991$.

(4) $t = \frac{26.7}{d^{1.798}}$

עבור $h = 1 \text{ cm}$:

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 \approx 0.9975$.

מקשרים (1) - (4) רואים כי t נמצא ביחס הפוך ל- d בחזקת מספר שהוא קרוב ל-2; במקרים אחדים החזקה מעט קטנה מ-2, ובמקרים אחרים החזקה מעט גדולה מ-2. נניח, כי אילו לא היו שגיאות מדידה, היה מתקבל מעריך חזקה השווה בדיוק ל-2, אך בגלל שגיאות מדידה מעריך החזקה שהתקבל בניסוי הוא רק קרוב ל-2. מכאן נסיק כי כאשר מים דולפים ממכל גלילי דרך נקב עמל שבקרקעית המיכל, משך הדליפה נמצא ביחס הפוך לריבוע קוטר הנקב, כאשר הגובה ההתחלתי של המים שווה בכל המקרים. בלשון מתמטית: $t \propto \frac{1}{d^2}$ כאשר h קבוע. (5)

6. א. נחשב את משך הדליפה מן המיכל כאשר קוטר הנקב הוא $d = 4 \text{ cm}$, וגובה המים במיכל $h = 10 \text{ cm}$. נסתמך על נוסחה (2), (כאשר מעריך החזקה שווה ל-2).

$$t = \frac{96.1}{d^2} \quad t = \frac{96.1}{4^2} \quad t \approx 6 \text{ s} \quad \text{עבור } d = 4 \text{ cm}$$

$$t = \frac{96.1}{d^2} \quad t = \frac{96.1}{10^2} \quad t \approx 0.96 \text{ s} \quad \text{ב. עבור } d = 10 \text{ cm}$$

ג. לגבי הערך $d = 4 \text{ cm}$: נקודה זו נמצאת בגרף בין נקודות ניסויות שבהן מצאנו את החוקיות. החישוב בסעיף 6 נסמך על הנחה שאותה חוקיות נכונה גם לגבי הנקודה $d = 4 \text{ cm}$. זו הנחת אינטרפולציה. ד. לגבי הערך $d = 10 \text{ cm}$ נקודה זו נמצאת בגרף מחוץ לתחום הנקודות הניסויות שעל-פיהן מצאנו את החוקיות. החישוב בסעיף 6 נסמך על הנחה שאותה חוקיות נכונה גם לגבי הנקודה $d = 10 \text{ cm}$. זו הנחת אקסטרפולציה.

7. כדי לחקור את הקשר בין משך הדליפה לבין גובה המים במיכל, נבחר ערכים שבהם קוטר הנקב קבוע. יש לנו ארבע סדרות של ערכים כאלה, שהן השורות שבטבלה 1.

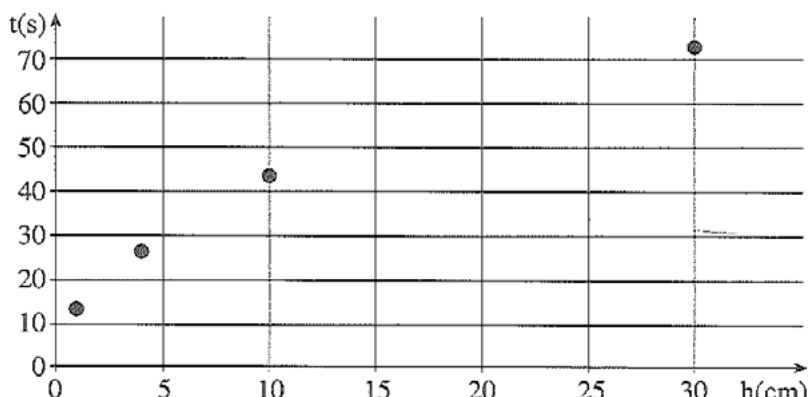
לשם הבהרה, רשמנו בטבלה 4 את ערכי d ו- t עבור נקב שקוטרו $d = 1.5 \text{ cm}$.

1	4	10	30	גובה המים - h (ס"מ)
13.5	26.7	43.5	73.0	משך הדליפה - t (ש')

טבלה 4: טבלת זמן-גובה, כאשר קוטר הנקב קבוע (1.5 ס"מ)

מעשית בחרנו מטבלה 3 בערכים הנמצאים במלבן ששתיים מפינותיו הן $G_2 - D_1$, וסרטטנו את דיאגרמת הפיזור של משך הדליפה t כפונקציה של h .

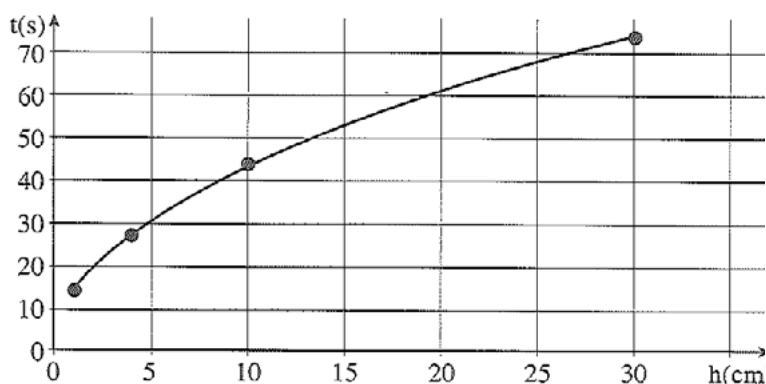
בתרשים 4 מתוארת דיאגרמת פיזור שהתקבלה.



תרשים 4: דיאגרמת פיזור של משך הדליפה כפונקציה של גובה המים, כאשר קוטר הנקב במיכל היה $d = 15 \text{ cm}$.

על-פי דיאגרמת הפיזור נבחן את האפשרות שמדובר בפונקציית חזקה (שתבניתה $t = ah^b$, ראה חקר 1). נמצא את הפונקציה בשיטה של התאמת פונקציית חזקה לדיאגרמת הפיזור.

נסרטט בעזרת הגיליון האלקטרוני את עקומת החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור. התקבלה העקומה המתוארת בתרשים 5.



תרשים 5: פונקציית החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור שבתרשים 4.

משוואת העקומה שהתקבלה בגיליון האלקטרוני היא:

$$(6) \quad t = 13.5h^{0.499}$$

כאשר h נמדד בס"מ, ו- t בשניות.

$$R^2 \approx 0.9996$$

באופן דומה, סרטטנו את הגרפים המתארים את משך הדליפה כפונקציה של גובה המים גם עבור הקטרים 2 ס"מ, 3 ס"מ ו-5 ס"מ. גם הפעם לא נציג את הגרפים. ונסתפק בהצגת המשוואות של העקומות:

$$\text{עבור } d = 2 \text{ cm}$$

$$(7) \quad t = 7.27h^{0.512}$$

$$R^2 \approx 0.9998$$

$$\text{עבור } d = 3 \text{ cm}$$

$$(8) \quad t = 3.62h^{0.471}$$

$$R^2 \approx 0.9986$$

$$\text{עבור } d = 5 \text{ cm}$$

$$(9) \quad t = 1.37h^{0.453}$$

$$R^2 \approx 0.9727$$

על סמך קשרים (6) - (9) נניח כי אילו לא היו שגיאות מדידה - מעריך החזקה של b היה 0.5. מכאן נסיק כי כאשר מים דולפים ממכל גלילי דרך נקב עגול שבקרקעית המיכל, משך הדליפה נמצא ביחס ישר לשורש הגובה ההתחלתי; כאשר קוטר הנקב קבוע.

בלשון מתמטית: $t \propto \sqrt{h}$ כאשר d קבוע. (10)

8. מקשרים (5) ו-(10) נובע כי:

$$(11) \quad t \propto \frac{\sqrt{h}}{d^2}$$

כלומר משך דליפת המים ממכל גלילי פרופורציוני לשורש של הגובה ההתחלתי של המים, ופרופורציוני הפוך לריבוע קוטר הנקב שממנו דולפים מים.

הערה: כיוון שקוטר הנקב d פרופורציוני לשטח הנקב A , כלומר $A \propto d^2$, נוכל לרשום את קשר (11) גם כך:

$$(12) \quad t \propto \frac{\sqrt{h}}{A}$$

9. א. את קשר הפרופורציה (11) ניתן להפוך לשוויון על-ידי הוספת קבוע פרופורציה k :

$$(13) \quad t = k \cdot \frac{\sqrt{h}}{d^2}$$

מקשר (13) נובע כי:

$$(14) \quad k = \frac{d^2 t}{\sqrt{h}}$$

חישובנו תחילה את ערכו של k עבור כל אחת משש-עשרה המדידות של הזמן (ראה טבלה 5). למשל הערך k , המחושב על-פי הזמן 73 שניות (ראה בגיליון האלקטרוני - טבלה 5 בתא D2), מופיע בתא D8. לתא זה הקלדנו, על-פי קשר (14), את הנוסחה: $= \$C2^2 * D2 / D\$A0.5$. את הנוסחה הזו שכפלנו (בשלבים) למלבן ששתיים מפינותיו הן D8 - G11 (ראה טבלה 5). כך קבלנו את ערכי ה- k המחושבים על-פי שש-עשרה ערכי הזמן שנמדדו.

G	F	E	D	C	B	A	
1	4	10	30	<-h d	חקר 2: אנליזה של ניסוי		1
13.5	26.7	43.5	73	1.5			2
7.2	15	23.7	41.2	2			3
3.7	6.8	10.5	18.4	3			4
1.5	2.2	3.9	6.8	5			5
							6
	k	הקבוע	חישוב				7
30.38	30.04	30.95	29.99				8
28.8	30	29.98	30.09				9
33.3	30.6	29.88	30.23				10
37.5	27.5	30.83	31.04				11
							12
			30.69	ממוצע:			13
							14

טבלה 5: תוצאות מדידות וחישובים בגיליון אלקטרוני

בתא D13 חישובנו את הממוצע של כל ערכי ה- k (הקלדנו את הנוסחה $= AVERAGE (D8:G11)$). התקבל הערך 30.69 (ראה טבלה 5).

על-פי קשר (14) היחידה של k היא $\frac{cm^2 \cdot s}{\sqrt{cm}}$ או $cm^{3/2} \cdot s$

את קשר (13) נרשום איפוא כך:

$$t = 30.69 \cdot \frac{\sqrt{h}}{d^2}$$

ב. קבוע הפרופורציה עשוי להיות תלוי בשטח הבסיס של המיכל. אם ניקח שני מיכלים שבהם מים באותו גובה, ובשניהם נקבים בעלי אותו קוטר, אולם שטח הבסיס של אחד המיכלים הוא מסדר גודל של מ"ר, ושל האחר הוא מסדר גודל של סמ"ר - משך הדליפה יהיה שונה.

פרמטר אחר שעשוי להשפיע על קבוע הפרופורציה הוא סוג הנוזל הנמצא במיכל - לנוזל צמיג, למשל שמן, סביר שמשך הדליפה יהיה גדול ממשך הדליפה של מים, כאשר הדליפה תהיה ממכלים זחים, עם אותו גובה התחלתי, ועם אותו נקב.

10. א. על-פי נוסחה (13), משך הדליפה מקיים:

$$25 = k \cdot \frac{\sqrt{20}}{d^2}$$

אם המים ינוקזו מגובה התחלתי של 40 ס"מ, יתקיים הקשר

$$t = k \cdot \frac{\sqrt{40}}{d^2}$$

משתי המשוואות האחרונות נקבל כי

$$t = \frac{25 \cdot \sqrt{40}}{\sqrt{20}} \approx 35.4 \text{ s}$$

ב. החישוב האחרון נשען על מספר הנחות, הטעונות בחינה ניסויית:
(1) הקשר שמצאנו נסמך על תוצאות ניסויות עם מיכל גלילי, ואילו אמבטיות לרוב אינן גליליות. החישוב בסעיף 9 נסמך על כך שהקשר שנגזר מניסוי עם מיכל גלילי אינו תלוי בצורת המיכל, וזה טעון בדיקה.

(2) הנקב באמבטיה אינו נמצא במרכז האמבטיה, ויתכן כי למיקום הנקב יש חשיבות לגבי משך הניקוז, אך החישוב לעיל אינו לוקח זאת בחשבון.

(3) הדפנות של רוב האמבטיות אינן ניצבות לקרקעית האמבטיה, והחישוב לעיל מתעלם מכך.

חקר 3

תנועת כדור בנוזל צמיג

שאלת חקר

כדור פלדה קטן נופל בנחל צמיג.

א. מה סוג התנועה של הכדור?

ב. כיצד תלויה תנועת הכדור בגודלן?

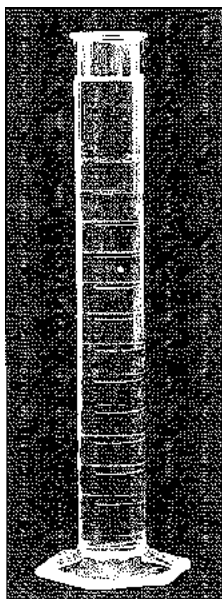


העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

רשימת בלי המחקר

- (1) משורה שקופה שגובהה 30 ס"מ לפחות. רצוי שקוטרה הפנימי יהיה 4 ס"מ או יותר, אך ניתן להסתפק במשורה שקוטרה 2.5 ס"מ;
- (2) 4 גומיות (הניתנות ל"הלבשה" על המשורה);
- (3) שעון עצר;
- (4) כדורי פלדה: שלושה כדורים מכל אחד מן הקטרים האלה: 1 מ"מ; 2 מ"מ; 3 מ"מ; 4 מ"מ; 5 מ"מ;
- (5) גליצרין (טכני) בכמות שתמלא את המשורה המתוארת ב-(1) לעיל;
- (6) סרגל שאורכו כ- 30 ס"מ;
- (7) מגנט חזק;
- (8) כפית פלסטיק או פינצטה פלסטיק;
- (9) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).



תכנון

1. ידוע כי כדור פלדה, הנופל בנוזל צמיג, מגיע כעבור זמן קצר לתנועה **שוות** – **מהירות**, **תכנון** ניסוי לבדיקת הטענה שתנועת כדור פלדה הנופל בגליצין היא תנועה שוות-מהירות. על הניסוי להתבסס על הציוד העומד לרשותך.

לפני תכנון הניסוי, שחרר כדור (ביד או בעזרת כפית או בעזרת פינצטה) מנקודה מתחת לפני הגליצין שבמשורה, כדי להתרשם מתנועת הכדור. **שים לב**, לא רצוי שהכדור יפול סמוך לדופן המשורה. רשום את המהלך המתוכנן של הניסוי.

בניית המערכת הניסויית

מלא את המשורה בגליצין, עד גובה של מספר סנטימטרים מתחת לשפת המשורה. **שים לב**, כדאי למלא את המשורה בגליצין יום לפני ביצוע הניסוי, כדי שבועות האוויר הנוצרות בעת מزیגת הגליצין יעלו, ויצאו מן הגליצין.

ביצוע הניסוי

2. **בצע** את הניסוי שתכננת. השתמש בכדור פלדה בקוטר 2 מ"מ. רשום כיצד אתה מסיק שהתנועה היא שוות – מהירות. הערה: במידת הצורך, תוכל להוציא כדור מתוך הגליצין באמצעות מגנט. 3. מצא את המהירות הקבועה עבור כדור מכל גודל. הכן טבלה הכוללת משתנים אלה:
 R – רדיוס הכדור;
 v – המהירות הקבועה של הכדור.
משתנים נוספים הדרושים לך לחישוב המהירות (תוכל להניח כי תנועתו של כל כדור היא שוות מהירות).

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

4. סרטט דיאגרמת פיזור (נקודות במערכת צירים) המתארת את מהירות הכדורים (v) כפונקציה של הרדיוס שלהם (R).
5. א. התאם, בעזרת הגיליון האלקטרוני, עקומה לדיאגרמת הפיזור. מצא את משוואת העקומה, ואת ריבוע מקדם המיתאם.
ב. רשום מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין v ל- R .

השוואת המסקנות האמפיריות לתיאוריה

כדי להבין את תנועתו של הכדור בניסוי זה, יש להכיר שני חוקים פיזיקליים, שאולי אינם ידועים לך (בנוסף לחוקי פיזיקה אותם אתה מכיר): **חוק ארכימדס**: על גוף השרוי בנוזל פועל כוח כלפי מעלה (הנקרא כוח עילוי); גודלו שווה למשקל הנוזל הנדחה על-ידי הגוף (במילים אחרות, גודלו שווה **למשקל הנוזל שנפחו כנפח הגוף**), והוא נתון על-ידי הנוסחה:

$$(1) F' = p'Vg$$

כאשר

F' – כוח העילוי;

P' – צפיפות הנוזל (מסה ליחידת נפח);

V – נפח הנוזל הנדחה על-ידי הגוף (או: נפח הגוף).

חוק סטוקס: כאשר כדור נע בנוזל, פועל עליו כוח מעכב (כלומר כיוונו מנוגד לכיוון תנועת הכדור); גודלו ניתן על-ידי הנוסחה:

$$(2) F'' = 6\mu\pi Rv$$

כאשר:

F'' – הכוח המעכב;

V – מהירות הכדור;

R – רדיוס הכדור;

– קבוע (לנוזל מסוים) הנקרא "צמיגות הנוזל".

6. סרטט את כל הכוחות הפועלים על כדור (כדוגמת הכדורים בניסוי) בזמן תנועתו כלפי מטה בנוזל.

7. נסח קשר מתימטי בין כל הכוחות הפועלים על כדור לאחר שהוא הגיע למהירות קבועה.

8. מדוע בעבור זמן מסוים מגיע הכדור למהירות **קבועה**?

9. א. על-פי הקשר שמצאת בסעיף 7, מצא את תלות v ב- R (נסח את הקשר במילים ובנוסחה).

ב. השווה את התבנית המתמטית שמצאת בסעיף זה לזו שקיבלת בסעיף 5. ציין סיבות אפשריות להבדל בין התוצאות.

10. ענה על שאלת החקר.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. תכנון ניסוי לבדיקת הטענה שתנועת כדור פלדה הנופל בגליצרין היא שוות מהירות: מסמנים על המשורה קווים אופקיים (או ש"מלבישים" עליה גומיות). משחררים כדור לתוך הגליצרין, ומודדים את זמני התנועה בין הקווים השונים. לאחר מכן מודדים את המרחקים בין קווים סמוכים, ומחשבים את המהירויות הממוצעות. אם המהירויות הממוצעות שוות – הדבר מעיד שהתנועה היא שוות מהירות.

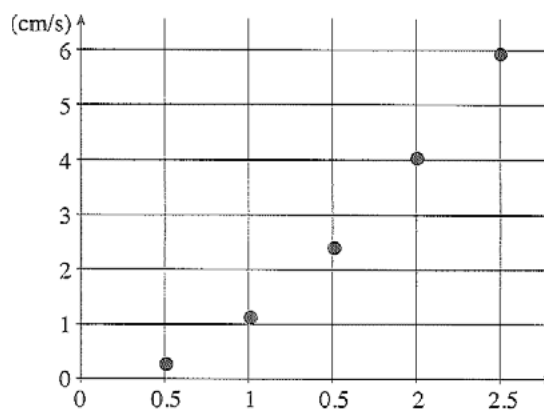
2. סמנו על המשורה ארבעה קווים במרחק 7.5 cm זה מזה. שיחררנו כדור שקוטרו 2 mm. מדדנו בעזרת שעון העצר את זמני התנועה בלן קווים סמוכים, וקבלנו כי שלושת פרקי הזמן שווים בקירוב ל- 6 s. כלומר הכדור עובר העתקים שווים בזמנים שווים, לכן תנועתו קצובה.

3. תוצאות מדידות וחישובים, עבור כדורים בעלי רדיוסים שונים, רשומים בטבלה 1.

מהירות v (מ/ש"י)	זמן				העתק Δx (ס"מ)	רדיוס כדור R (מ"מ)
	ממוצע (ש"י)	מדידה III (ש"י)	מדידה II (ש"י)	מדידה I (ש"י)		
0.27	83.7	81	83	87	23	0.5
1.13	20.3	20.2	20.3	20.5	23	1
2.42	9.5	9.6	9.5	9.5	23	1.5
4.04	5.7	5.7	5.6	5.7	23	2
5.90	3.9	3.9	3.9	3.9	23	2.5

טבלה 1: תוצאות מדידות וחישובים

4. דיאגרמת הפיזור של מהירות הכדורים כפונקציה של הרדיוס שלהם מתוארת בתרשים 1. מדיאגרמת הפיזור ניתן לראות כי התלות של מהירות הכדור ברדיוס אינה לינארית.



5. א. על-פי דיאגרמת הפיזור נשער כי מתאימה לה פונקציית חזקה שתבניתה:

$$(3) \quad v = aR^b$$

זו האפשרות הפשוטה ביותר. נבחן השערה זו, ואם נמצא אותה מתאימה - נחשב את מעריך החזקה b . נציע שתי דרכים למציאת הפונקציה.

דרך א: התאמת עקומת חזקה לדיאגרמת הפיזור בעזרת הגיליון האלקטרוני סרטטנו את עקומת החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור. הגרף מתואר בתרשים 2.

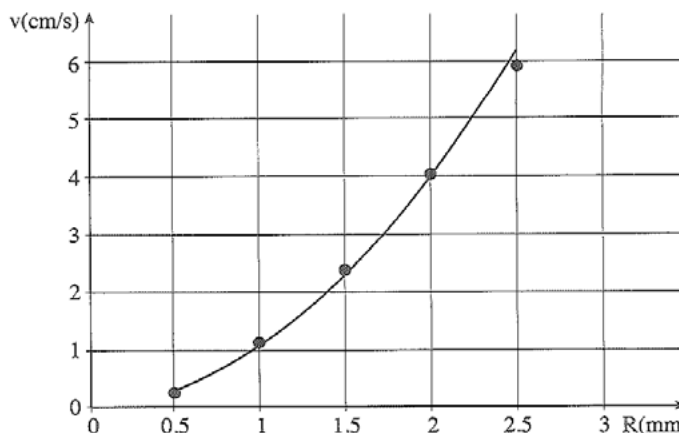
משוואת הגרף, שהתקבלה בעזרת הגיליון האלקטרוני היא:

$$(4) \quad v = 1.068R^{1.92}$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9985$

מקשר (4) נובע כי התבנית המתמטית של v כפונקציה של R היא:

$$(5) \quad v \propto R^{1.92}$$



תרשים 2: עקומת חזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור

דרך ב: חקירת $\ln v$ כפונקציה של $\ln R$

נרשום עתה כי ה- $\ln$ של גודל ימיו ושל הנשר (b) שווה ל- $\ln$ של אגף שמאל;

$$\ln(v) = \ln(aR^b)$$

$$\ln(v) = \ln(a) + b \ln(R)$$

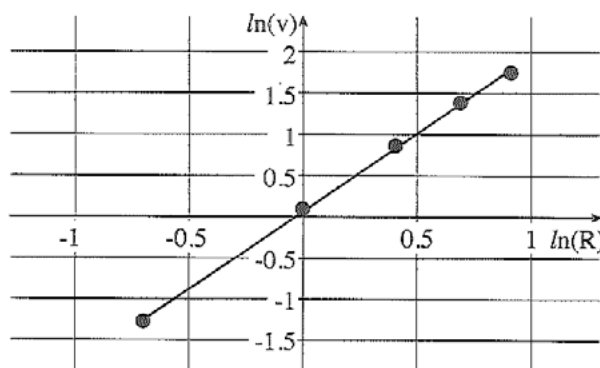
לכן;

מכאן, שאם נחשב את ערכי $\ln(R)$ ו $\ln(v)$ ונסרטט גרף של $\ln(v)$ כפונקציה של $\ln(R)$ נקבל קו ישר ששיפועו שווה ל b (אם אכן מדובר בפונקציית חזקה). ערכי ה- $\ln$ שהתקבלו (בעזרת גיליון אלקטרוני) רשומים בטבלה 2.

$\ln(v)$	$v(\text{cm/s})$	$\ln(R)$	$R(\text{mm})$
-1.30933	0.27	-0.69315	0.5
0.122218	1.13	0	1
0.883768	2.42	0.405465	1.5
1.396245	4.04	0.693147	2
1.774952	5.90	0.916291	2.5

טבלה 2: ערכי ה- $\ln$ של הערכים שנמדדו

בתרשים 3 מתואר הגרף של $\ln(v)$ כפונקציה של



תרשים 3: גרף של ערכי ה- $\ln$ של הערכים הנמדדים

משוואת הישר שבתרשים 3 (כפי שהתקבלה בגיליון אלקטרוני) היא:

$$(6) \ln(v) = 1.92011 \ln(R) + 0.066$$

ריבוע מקדם המיתאם שהתקבל: $R^2 = 0.9985$

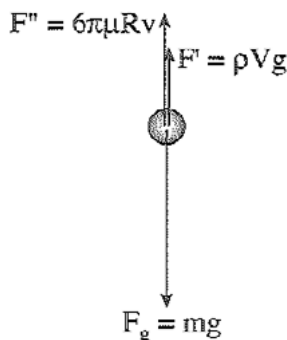
מקשר (6) נובע כנדרש כי:

$$V \propto R^{1.92}$$

ב. מסקנה אמפירית: המהירות הקבועה של כדור הנופל הגליצרין

פרופורציונית לרדיוס הכדור בחזקת 1.92.

6. הכוחות הפועלים על כדור בזמן תנועתו מתוארים בתרשים 4.



תרשים 4: הכוחות הפועלים על כדור הנופל בתווך צמיג

7. על-פי החוק השני של ניוטון, הקשר בין הכוחות הפועלים על כדור לאחר

שהוא הגיע למהירות קבועה:

$$(7) mg = \rho'Vg + 6\mu\pi RV$$

8. ברגע שבדור הפלדה מוכנס לגליצרין (במהירות אפס) פועל עליו כוח הכובד כלפי מטה, וכוח העילוי כלפי מעלה. כיוון שכוח הכובד גדול מכוח העילוי - לבדור יש תאוצה כלפי מטה, והוא מתחיל לנוע בכיוון זה. מרגע שהכדור מתחיל לנוע - פועל עליו כוח מעכב, אשר על-פי חוק סטוקס גודלו פרופורציוני למהירות. ככל שמהירות הכדור כלפי מטה הולכת וגדלה - גדל גם הכוח המעכב, עד לרגע שבו סכום שני הכוחות הפועלים עליו כלפי מעלה שווה בגודלו לכוח הכובד. ברגע זה מתאפסת תאוצת הכדור, ומרגע זה ואילך תנועתו היא שוות מהירות.

9. א. נציב בנוסחה (7) $m = \rho V$ (צפיפות הכדור), ונקבל:

$$\rho V g = \rho' V g + 6\pi\mu R v \quad v = \frac{\rho V g - \rho' V g}{6\pi\mu R}$$

נציב בנוסחה האחרונה את הביטוי לחישוב נפח כדור:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

ולאחר מספר פעולות אלגבריות נקבל:

$$v = \frac{2g(\rho - \rho')}{9\mu} \cdot R^2$$

לכן:

$$(8) \quad v \propto R^2$$

כאשר כדור פלדה נופל בגליצרין, מהירותו הקבועה פרופורציונית לריבוע רדיוס הכדור.

$$v \propto R^2$$

בנוסחה:

ב. ההבדל בין התבניות (5) ו-(8) יכול לנבוע: א. מכך שהמודל שבנינו אינו זהה למציאות. ב. משגיאות מדידה: (1) של מהירויות הכדורים. (2) של קטרי הכדורים.

10. א. לאחר זמן מה מהירות הכדור קבועה.

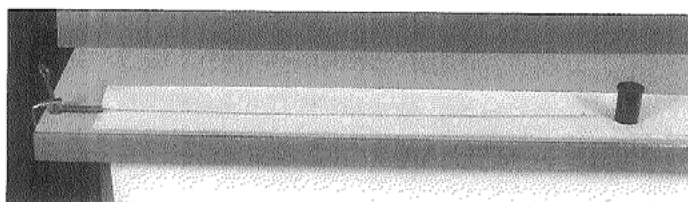
ב. המהירות הקבועה פרופורציונית לריבוע רדיוס הכדור.

חקר 4

גרירת גוף על – ידי קפיץ

שאלת חקר

קפיץ אופקי קשור בקצהו האחד לנקודה קבועה. קצהו האחר קשור באמצעות חוס לקופסה המונחת על שולחן. מסיסים את הקופסה למרחק x תוך כדי מתיחת הקפיץ, ומשחררים אותה. הקופסה מחליקה על השולחן מרחק L , עד עצירתה



מה הקשר בין x לבין L ?

העלאת השערה

רשום את השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר. ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

1. תכנן מערך ניסויי שעל-פי ממצאיו ניתן לענות שאלת החקר.

רשימת בלי המחקר

- (1) פס נייר בריסטול שממדיו כ- $15\text{ cm} \times 100\text{ cm}$;
- (2) קופסה (עם מכסה) מן הסוג המשמש לאיחסון סרטי צילום;
- (3) חוט דק, שאינו מתארך תחת מעמסה. אורך החוט כ- 1 מטר;

(4) 16 דסקיות זהות המשמשות משקולות (תרשים 1). הקוטר של כל דסקית צריך להיות קטן מעט מן הקוטר הפנימי של הקופסה המוזכרת ב-(2) לעיל;

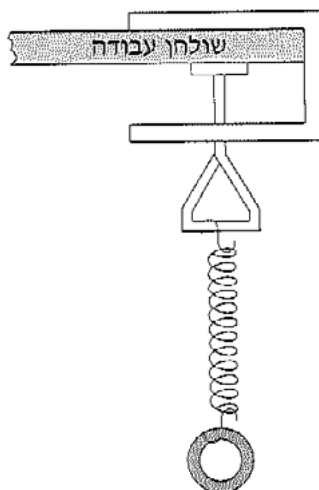


תרשים 1: דיסקית המשמשת כמשקולת

- (5) קפיץ שקבוע הכוח שלו מסדר גודל של 25 - 30 ניוטון למטר;
- (6) בליבה;
- (7) סרגל שאורכו כ - 1 מטר;
- (8) סרט הדבקה;
- (9) 2 מהדקים משרדיים;
- (10) גיליון אלקטרוני או נייר מילימטרי.

ניסוי מקדים: מדידת קבוע הקפיץ

מטרת הניסוי המקדים היא לבטא את קבוע הקפיץ, באמצעות כוח הכובד mg הפועל על משקולת אחת.
2. הדק את הבליבה אל השולחן, ותלה עליה, באמצעות מהדק משרדי, את הקפיץ (ראה תרשים 2).



תרשים 2: המערכת הניסויית למציאת קבוע הקפיץ

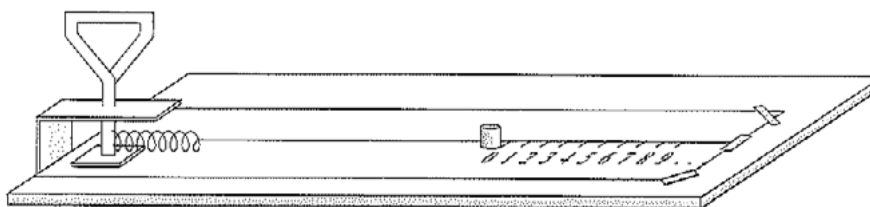
תלה בקצה התחתון של הקפיץ מהדק משרדי אחר, שעליו תרכל להשחיל משקולות.

3. בצע מדידות שעל-פיהן תוכל להביע, באמצעות כוח הכובד mg הפועל על משקולת אחת, את קבוע הקפיץ. רשום את הביטוי לקבוע הקפיץ. הערה: תוכל להסתפק בשתי מדידות; תכנן תחילה מספרים מתאימים של משקולות שתתלה על הקפיץ בכל אחת משתי המדידות.

בניית המערכת הניסויית

א. הדק את קצה נייר הבריסטול לקצה השולחן באמצעות כליבה, כמתואר בתרשים 3.

ב. הדבק את הקצה האחר של הנייר אל השולחן באמצעות סרט הדבקה (תרשים 3).



תרשים 3: מערכת הניסוי במצב שבו הקפיץ אינו מתוח

ג. קשור קצה אחד של החוט אל הקופסה, בגובה 1 ס"מ בערך מן התחתית שלה.

הערה: תוכל לנקב את הקופסה בגובה 1 ס"מ בערך מן התחתית שלה, להשחיל את החוט, ולעשות קשר בקצה החוט הנמצא בתוך הקופסה, כך שהקשר יהיה גדול מן הנקב.

ד. את קצהו האחר של החוט קשור לקצה הקפיץ, כך שאורך החוט בין הקופסה לבין הקפיץ יהיה בין 55 ס"מ ל - 75 ס"מ.

ה. את הקצה האחר של הקפיץ, קשור אל הכליבה בגובה כ-1 ס"מ מעל פני השולחן.

ו. הרחק את הקופסה מהקפיץ, עד שהחוט והקפיץ יהיו ישרים אך לא מתוחים. במצב זה סמן ב - 0 את מקומו של קצה הקופסה הרחוק מן הקפיץ, וסרטט על נייר הבריסטול, בהמשך לחוט, ציר מספרים שראשיתו ב- 0. המרווח בין השנתות על ציר המספרים יהיה 1 ס"מ (כמתואר בתרשים 3).

ביצוע הניסוי

4. הכנס לתוך הקופסה N משקולות, כאשר N בין 6 ל-16, וסגור את המכסה. מספר המשקולות יישאר קבוע במהלך הניסוי. רשום את מספר המשקולות שהכנסת לקופסה.

5. מתח את הקפיץ על-ידי משיכת הקופסה עד אחת השנתות שסימנת על נייר הבריסטול, והחזק את הקופסה במקום. רשום את שיעור ההתארכות x של הקפיץ בטור הימני של טבלה כדוגמת טבלה 1. דאג לכך ששיעור ההתארכות יהיה בין 2 ס"מ לבין 14 ס"מ.

6. שחרר את הקופסה והנח לה לנוע עד העצירה. סמן את מקום העצירה, ומדוד את המרחק L שעברה הקופסה ממקום שחרורה עד מקום העצירה. רשום את תוצאת המדידה במקום המתאים בטבלה. חזור על מדידת המרחק L שלוש פעמים, כאשר בכל מדידה אתה משחרר את הקופסה מאותו מקום (אותו x). רשום את תוצאות המדידות במקומות המתאימים בטבלה.

X	L			L (ממוצע)
	מדידה I	מדידה II	מדידה III	

טבלה 1: לרישום תוצאות מדידות וחישובים

7. חזור על סעיפים 5-6 עבור ארבעה שיעורי x נוספים.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

8. חשב את הערכים של L (ממוצע שלושת הערכים המתאימים של L), ורשום אותם בטבלה.

9. סרטט דיאגרמת פיזור של המרחק L שעברה הקופסה כפונקציה של ההתארכות x של הקפיץ.

10. א. סרטט עקומה המתאימה לדיאגרמת הפיזור, ומצא את משוואת העקומה ואת ריבוע מקדם המיתאם.
 ב. רשום מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין L ל- X .

השוואת המסקנות האמפיריות לתיאוריה

11. בלי להסתמך על תוצאות המדידות, כתוב שוויון המתאר את הקשר בין התארכות הקפיץ x לבין המרחק L שעוברת הקופסה.
 12. השווה ביו התלות של L ב- X שקיבלת בסעיף 10א, לביו זו שקיבלת בסעיף 11. אם התלות שונה - צייו סיבות אפשריות להבדל ביו התוצאות.

שאלות

13. על-סמך משוואת העקומה שמצאת בסעיף 10א, השוויון שכתבת בסעיף 11, וקבוע הקפיץ כפי שהבעת אותו בסעיף 3, חשב את מקדם החיכוך בין הקופסה לבין נייר הבריסטול. (הזנח את מסת הקופסה הריקה).
 14. כיצד משפיע מספר המשקולות N שבקופסה על אי-הוודאות היחסית של מדידת המרחק L ? הסבר.
 15. תכנן ניסוי אחר, שניתן לבצע בעזרת המערכת הניסויית שברשותך, ואשר ניתן לחשב מתוצאותיו את מקדם החיכוך.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. מבצעים סדרת מדידות שבכל אחת מהן מותחים את הקפיץ בשיעור x אחר (x - המשתנה הבלתי תלוי) ומודדים את המרחק L שאותו עוברת הקופסה (L - המשתנה התלוי).

במהלך הניסויים מקפידים על כך שפרמטרים אחרים, כגון מסת הקופסה, סוג הקפיץ, והמשטח ישארו קבועים - לבסוף מנסחים קשר מתמטי בין x ל- L .

2-3. ערכנו שתי מדידות: במדידה הראשונה תלינו שתי משקולות, ומדדנו מרחק אנכי של 14.9 cm מהקצה התחתון של הקפיץ עד לתחתית לוח השולחן. במדידה השנייה תלינו 13 משקולות, והמרחק עלה ל- 19.2 cm. נבטא את קבוע הקפיץ על סמך חוק הוק:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta l} \rightarrow k = \frac{13mg - 2mg}{19.2(cm) - 14.9(cm)}$$

כאשר: m - מסה של משקולת אחת.

$$K = \frac{11mg}{4.3(cm)}$$

לכן:

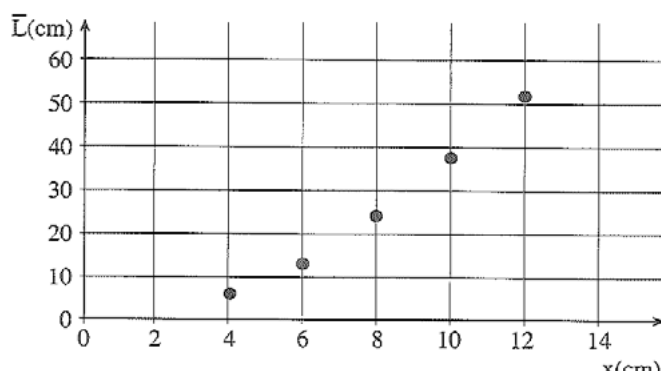
4. מספר המשקולות שהוכנסו לקופסה: $N = 10$.

5-8. תוצאות מדידות וחישובים בטבלה 2.

X (cm)	L (cm)			L (ממוצע) (cm))
	מדידה I	מדידה II	מדידה III	
12	51.8	51.8	51.6	51.73
10	37.9	37.7	37.4	37.67
8	23.7	23.8	23.8	23.77
6	12.7	12.2	13.3	12.73
4	5.7	6.0	5.8	5.83

טבלה 2: תוצאות מדידות וחישובים

9. הערכים שנמדדו הוקלדו לגיליון אלקטרוני, ובאמצעותו חושבו הערכים הרשומים בעמודה השמאלית בטבלה 2.
באמצעות הגיליון האלקטרוני סרטטנו דיאגרמת פיזור של כפונקציה של x (תרשים 4).

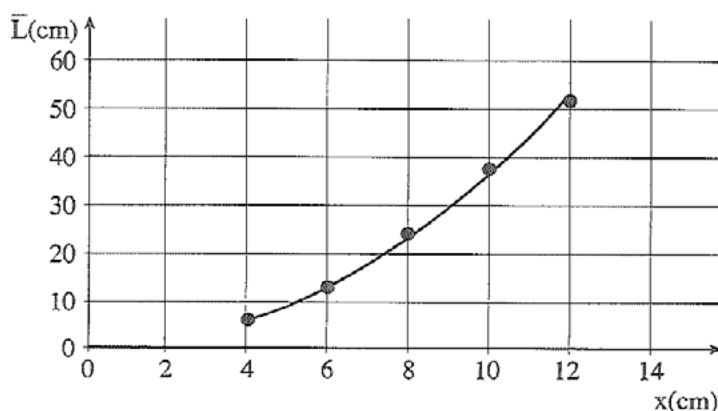


תרשים 4: דיאגרמת פיזור של תוצאות המדידות

10. א. על-פי דיאגרמת הפיזור נשער כי הפונקציה המתאימה לדיאגרמת הפיזור היא פונקציית חזקה שתבניתה $y = ax^b$ (כאשר $b > 1$). נבחן את ההשערה.

התאמת עקומת חזקה לדיאגרמת הפיזור

נשרטט בעזרת גיליון אלקטרוני עקומת חזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור המתוארת בתרשים 4. הגרף מתואר בתרשים 5.



תרשים 5: עקומת חזקה המתאימה לדיאגרמת הפיזור שבתרשים 4

משוואת העקומה, כפי שהתקבלה בגיליון אלקטרוני:

$$(2) = 0.355x2.01$$

כאשר x ו-1 נמדדים בס"מ.

$$R^2 = 0.9992$$

ב. מסקנה אמפירית: מרחק ההחלקה L על השולחן פרופורציוני לריבוע המרחק x של מתיחת הקפיץ.

11. הקשר בין התארכות הקפיץ x לבין יכול להתקבל מן הקשר:

$$W = E_2 - E_1$$

(ראה מכניקה ניוטונית, כרך ב, פרק ח, נוסחה (24)).

לבן:

$$-\mu MgL = 0 - \frac{1}{2}kx^2 \rightarrow \mu MgL = \frac{1}{2}kx^2$$

כאשר: M – מסת הקופסה.

או:

$$(3) L = \frac{k}{2\mu Mg} x^2$$

12. בסעיף 9 מצאנו כי $\bar{L} \propto x^{2.01}$ ובסעיף 11 מצאנו כי $L \propto x^2$. אם לוקחים בחשבון שגיאות מדידה אקראיות, הרי שתי התוצאות אינן מצביעות על קשר שונה.

13. ממשוואות (2) ו-(3) נובע כי:

$$(4) 0.3636 = \frac{k}{2\mu \cdot Mg}$$

($M = 10m$ כאשר m – מסת משקולת אחת).

נציב בקשר (4) את הביטוי ל k על-פי קשר (1):

$$(5) 0.3636 \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{11mg}{2\mu \cdot 10mg \cdot 4.3 \text{ (cm)}}$$

הפתרון של משוואה (5) הוא:

$$\mu \approx 0.35$$

זה מקדם החיכוך בין הקופסה לבין נייר הבריסטול.

14. ככל שמספר המשקולות יותר גדול - אי-הוודאות היחסית במדידת L גדולה יותר. הסבר: אי-הוודאות היחסית במדידת L מוגדרת כך:

$$\frac{\Delta L}{L} = \text{אי-וודאות יחסית (6)}$$

כאשר: ΔL - אי-הוודאות המוחלטת במדידת L (גודל קבוע).
 ΔL נקבע על-פי המרווח בין השנתות של הסרגל שבו מודדים את L . לכן עבור סרגל עם מרווח מסוים בין השנתות, ΔL הוא קבוע.
 על-פי קשר (3) דלעיל, ככל שהמסה M גדולה יותר - L קטן יותר, ועל-פי קשר (6) ככל ש- L קטן יותר - אי-הוודאות היחסית במדידת L גדולה יותר.

15. בניסוי המתואר לעיל מסת הקופסה היתה קבועה, ובכל פעם שינינו את x , ומדדנו את L .

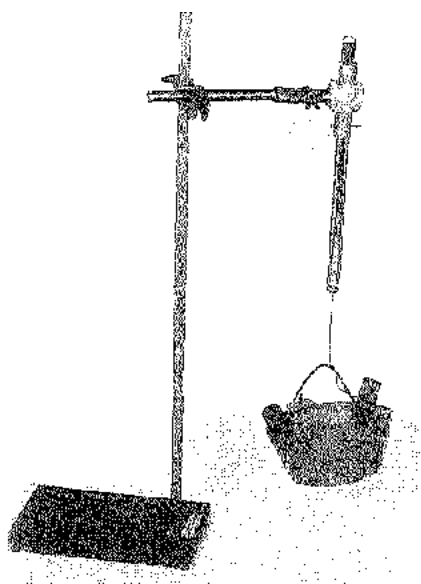
ניתן לבצע ניסוי אחר, שבו x נשאר קבוע, אך בכל פעם משנים את מסת הקופסה M (על-ידי שינוי מספר המשקולות שבקופסה) ומודדים את L .
 על-פי הקשר בין L ל- M ניתן לחשב את מקדם החיכוך.

חקר 5

תלות הקבוע של קפיץ באורכו

שאלת חקר

האם קבוע הכוח של קפיץ תלוי באורך הקפיץ?



אם כן – מה הקשר בין קבוע הכוח לבין האורך?
העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקולך

תכנון מערך ניסוי

1. תכנון מערך ניסוי שבאמצעות ממצאיו ניתן לענות על שאלת החקר. ציין איזה משתנה הוא תלוי ואיזה משתנה הוא בלתי תלוי.

רשימת בלי המחקר

- (1) קפיץ (בעל קבוע כוח השווה בערך ל 30 N/m);
 (2) צינור שאורכו ב 10 cm בעל קוטר גדול במקצת מקוטר הקפיץ, עם שני נקבים, אחד מול האחר (תרשים 1); [אפשר לחתוך מצינור קטע באורך המתאים, ובעזרת מקדחה לנקב בו שני נקבים].

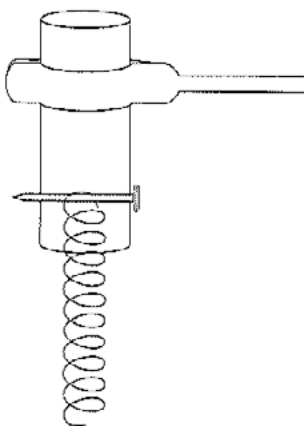


תרשים 1; צימר עם שני נקבים

- (3) מסמר (שניתן להשחיל אותו דרך הנקבים המוזכרים ב- (2) לעיל);
 (4) כן (סטטיב) עם אוחד;
 (5) 6 משקולות בנות 0.30 ק"ג כל אחת;
 (6) סלסלה;
 (7) סרגל שאורכו ב- 1 מטר ;
 (8) גיליון אלקטרוני.

בניית המערכת הניסויית

הרכב את המערכת על פי התצלום המופיע בשאלת החקר, ועל-פי תרשים 2. שים לב, המסמר עובר דרך שני הנקבים שבצינור, והצינור מהודק לכן (סטטיב) באמצעות אוחד.



תרשים 2: המערכת הניסויית

ביצוע הניסוי

חלק הקפיץ שבין הלולאה הראשונה הנמצאת מתחת למסמר לבין הלולאה הנמוכה ביותר של הקפיץ ייקרא להלן **"החלק הפעיל"** של הקפיץ. בשלב זה **"החלק הפעיל"** של הקפיץ הוא כל הקפיץ.

2. מדוד ורשום את אורכו של **"החלק הפעיל"** של הקפיץ (כאשר הקפיץ אינו עמוס).

3. תלה את הסלסלה על הקצה התחתון של הקפיץ, והכנס לתוכה משקולת אחת. למצב שבו תלויה על הקפיץ סלסלה ובתוכה משקולת אחת נקרא **"מצב התחלתי"**.

4. הכן טבלה שבה תוכל לרשום נתונים אלה:

F – תוספת הכוח שמפעיל הקפיץ על הסלסלה (ביחס **"למצב ההתחלתי"**);
 l – התארכות הקפיץ (ביחס **"למצב ההתחלתי"**).

5. הכנס לסלסלה משקולת נוספת, ורשום בטבלה את תוספת הכוח ΔF ואת התארכות הקפיץ Δl .

6. הכנס לסלסלה משקולות נוספות, מדוד ורשום בטבלה בכל פעם את ΔF ואת Δl .

7. שנה לפחות שלוש פעמים את אורכו הרפוי של **"החלק הפעיל"** של הקפיץ. לגבי כל אחד מן האורכים הללו, חזור על הפעולות המפורטות בסעיפים 2-6. **שים לב**, כדי לשנות את אורכו של **"החלק הפעיל"**, הוצא את המסמר, הכנס את הקפיץ מעט לתוך הצינור, והשחל את המסמר כך שיעבור דרך הנקבים ודרך הקפיץ.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

8. לגבי כל אחד מהאורכים שלגביהם ביצעת מדידות, סרטט גרף של תוספת הכוח $F \Delta$ כפונקציה של התארכות הקפיץ Δl .
9. לגבי כל אחד מן האורכים, מצא את משוואת הקו, את ריבוע מקדם המיתאם ואת קבוע הקפיץ (של "החלק הפעיל").
10. (א) הכן טבלה מתאימה, ורשום בה נתונים אלה:
 l – אורך "החלק הפעיל" של הקפיץ, כשהקפיץ רפוי;
 k – קבוע הקפיץ (של ה"חלק הפעיל").
 (ב) סרטט דיאגרמת פיזור של קבוע הקפיץ, k, כפונקציה של אורך הקפיץ, l.
11. א. הוסף לדיאגרמת הפיזור עקומה מתאימה, מצא את משוואת העקומה.
 ב. רשום מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין k ל-l.

שאלה

12. א. מה יהיה הקבוע של קפיץ, הזהה לקפיץ שברשותך, אך אורכו כפול מאורך הקפיץ שברשותך?
- ב. איזו הנחה הנחת לשם החישוב שבסעיף 12? וא לעיל?

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

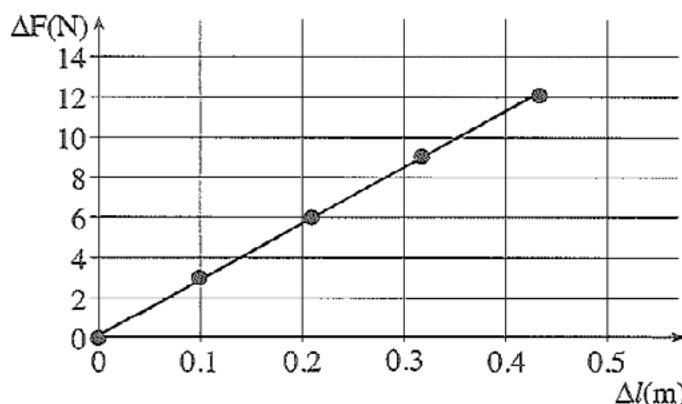
1. לוקחים קפיץ, ומודדים את קבוע הקפיץ k של חלקים בעלי אורך l שונה של הקפיץ. k הוא המשתנה התלוי, ו- l המשתנה הבלתי תלוי. מנסחים קשר בין l ל- k .

2-9. עבור שבעה ערכים שונים של ה"חלק הפעיל" l מדדנו את תוספת הכוח F כפונקציה של התארכות הקפיץ Δl . תוצאות המדידות, גרפי כוח-התארכות, משוואות הקווים, וקבועי הקפיצים מופיעים להלן.

א. אורך פעיל: $l = 17 \text{ cm}$. תוצאות המדידות רשומות בטבלה 1.

התארכות - Δl (cm)	0	10	21	31.8	43.2
תוספת כוח - ΔF (N)	0	3	6	9	12

טבלה 1: תוצאות של מדידות



תרשים 3: הכוח כפונקציה של ההתארכות; אורך פעיל: $l = 17 \text{ cm}$. משוואת הישר: $\Delta F = 27.7 \cdot \Delta l + 0.125$ (ΔF ביחידות SI).

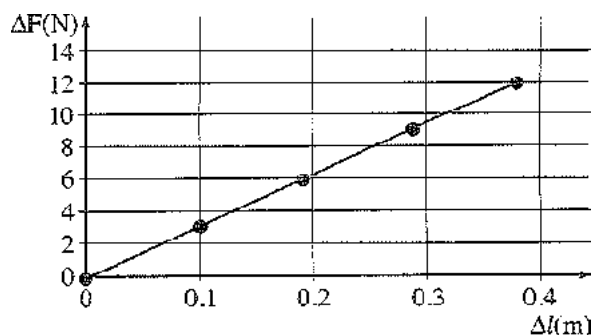
ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9995$

קבוע הקפיץ (על-פי משוואת הישר): $k = 27.7 \text{ N/m}$

ב. אורך פעיל: $l = 14.5 \text{ cm}$. תוצאות המדידות רשומות בטבלה 2.

התארכות - Δl (cm)	0	10	19.3	28.7	38
תוספת כוח - ΔF (N)	0	3	6	9	12

טבלה 2: תוצאות של מדידות



תרשים 4: הכוח כפונקציה של ההתארכות; אורך פעיל: $l = 14.5 \text{ cm}$

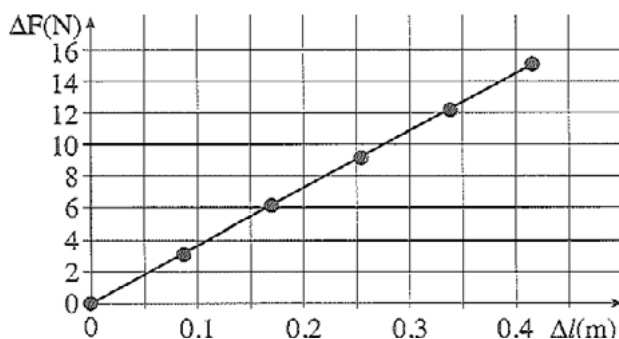
משוואת הישר: $\Delta F = 35.9 \cdot \Delta l - 0.082$ (SI). ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9998$.

קבוע הקפיץ (על-פי משוואת הישר): $k = 31.7 \text{ N/m}$

ג. אורך פעיל: $l = 13.2 \text{ cm}$. תוצאות המדידות רשומות בטבלה 3.

41.7	33.9	25.5	17	8.7	0	התארכות (Δl cm)
15	12	9	6	3	0	תוספת כוח - ΔF (N)

טבלה 3: תוצאות של מדידות



תרשים 5: הכוח כפונקציה של ההתארכות; אורך פעיל: $l = 13.2 \text{ cm}$

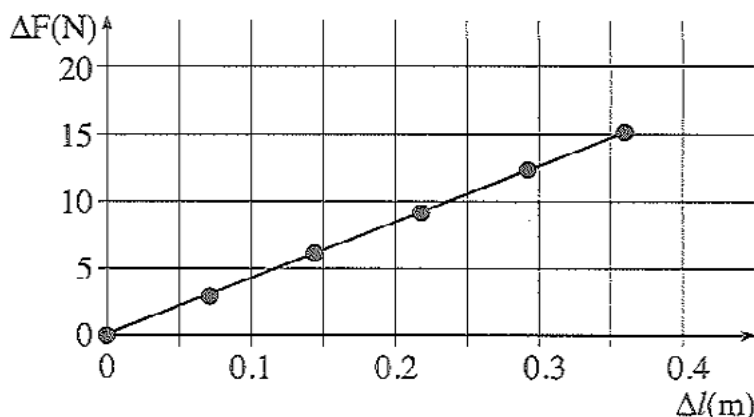
משוואת הישר: $\Delta F = 35.9 \cdot \Delta l - 0.082$ (SI). ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9998$.

קבוע הקפיץ (על-פי משוואת הישר): $k = 35.9 \text{ N/m}$

ד. אורך פעיל: $l = 11 \text{ cm}$. תוצאות המדידות רשומות בטבלה 4.

התארכות Δl (cm)	0	7.2	14.5	21.7	29.2	36
תוספת כוח ΔF (N)	0	3	6	9	12	15

טבלה 4: תוצאות של מדידות



תרשים 6: הכוח כפונקציה של ההתארכות; אורך פעיל: $l = 11 \text{ cm}$

משוואת הישר: $\Delta F = 41.5 \cdot \Delta l - 0.005$ (ביחידות SI)

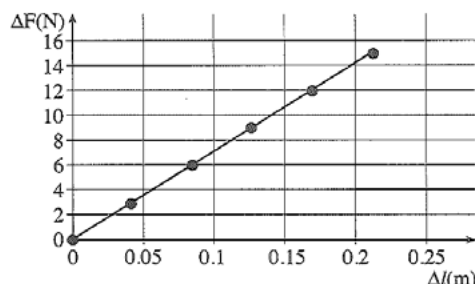
ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9999$

קבוע הקפיץ (על-פי משוואת הישר): $k = 41.5 \text{ N/m}$

ה. אורך פעיל: $l = 9 \text{ cm}$. תוצאות המדידות רשומות בטבלה 5.

התארכות Δl (cm)	0	5.7	11.7	17.5	23.3	29.2
תוספת כוח ΔF (N)	0	3	6	9	12	15

טבלה 5: תוצאות של מדידות



תרשים 7: הכוח כפונקציה של ההתארכות; אורך פעיל: $l = 9 \text{ cm}$

משוואת הישר: $\Delta F = 51.3 \cdot \Delta l + 0.025$ (SI) ביחידות $F \Delta l$.

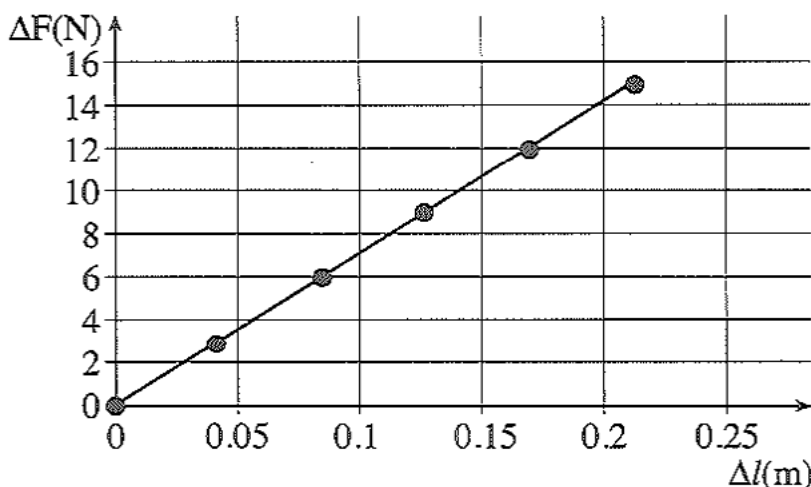
ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 1$.

קבוע הקפיץ (על-פי משוואת הישר): $k = 51.3 \text{ N/m}$.

ז. אורך פעיל: $l = 6.6 \text{ cm}$ תוצאות המדידות רשומות בטבלה 6.

התארכות - Δl (cm)	0	4.2	8.5	12.6	16.9	21.3
תוספת כוח - ΔF (N)	0	3	6	9	12	15

טבלה 6: תוצאות של מדידות



תרשים 8: הכוח כפונקציה של ההתארכות; אורך פעיל $l = 6.6 \text{ cm}$.

משוואת הישר: $\Delta F = 70.6 \cdot \Delta l + 0.028$ (SI) ביחידות $F \Delta l$.

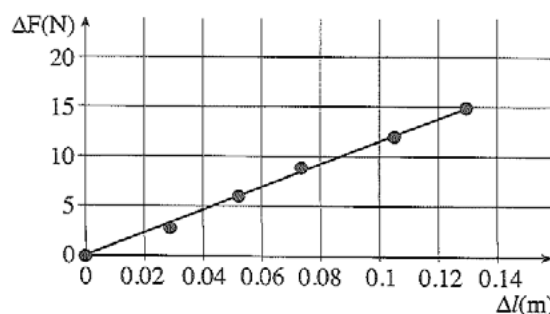
ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9999$.

קבוע הקפיץ (על-פי משוואת הישר): $k = 70.6 \text{ N/m}$.

ז. אורך פעיל: $l = 4 \text{ cm}$ תוצאות המדידות רשומות בטבלה 7.

התארכות - Δl (cm)	0	2.9	5.2	7.4	10.5	13
תוספת כוח - ΔF (N)	0	3	6	9	12	15

טבלה 7: תוצאות של מדידות



תרשים 9: הכוח כפונקציה של ההתארכות; אורך פעיל $l = 4 \text{ cm}$

משוואת הישר: $\Delta F = 116.4 \cdot \Delta l - 0.067$ (SI). ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9979$.

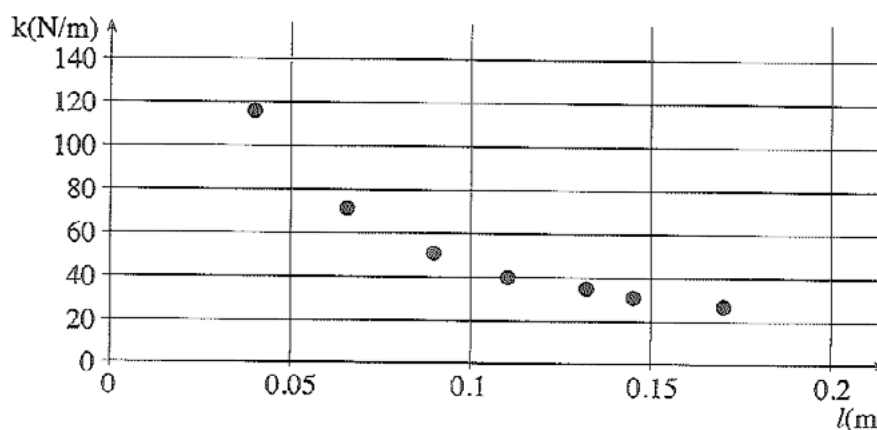
קבוע הקפיץ (על-פי משוואת הישר): $k = 116.4 \text{ N/m}$.

10. בטבלה 8 רשומים האורכים הפעילים של הקפיץ, וקבועי הכוח שלהם.

אורך פעיל - l (m)	0.17	0.145	0.132	0.11	0.09	0.066	0.04
קבוע כוח - k (N/m)	27.7	31.7	35.9	41.5	51.3	70.6	116.4

טבלה 8

בתרשים 10 מתוארת דיאגרמת פיזור של קבוע הכוח של ה"חלק הפעיל" של הקפיץ, כפונקציה של אורכו הרפוי.



תרשים 10: קבוע הכוח כפונקציה של אורך החלק הפעיל

משוואת הישר:

$$(3) \ln k = -0.997 \cdot \ln l + 1.544$$

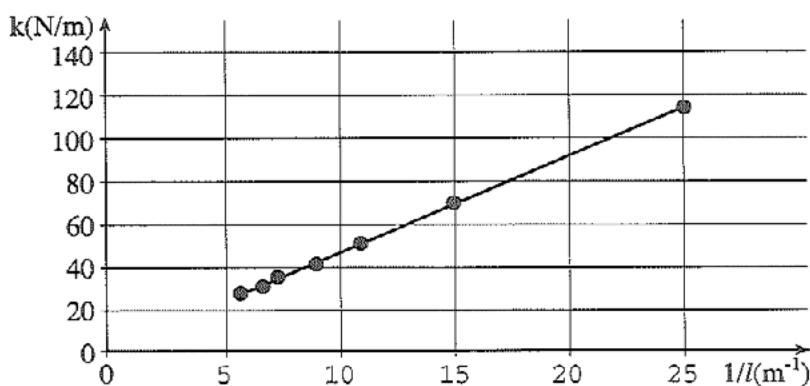
ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9993$

ממשוואה (3) אפשר להגיע למשוואה (1), וממנה לקשר (2).

דרך ג: "ניחוש" ערכו של מעריך החזקה b על סמך תוצאות המדידות
 כאשר מתבוננים בערכים הרשומים בטבלה 8, ניתן להוכיח כי מכפלת l ב-
 k היא בקירוב טוב קבועה: $k \cdot l = \text{Const.}$ לכן $k = \text{Const.} \cdot 1/l$
 . יש מקום, אם כן, לבחון את תלות k ב- $1/l$. בטבלה 10 רשומים ערכי k
 וערכי $1/l$.

N/m) k)	27.7	31.7	35.9	41.5	51.3	70.6	116.4
m ⁻¹) 1/l)	5.88	6.90	7.58	9.09	11.11	15.15	25

טבלה 10

בתרשים 13 מופיע הגרף המתאר את ערכי k כפונקציה של ערכי $1/l$.

תרשים 13

משוואת הישר

$$(4) k = 4.66 \cdot \frac{1}{l} - 0.099$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9997$

מקשר (4) ניתן להגיע לקשר (1), וממנו לקשר (2).

12. א. מצאנו כי קבוע הכוח של הקפיץ שברשותינו שווה ל N/m 27.7 (ראה משוואה המתאימה לישר שבתרשים 3). על-פי קשר 2, קבוע הכוח של קפיץ זהה לקפיץ שברשותינו, אשר אורכו כפול, היה קטן פי שניים מקבוע הקפיץ שברשותינו, כלומר הוא היה שווה ל- N/m 13.85.
- ב. החישוב בסעיף 12 מבוסס על כך שקשר (2) שמצאנו באופן אמפירי תקף גם לאורכי קפיצים מעבר לתחום האורכים שחקרנו (אקסטרפולציה).

חקר 6

תלות הקבוע של קפיץ בעוביו



שאלת חקר

האם קבוע הכוח של קפיץ תלוי בעובי הקפיץ?
אם כן – מה הקשר בין קבוע הכוח לבין העובי?

העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקולך.

תכנון מערך ניסוי

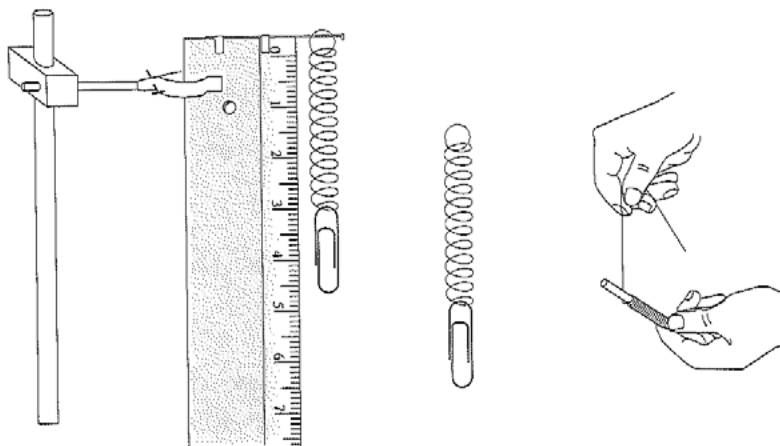
1. תכנן מערך ניסוי, שעל-פי ממצאיו ניתן לענות על שאלת החקר. ציין איזה משתנה תלוי ואיזה משתנה הוא בלתי תלוי.

רשימת בלי המחקר

- (1) 5 תיילי נחושת לא מקופלים. כל התיילים בעלי אותו קוטר, שערכו בין 0.3 מ"מ לבין 0.5 מ"מ, ואורכו של כל אחד מן התיילים הוא 1 מ'. [תיל מתאים הוא למשל התיל המיועד לבניית סליל למנוע מתפרק, ציוד רחובות מס' קטלוגי 0252].
- (2) 4 מבחנות או מקלוני זכוכית עגולים באורך של 8 ס"מ לפחות, שקוטריהם החיצוניים 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 ס"מ (או ערכים קרובים לאלה). (אם משתמשים בצינורות זכוכית יש להחליק את קצותיהם בשלהבת או בדרך אחרת, למניעת פציעה).
- (3) כן (סטטיב) עם שני אוחדים.
- (4) סרגל באורך של 30 ס"מ לפחות המכיל במילימטרים.
- (5) מסמר באורך 5 ס"מ לפחות.
- (6) 10 מהדקי נייר קטנים.
- (7) סרט הדבקה.
- (8) גיליון אלקטרוני.

בניית המערכת הניסויית

כרוך 100 ס"מ של תיל נחושת על מקלון זכוכית שקוטרו 0.6 ס"מ (תרשים 1). הדק וצופף את הכריכות במידת האפשר, ולאחר-מכן הורד אותן בהחלקה זהירה מעל מקלון הזכוכית. הסליל שיצרת הוא קפיץ, שאת קבוע הכוח שלו עליך למדוד.



תרשים 3

תרשים 2

תרשים 1

ב. כופף את הכריכה הראשונה ואת הכריכה האחרונה של הקפיץ כך שתיווצרנה שתי לולאות המאונכות לשאר כריכות הקפיץ - האחת לתליית הקפיץ בקצהו העליון והאחרת לתליית משקולות (מהדקי נייר) בקצהו התחתון (תרשים 2).

ג. הדק באמצעות סרט הדבקה את המסמר לקצה הסרגל (תרשים 3).
ד. הצג את הסרגל בצורה אנכית בעזרת סטיב ושני אוזנים, ותלה את הקפיץ מן המסמר (תרשים 3).

ביצוע הניסוי

2. מדוד ורשום את אורכו של הקפיץ כשהוא תלוי על הסרגל.
3. תלה בקצהו התחתון של הקפיץ מהדק נייר ומדוד את התארכות הקפיץ. חזור על פעולה זאת כשבקצה הקפיץ תלויים 2, 3, 4 ו-5 מהדקי נייר. ערוך טבלה ורשום בה את התארכות הקפיץ כפונקציה של מספר מהדקי הנייר התלויים בקצהו.

4. חזור ובנה בשיטה דומה שלושה קפיצים סליליים נוספים, כשהאורך של תיל הנחושת המשמש לבניית כל קפיץ הוא 100 ס"מ, אולם קוטר הכריכות של הקפיצים שונה, בהתאם לקוטר השונה של כל אחד משלושת מקלוני הזכוכית הנוספים או המבחנות שקיבלת. ערוך ניסוי, לגבי כל אחד משלושת הקפיצים הנוספים שבנית, של מדידת התארכות הקפיץ כפונקציה של מספר מהדקי הנייר התלויים בקצהו. רשום את תוצאות המדידות בטבלאות מתאימות.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

5. סרטט גרפים של התארכות כל קפיץ כפונקציה של מספר מהדקי הנייר התלויים בקצהו (מוצע לסרטט את כל ארבעת הגרפים באותה מערכת צירים).
6. מצא את המשוואה של כל אחד מארבעת הגרפים, ואת הריבועים של מקדמי המיתאם.
7. מהי המסקנה שניתן להסיק מכל אחד מארבעת הגרפים שסירטטת?
8. א. חשב את קבוע הכוח, k , של כל קפיץ.
ב. מהי המשמעות של הערך המספרי של קבוע הכוח המתאים לקפיץ שקוטרו 0.6 ס"מ?
9. סרטט דיאגרמת פיזור של קבועי הכוח k כפונקציה של קטרי הקפיצים.
d.
10. א. סרטט עקומה מתאימה לדיאגרמת הפיזור, ומצא את משוואת העקומה. ב. רשום מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין k ל-d.

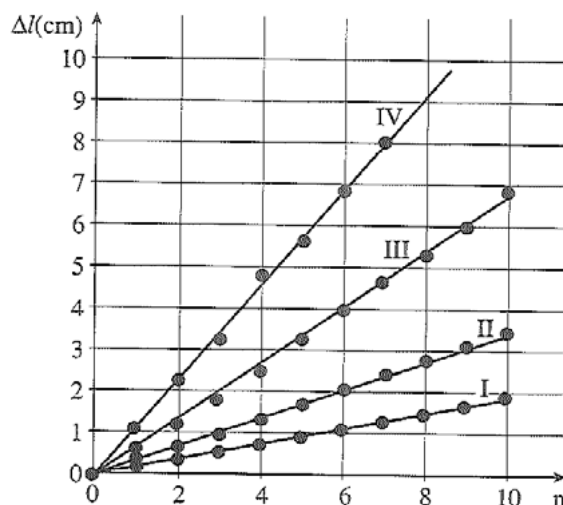
תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. לוקחים קפיצים בעלי קוטר d שונה, ומודדים את קבוע הכוח k של כל קפיץ. d הוא המשתנה הבלתי תלוי, k -1 המשתנה התלוי.
פרט לעובי הקפיץ, הקפיצים צריכים להיות שווים בתכונות התיל שממנו הם עשויים: סוג החומר של התיל, קוטר ואורכו.
2-4. תוצאות של מדידות רשומות בטבלה 1.

מספר משקולות	התארכות קפיץ I שקוטרו 0.6 ס"מ	התארכות קפיץ II שקוטרו 0.8 ס"מ	התארכות קפיץ III שקוטרו 1.1 ס"מ	התארכות קפיץ IV שקוטרו 1.5 ס"מ
0	0	0	0	0
1	0.2	0.3	0.6	1
2	0.35	0.6	1.2	2.1
3	0.55	0.9	1.7	3.3
4	0.75	1.25	2.4	4.8
5	0.9	1.6	3.2	5.6
6	1.1	1.96	3.9	6.8
7	1.3	2.35	4.6	8
8	1.5	2.7	5.2	
9	1.7	3.05	5.9	
10	1.9	3.35	6.8	

טבלה 1: תוצאות מדידות

5. עבור כל קפיץ מתוארת בתרשים 4 ההתארכות כפונקציה של מספר מהדקי הנייר n התלויים בקצהו.



6. משוואת ישר I (עבור קוטר 0.6 cm): $\Delta l = 0.1891 \cdot F - 0.0136$
 ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9992$

משוואת ישר II (עבור קוטר 0.8 cm): $\Delta l = 0.3423 \cdot F - 0.0705$
 ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9986$

משוואת ישר III (עבור קוטר 1.1 cm): $\Delta l = 0.6773 \cdot F - 0.1591$
 ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9975$

משוואת ישר IV (עבור קוטר 1.5 cm): $\Delta l = 1.1548 \cdot F - 0.0917$
 ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9980$

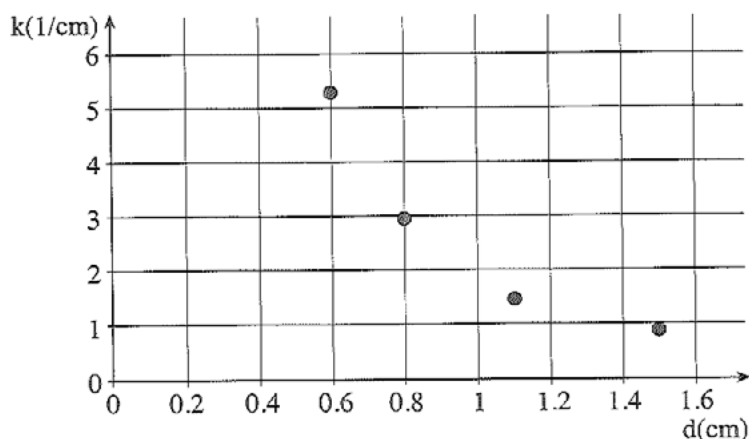
7. ארבעת הגרפים מצביעים על כך שבתחום שבו נערכו המדידות – הקפיצים הם לינאריים, כלומר התארכות כל אחד מהקפיצים נמצאת ביחס ישר לכוח המופעל עליו.

8. א. קבוע הכוח של כל קפיץ שווה להופכי של שיפוע הגרף המתאים.
 נרשום את קטרי הקפיצים ואת קבועי הכוח שלהם בטבלה 2.

קבוע הכוח של הקפיץ - k (cm^{-1})	קוטר הקפיץ - d (cm)
1/0.1891 5.29	0.6
2.92 1/0.3423	0.8
1/0.6773 1.48	1.1
1/1.1548 0.87	1.5

טבלה 2: קבועי הכוח של הקפיצים השונים

- ב. קבוע הקפיץ של הקפיץ שקוטרו 0.6 ס"מ הוא 5.29 מהדקים \ ס"מ. משמעות המספר: דרוש להפעיל על הקפיץ כוח השווה למשקל של 5.29 מהדקים, כדי שהקפיץ יתארך ב-1 ס"מ.
9. בתרשים 5 מתוארת דיאגרמת פיזור של קבועי הכוח כפונקציה של קטרי הקפיצים.

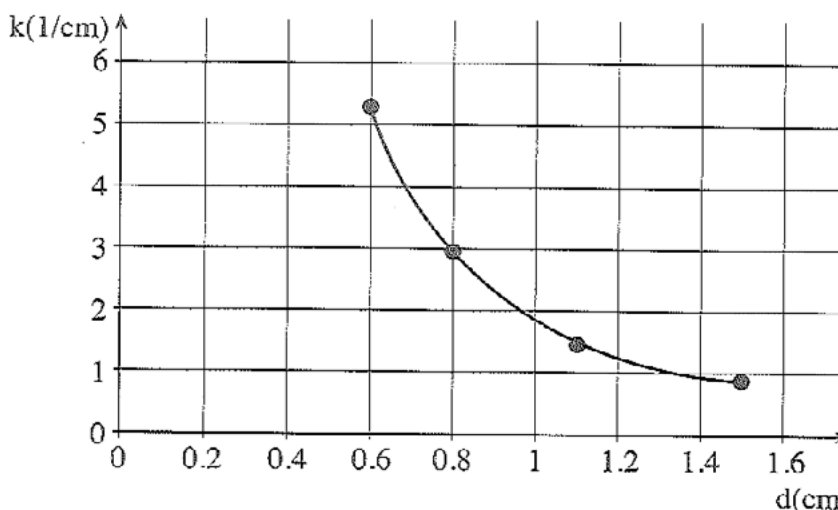


תרשים 5: דיאגרמת פיזור של קבועי הכוח של הקפיצים כפונקציה של קטרי הקפיצים

10. א. נעלה השערה שהפונקציה המתאימה לדיאגרמת הפיזור היא פונקציית חזקה שצורתה $k = ad^b$ (כאשר b שלילי). נבחן השערה זו, ואם נמצא אותה מתאימה - נחשב את b . נציע שתי דרכים לבחינת ההשערה, ולחישוב b .

דרך א: התאמה עקומת חזקה לדיאגרמת הפיזור

בעזרת הגיליון האלקטרוני נסרטט את עקומת החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור. העקומה מתוארת בתרשים 6.



תרשים 6: עקומת החזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור שבתרשים 5

משוואת העקומה (התקבלה בעזרת גיליון אלקטרוני):
 (1) $k = \frac{1.88}{d^{1.99}}$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9979$

ב. מסקנה: לגבי קפיצים שבנויים מתיילים שווי-אורך - קבוע הקפיץ נמצא ביחס הפוך לריבוע קוטר הקפיץ.

בלשון מתמטית

(2) $k \propto \frac{1}{d^2}$

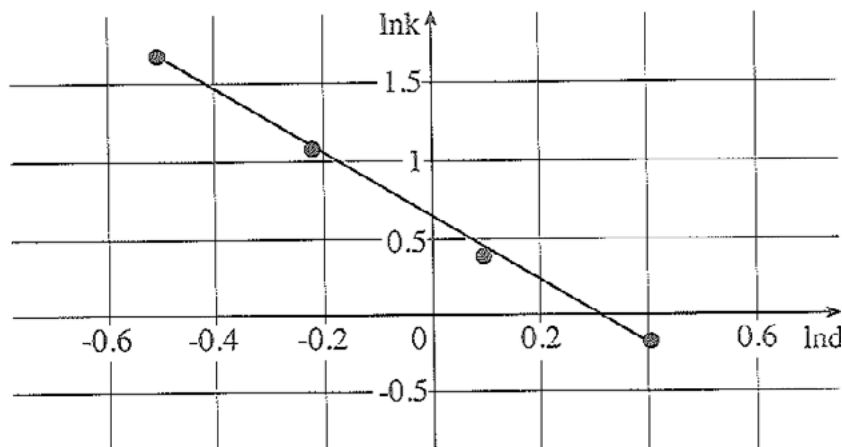
דרך ב: חקירת הקשר בין ערכי $\ln k$ וערכי $\ln d$

בטבלה 3 רשומים ערכים של $\ln k$ ושל $\ln d$.

$\ln d$	-0.511	-0.223	0.095	0.405
$\ln k$	1.666	1.073	0.390	-0.144

טבלה 3: ערכי ה- $\ln$ של תוצאות המדידות

בעזרת הגיליון האלקטרוני סרטטנו גרף של $\ln k$ כפונקציה של $\ln d$ התקבל הגרף המתואר בתרשים 7.



תרשים 7: גרף של $\ln k$ כפונקציה של $\ln d$

משוואת הישר (התקבלה בעזרת גיליון אלקטרוני):

$$(3) \ln k = -1.992 \cdot \ln d + 0.630$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9979$

ממשוואה (3) אפשר להגיע למשוואה (1) לעיל, ולמסקנה שקבוע הקפיץ נמצא ביחס הפוך לריבוע קוטר הקפיץ.

ניתן לנסח את קשר (2) בצורה שונה מעט: כידוע, ריבוע קוטר של עיגול פרופורציוני לשטח העיגול –

$$(4) d^2 \propto A$$

$$\left(A = \pi r^2 \rightarrow A = \frac{\pi d^2}{4} \rightarrow d^2 \propto A \rightarrow d^2 = \frac{4A}{\pi} \right) \text{ (הסבר:)}$$

מקשרים (2) ו-(4) נקבל:

$$(5) k \propto \frac{1}{A}$$

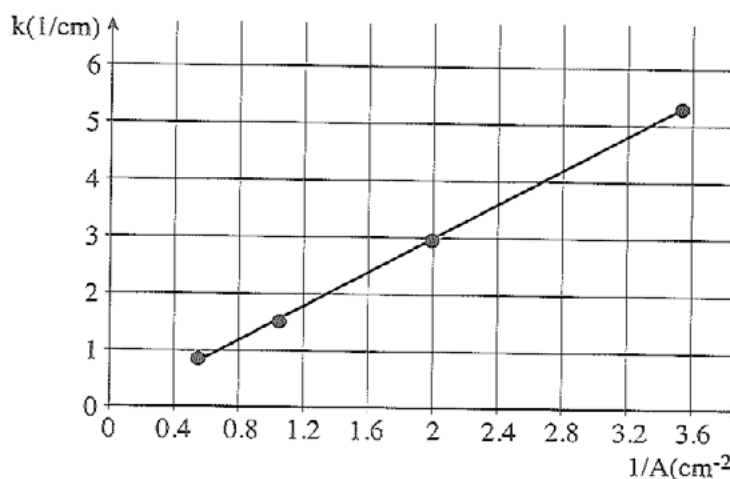
במילים: כאשר בונים מתיילים שווי אורך קפיצים שוני שטח חתך, קבוע הקפיץ נמצא ביחס הפוך לשטח החתך של הקפיץ.

נוכל לבחון את קשר (5) ישירות, בעזרת הגיליון האלקטרוני: נבנה טבלה שבה הערכים ההופכיים של שטחי החתך של הקפיצים, וקבועי הכוח (טבלה 4).

קבוע הקפיץ - k (N/cm)	ערכים ההופכיים של שטחי חתך הקפיצים $1/A$ (cm^{-2})
0.87	0.566
1.48	1.053
2.92	1.990
5.29	3.539

טבלה 4

נסרטט גרף של קבוע הכוח k כפונקציה של הערך ההופכי של שטח החתך (תרשים 8).



תרשים 8: קבועי הכוח של הקפיצים כפונקציה של הערכים ההופכיים של שטחי החתך של הקפיצים.

התקבל קו ישר שמשוואתו

$$k = \frac{1.5}{A} - 0.045 \quad (6)$$

(ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9993$)

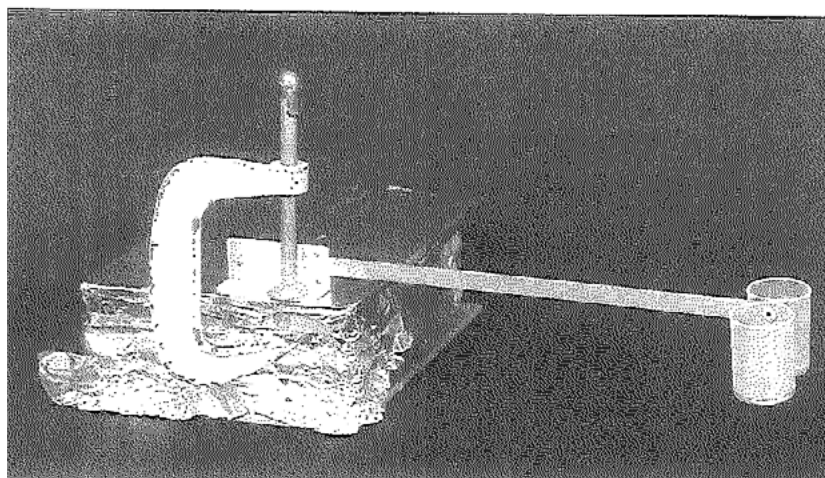
קשר (6) מראה ישירות את הרשום בנוסחה (5).

חקר 7

תנודות אופקיות של גוף
המחובר לקצה פס פלדה

שאלת חקר

גוף המחובר לקצה פס פלדה מתנודד (הקצר האחר של פס הפלדה קבוע במקומו).



מה הקשר בין זמן המחזור של התנודות לבין מסת הגוף?

העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר ציין את שיקולך.

תכנון מערך ניסוי

1. תכנן מערך ניסוי שעל-פי ממצאי ניתן יהיה לענות על שאלת החקר. ציין איזה משתנה הוא בלתי תלוי, איזה משתנה הוא תלוי, ואילו פרמטרים ישארו קבועים.

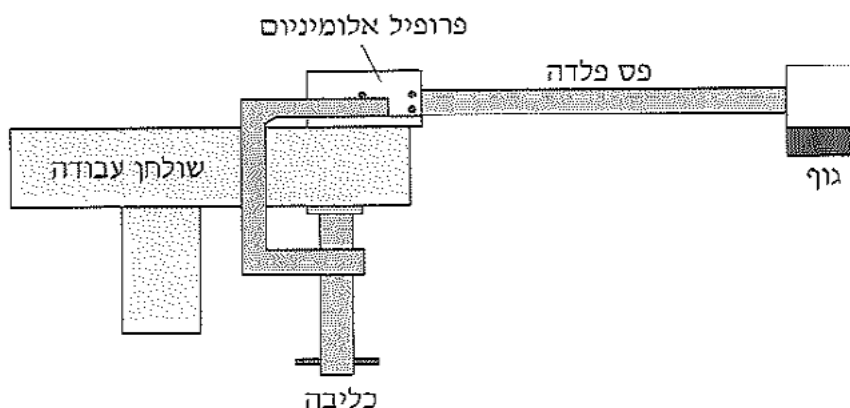
רשימת בלי המחקר

- (1) פס פלדה שלקצו האחד מחובר פרופיל אלומיניום, ולקצו האחר מחובר גוף. ה"גוף" הוא 2 קופסאות לאיחסון סרטי צילום, ובכל קופסה נמצאת דיסקית המודבקת לתחתית הקופסה.
- (2) 18 דיסקיות זהות המשמשות משקולות. הקוטר של כל דיסקית צריך להיות קטן מעט מן הקוטר הפנימי של הקופסה המוזכרת ב-(1) לעיל, כדי שניתן יהיה להכניס את הדיסקיות לקופסה;
- (3) מאזניים (שבאמצעותם ניתן למדוד את מסתה של דיסקית אחת).
- (4) כליבה;
- (5) שעון עצר (סטופר);
- (6) סרגל;
- (7) גיליון אלקטרוני או נייר מילימטרי.

הנחיות לבניית מערכת פס הפלדה: פס הפלדה הוא משורית, ששיניה שויפו (למניעת פציעה). לקצה מחובר פרופיל אלומיניום, המאפשר חיבור המערכת לשולחן באמצעות כליבה.

הרכבת מערכת הניסוי

הדק, באמצעות כליבה, את פרופיל האלומיניום (המחובר לפס הפלדה) לקצה שולחן, כמתואר בתרשים 1.



ביצוע הניסוי

התייחס אל הדיסקיות המודבקות לקופסאות כאל חלק מן הגוף.
2. הכנס דיסקית אחת לכל קופסה. הסט את פס הפלדה ממצב שיווי-משקל ושחרר אותו.

כדי לדעת מהו זמן המחזור של תנודה אחת, מדוד את משך הזמן של מספר תנודות. רשום את מספר התנודות, n , ואת משך הזמן בטבלה כדוגמת טבלה 1.

3. הסבר מדוע רצוי למדוד את הזמן של מספר תנודות ולא של תנודה אחת.

4. הכנס לכל קופסה אותו מספר דיסקיות (לפי בחירתך) ובצע שוב את המדידה המתוארת בסעיף 2. רשום את תוצאת המדידה בטבלה.

מספר הדיסקיות שהכנסת לשתי הקופסאות - N	מספר התנודות - n	משך הזמן t של n התנודות ביחידות.....	זמן המחזור - T ביחידות.....	ריבוע זמן המחזור - T^2 ביחידות.....
2				

טבלה 1

5. בצע שוב את המדידה המתוארת בסעיף 4 כמה פעמים; בכל פעם - עבור מספר שונה של דיסקיות. רשום את תוצאות המדידות בטבלה.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

6. הקלד את תוצאות המדידות לגיליון אלקטרוני. השלם בגיליון את זמן המחזור (T), את ריבוע זמן המחזור (T^2) ואת היחידות במקומות המתאימים.
7. סרטט גרף המתאר את ריבוע זמן המחזור, T^2 , כפונקציה של מספר הדיסקיות, N , שהכנסת לקופסאות (N אינו כולל את שתי הדיסקיות המודבקות בתחתית הקופסאות).

8. מצא את משוואת הקו, ואת ריבוע מקדם המיתאם.

9. א. מהם שיעורי הנקודה, שבה הגרף חותך את הציר האנכי?

ב. מהי המשמעות הפיזיקלית של שיעורי הנקודה הזאת? הסבר.

10. איזו מדידה עליך לערוך, כדי לאמת את המסקנה הנובעת מהתשובה לסעיף 9ב? בצע את המדידה, רשום את תוצאותיה והשווה לתשובתך לסעיף 9ב.

11. א. מהם שיעורי הנקודה, שבה הגרף חותך את הציר האופקי? ב. מהי המשמעות הפיזיקלית של שיעורי הנקודה הזאת? הסבר.

12. נסח מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין זמן המחזור של התנודות לבין המסה המתנודדת.

שאלות

13. א. מדוד את מסתה של דיסקית אחת. תאר את המדידה.
ב. בהנחה שתנועת פס הפלדה עם הדיסקיות היא הרמונית פשוטה, חשב את הקבוע של הכוח המחזיר, c , של תנועה הרמונית זו.

14. רוקן את הקופסאות מהדיסקיות שהוספת, הכנס דיסקית אחת בלבד לכל קופסה. הסט את פס הפלדה ממצב שיווי-משקל ושחרר אותו, פעם במשרעת קטנה מאוד, ופעם במשרעת גדולה. שים לב, כי באחד המצבים הדיסקית אינה נעה יחסית לקופסה, ובמצב האחר היא נעה ומקישה על דפנות הקופסה. הסבר מדוע.

15. א. הסבר, כיצד ניתן למדוד בעזרת מערכת הניסוי את מסתו של גוף? ב. האם מדידת מסת הגוף במערכת זו נסמכת על פעולת כוח הכובד?

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. משנים פעמים אחדות את המסה m המתנודדת. עבור כל מסה מרדדים את זמן המחזור T של התנודות. לאחר מכן מחפשים קשר מתמטי בין T ו- m . המסה m היא המשתנה הבלתי תלוי, זמן המחזור T הוא המשתנה התלוי. פרמטרים שנשארים קבועים במהלך הניסוי הם נתוני פס הפלדה (החומר, הממדים).

2. תוצאות המדידות רשומות בשורה הראשונה של טבלה 2.

3. מדידת הזמן כרוכה באי-ודאות (שגיאה) מסוימת Δt . נעיר כי אי-ודאות זו נובעת משתי סיבות:

א. זמן התגובה של המודד, וגודלה היא מסדר גודל של עשיריות השנייה (למשל 0.5 שנייה).

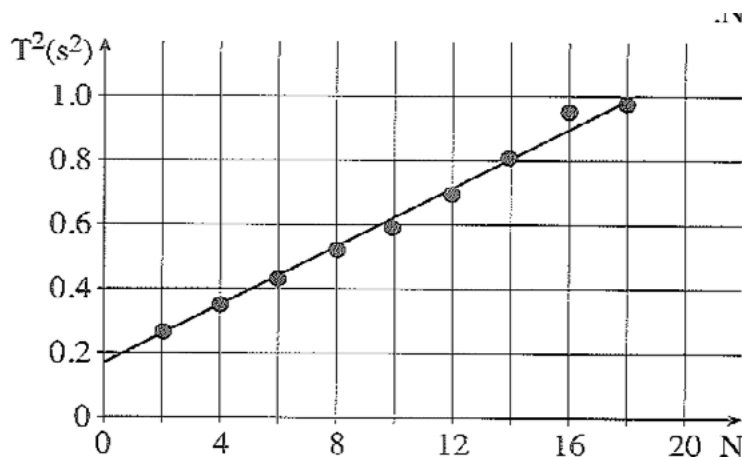
ב. כושר ההפרדה של השעון (מרווח בין שתי שנתות סמוכות). בשעון ספרתי בעל כושר הפרדה של 0.01 שנייה, אי-הוודאות הנובעת מכושר ההפרדה הלא זניחה ביחס לאי-הוודאות הנובעת מזמן התגובה. אי-הוודאות Δt במדידת הזמן אינה תלויה במשך זמן המדידה, והיא מכונה אי-ודאות מוחלטת. אם מודדים זמן T של מחזור אחד - אי-הוודאות Δt מהווה אחוז גבוה מ- T . במילים אחרות, אי-הוודאות היחסית $\Delta t/T$ היא גדולה. לעומת זאת אם מודדים את הזמן של n מחזורים, אי-הוודאות המוחלטת Δt מהווה אחוז קטן מ- nT , כלומר אי-הוודאות יחסית $\Delta t/nT$ היא קטנה יותר.

4-6. תוצאות מדידות רשומות בשתי העמודות הימניות של טבלה 2.

טבלה 2: תוצאות של מדידות וחישובים

בטרשים 2 מתואר הגרף של ריבוע זמן המחזור T^2 כפונקציה של מספר הדיסקיות N .

T^2 (s ²)	זמן מחזור T (s)	זמן של 10 תנודות - t (s)	N
0.27	0.52	5.20	2
0.35	0.59	5.91	4
0.43	0.66	6.55	6
0.52	0.72	7.21	8
0.58	0.76	7.60	10
0.69	0.83	8.33	12
0.80	0.90	8.97	14
0.94	0.97	9.68	16
0.96	0.98	9.82	18



תרשים 2: ריבוע זמן מחזור התנודות בפונקציה של מספר המשקולות

8. משוואת הישר:

$$(1) \quad T^2 = 0.0455N + 0.1609$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9907$

9. א. על-פי משוואת הישר, מצאנו כי הישר חותך את הציר האנכי ב-
 $N = 0$ וב- $T^2 = 0.16 \text{ s}^2$.

ב. המשמעות הפיזיקלית של נקודה זו: כאשר המערכת מתנודדת ללא תוספת משקולות, הריבוע של זמן המחזור של התנודות הוא $T^2 = 0.16 \text{ s}^2$.
 10. כדי לאמת את המסקנה הנובעת מהתשובה לסעיף 9 יש למדוד את זמן המחזור של המערכת, במצב שבו היא אינה טעונה במשקולות נוספות. תוצאות של מדידה רשומות בטבלה 3.

T^2 (s ²)	$10T$ (S)	N
0.2	4.45	0

טבלה 3

התוצאה שהתקבלה כאן גדולה מזו שבסעיף 9. ההבדל בין שתי התוצאות עשוי לנבוע מאי-דיוק במדידות.

11. על פי משוואת הישר (משוואה (1) לעיל) הישר חותך את הציר האופקי בנקודה ששיעוריה $T^2 = 0 - 3.5 - N$. המשמעות הפיזיקלית של נקודה זו: ערכה המוחלט מבטא את המסה המתנודדת כאשר אין תוספת של משקולות בקופסאות, כלומר מסת הקופסאות, מסות המשקולות המודבקות, וחלק ממסת פס הפלדה המתנודד.
12. מסקנה אמפירית:

ריבוע זמן המחזור של התנודות פרופורציוני למסה המתנודדת (הכוללת)

13. א. מדדנו את מסתן של 10 דיסקיות - תוצאת המדידה היתה 95 גרם. מכאן שהמסה של דיסקית אחת היא 9.5 גרם.
- ב. בהנחה שהתנודות הן הרמוניות, זמן המחזור שלהן מקיים:

$$(2) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}$$

המסה המתנודדת m היא סכום של:

- המסה הקבועה (הקופסאות, המשקולות המודבקות בתחתית הקופסאות, וחלק הפס המתנודד) - נסמן מסה זו ב- m' .
- ושל מסת המשקולות שמוסיפים לקופסאות; נסמן אותה ב- m . במונחים אלה, נרשום את נוסחה (2) באופן הבא:

$$(3) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m_0 + m^1}{c}}$$

נעלה בריבוע את משוואה (3) ונקבל:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{c} m' + \frac{4\pi^2}{c} m_0$$

נציב:

$$m' = 0.0095 \cdot N$$

ונקבל:

$$(4) \quad T_2 = \frac{4\pi^2 \cdot 0.0095}{c} N + \frac{4\pi^2}{c} m_0$$

נשווה בין המקדם של N במשוואה (4) עם המקדם של N במשוואה (1):

$$\frac{4\pi^2 \cdot 0.0095}{c} = 0.0455$$

פתרון המשוואה:

$$c \approx 8.2 \text{ N/m}$$

14. מהניסוי מתברר כי כאשר הקופסה מתנוודדת במשרעת קטנה - הדיסקית אינה נעה יחסית לקופסה. לעומת זאת כאשר היא מתנוודדת במשרעת גדולה - שומעים נקישות של הדיסקית על דפנות הקופסה, דבר המעיד על-כך שהיא נעה יחסית לקופסה.

הסבר: גודל התאוצה של הקופסה נמצא ביחס ישר למרחקה מנקודת שיווי המשקל. הכוח המאלץ את הדיסקית הוא כוח החיכוך הסטטי שמפעילה עליה תחתית הקופסה. כאשר התאוצות קטנות - כוח החיכוך הסטטי "מתאים את עצמו", ומקנה לדיסקית תאוצה השווה לתאוצת הקופסה. אולם, לגודלו של כוח החיכוך הסטטי יש ערך מרבי, כלומר הוא יכול להעניק למשקולת תאוצה עד גודל מסוים, ולא מעבר לו. כאשר הקופסה מתנוודדת במשרעת גדולה, תאוצתה בקירבת שתי נקודות הקצה של מסלולה הלא גדולה, וכוח החיכוך הסטטי אינו יכול להעניק לדיסקית תאוצה השווה לזו של הקופסה, לכן הדיסקית נעה ביחס לקופסה.

15. א. בניסוי מצאנו קשר בין זמן המחזור לבין המסה המתנוודדת (המסה המתנוודדת ידועה על-פי המסה של משקולת בודדת). כאשר נרצה לקבוע את מסתו של גוף נקשור אותו לקצה פס הפלדה ונגרום לו להתנוודד. על פי זמן המחזור שנמדוד, ובעזרת הקשר שמצאנו בניסוי בין המסה המתנוודדת לבין זמן המחזור, נוכל לחשב את מסת הגוף.

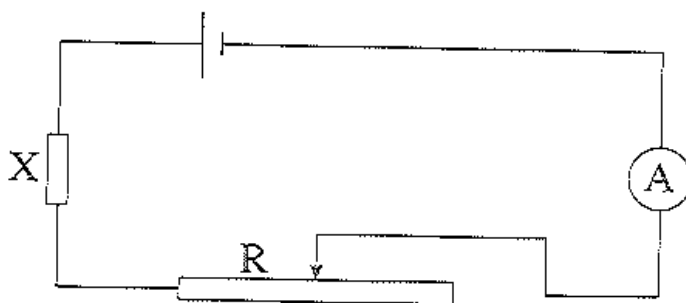
ב. לא. מדידת המסה יכולה להעשות גם בחלל, הרחק מכוכבים, במקום שבו כוח הכבידה קטן וניתן להזנחה. המסה הנמדדת בניסוי זה היא **מסה אינרציאלית**.

חקר 8

מציאת התנגדות בעזרת
תיל אחיד שהתנגדותו ידועה

שאלת חקר

משנים את התנגדות הנגד המשתנה במעגל החשמלי שלפניך, שבו ניתן לקרוא את התנגדות הנגד המשתנה R .



א. מה הקשר בין הזרם I הנמדד באמפרמטר לבין התנגדות הנגד המשתנה R ?

ב. כיצד ניתן לקבוע את התנגדות הנגד X באמצעות הרכיבים המתוארים במעגל החשמלי?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

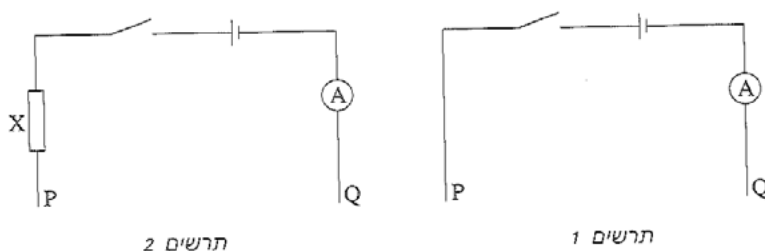
1. תכנן ניסוי שבאמצעותו ניתן לענות על שאלות החקר. ציין איזה משתנה הוא בלתי תלוי, ואיזה משתנה הוא תלוי.

רשימת בלי המחקר

- (1) סוללה של 1.5 וולט בתוך בית סוללות;
- (2) אמפרמטר לזרם ישר, בעל תחום מדידה של כ- $\text{mA}200$;
- (3) תיל מוליך ללא ציפוי מבודד שאורכו כ- 110 ס"מ, ושהתנגדותו ליחידת אורך ידועה [למשל תיל ניכרום שהתנגדותו כ- 30 אום למטר]. תיל זה יסומן ב-B.
- (4) נגד שהתנגדותו אינה ידועה (מסדר גודל של 5 אום); נגד זה יסומן ב-X.
- (5) 5 תיילי הולכה;
- (6) מפסק (לא הכרחי);
- (7) 2 מצבטי תנין;
- (8) סרגל שאורכו 100 ס"מ;
- (9) סרט הדבקה;
- (10) גיליון אלקטרוני או נייר מילימטרי.

בניית המערכת הניסויית

בנה את חלק המעגל החשמלי המתואר בתרשים 1.



ביצוע הניסוי

2. בין הנקודות P ו-Q חבר אורכים שונים של המוליך B, ורשום את אורך המוליך ואת הזרם בכל מדידה. בצע מדידות אלה לפחות עם ארבעה אורכים שונים.

שים לב, בכל מדידה סגור את המעגל לזמן קצר בלבד - זמן שיאפשר לך לקרוא בבירור את הוראת האמפרמטר.

- הכן טבלה הכוללת את המשתנים:
- 1- אורך קטע המוליך B שדרכו עובר הזרם;
 - I - עוצמת הזרם במעגל;
 - R - ההתנגדות של קטע המוליך B שדרכו עובר הזרם;
 - I/I - הערך ההופכי של עוצמת הזרם.
- רשום את תוצאות המדידות בשתי העמודות הראשונות של הטבלה.
3. הוסף למעגל את הנגד X (ראה תרשים 2).
4. חזור על המדידות המתוארות בסעיף 2 לעיל, ורשום את תוצאות המדידות בטבלה שנייה (הדומה לטבלה המתוארת בסעיף 1 לעיל), או הוסף עמודות מתאימות לטבלה הראשונה, ורשום בהן את תוצאות המדידות.

ניתוח ממצאי ניסוי ומסקנות אמפיריות

- 5. חשב את ערכי ההתנגדויות, R, של התיל B שאורכיהם מופיעים בטבלה, ואת ערכי I/I, ורשום את תוצאות החישובים בעמודות המתאימות בטבלה.
- 6. סרטט, במערכת צירים אחת, עקומה של I/I כפונקציה של R, המתאימה למעגל החשמלי ללא הנגד X (סמן אותה ב- א), ועקומה של I/I כפונקציה של R, המתאימה למעגל החשמלי עם הנגד X (סמן אותה ב- ב).
- 7. א. מצא את משוואות שני הקווים שסרטטת בסעיף (6) לעיל, ואת ריבוע מקדמי המיתאם.
- ב. נסח מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין I ל- R .
- 8. השוואת המסקנות האמפיריות לתיאוריה.
- 9. פתח נוסחה של I/I כפונקציה של R.
- 10. הסבר, בעזרת הנוסחה שפתחת בסעיף (8) לעיל, מדוע התקבלו קווים ישרים.
- 11. איזה גודל פיזיקלי מיוצג על-ידי שיפועי הגרפים?
- 12. איזה גודל פיזיקלי מיוצג על-ידי השיעור של כל אחת מנקודות החיתוך של הגרפים עם הציר האופקי?
- 13. איזה גודל גאומטרי בגרפים מייצג את התנגדות הנגד X? חשב את X.

שאלה

13. הוראה המופיעה בסעיף 2 לעיל אומרת שעליך לסגור את המעגל "לזמן קצר בלבד". רשום סיבות להוראה זו.

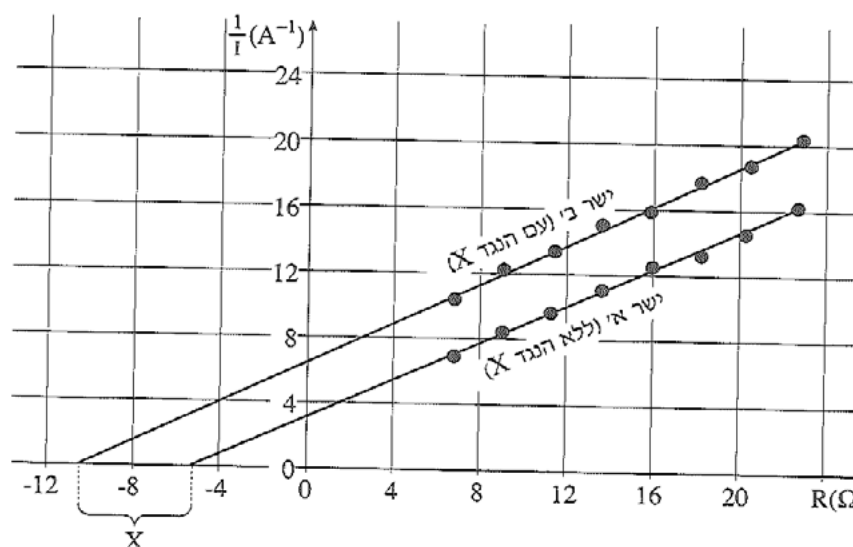
תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. משנים פעמים אחדות את התנגדות הנגד המשתנה. מודדים בכל פעם את R ואת I , ומנסחים קשר מתמטי בניהם.
- בניסוי שתוצאותיו מפורטות להלן, השתמשנו בתיל ניכרום שקוטרו 0.25 mm. ההתנגדות ליחידת אורך של תיל B היתה 22.7 אום למטר. המדידות נערכו בעזרת אמפרמטר דיגיטלי בתחום מדידה של 0 – 200 מיליאמפר.
- 5-2: תוצאות מדידות וחישובים רשומות בטבלה 1 (ערכי I נמדדו במיליאמפר אך נרשמו באמפר).

עם הנגד X		ללא הנגד X		R (Ω)	l (cm)
1/I (A^{-1})	I (A)	1/I (A^{-1})	I (A)		
20.33	0.0492	16.39	0.0610	22.7	100
18.90	0.0529	14.93	0.0670	20.4	90
17.79	0.0562	13.39	0.0747	18.2	80
16.00	0.0625	12.71	0.0787	15.9	70
15.34	0.0652	11.24	0.0890	13.6	60
13.59	0.0736	9.86	0.1014	11.4	50
12.20	0.0820	8.56	0.1168	9.1	40
10.56	0.0947	6.89	0.1452	6.8	30

טבלה 1

6. בתרשים 3 מתוארים שני ישרים של $1/I$ כפונקציה של R : ישר A מתאים למעגל החשמלי ללא הנגד X, וישר B מתאים למעגל עם הנגד X. שני הישרים סורטו בעזרת גיליון אלקטרוני, על-פי הנתונים שבטבלה 1.



תרשים 3

$$(1) \quad \frac{1}{I} = 0.579 \cdot R + 3.20$$

כאשר R נמדד באום ו- I באמפר. ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9956$.
משוואת ישר ב (התקבלה בעזרת גיליון אלקטרוני):

$$(2) \quad \frac{1}{I} = 0.604 \cdot R + 6.67$$

כאשר R נמדד באום ו- I באמפר. ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9955$.
ב. הקשר בין I ל- R הוא קשר ליניארי.

8. המעגלים החשמליים (עם הנגד X ובלעדיו) מקיימים את הקשר:

$$(3) \quad \varepsilon = I (R + R^1)$$

כאשר R - התנגדות קטע המוליך B ;

R^1 - התנגדותם השקולה של כל רכיבי המעגל, מלבד זו של התיל B .

מנוסחה (3) נקבל:

$$(4) \quad \frac{1}{I} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot R + \frac{R^1}{\varepsilon}$$

9. המשתנים בקשר (4) הם R ו- $|I|$; שאר הגדלים הם קבועים. מכאן שהגרף המתאר את $|I|$ כפונקציה של R הוא קו ישר.

10. על-פי קשר (4) שיפועי הגרפים מייצגים את $1/I$ (הערך ההפוך לכא"מ של מקור המתח). זה מסביר מדוע הישרים שהתקבלו הם מקבילים (בקירוב).

11. כדי למצוא את נקודת החיתוך של הישר המתואר על-ידי קשר (4) עם ציר ה- R נציב בנוסחה $1/I = 0$, ונקבל כי נקודת החיתוך היא $R = -R^I$.

מכאן שהערכים המוחלטים של שיעורי נקודות החיתוך של הישרים עם ציר מייצגים את התנגדות המעגל מלבד התנגדות התיל B .

במעגל ללא הנגד X , התנגדות המעגל, מלבד זו של התיל B , כוללת את ההתנגדות הפנימית של מקור המתח ואת התנגדות האמפרמטר; במעגל עם הנגד X התנגדות זו כוללת מלבד שתי התנגדויות אלה גם את זו של הנגד X .

12. הגודל הגאומטרי בגרפים המייצג את התנגדות הנגד X הוא ה"מרחק" (ביחידה אום) בין שתי נקודות החיתוך של הישרים עם הציר האופקי.

כדי למצוא את נקודת החיתוך של ישר א עם ציר ה- R , נציב בקשר (1) לעיל 0 במקום $|I|$. ערך ה- R המתקבל מפתרון משוואה (1) הוא:

$$-\frac{3.20}{0.579} = -5.53\Omega$$

נמצא את שיעורה של נקודת החיתוך של ישר ב עם ציר ה- R על-ידי הצבה של 0 במקום $1/I$ בקשר (2). הערך המתקבל הוא:

$$-\frac{6.67}{0.604} = -11.04\Omega$$

ה"מרחק" בין שתי נקודות החיתוך שווה להתנגדות X (ראה תרשים 3).

אם כן, התנגדות הנגד X היא:

$$X = 11.04 - 5.53 = 5.51\Omega \approx 5.5\Omega$$

$$X = 5.5\Omega$$

13. יש לסגור את המעגל לזמן קצר בלבד מסיבות אלה:

(1) הזרם העובר במוליך B עלול לחמם את המוליך, ועליית הטמפרטורה שלו עלולה לשנות את התנגדותו.

(2) ההתנגדות הפנימית של הסוללה עלולה להשתנות.

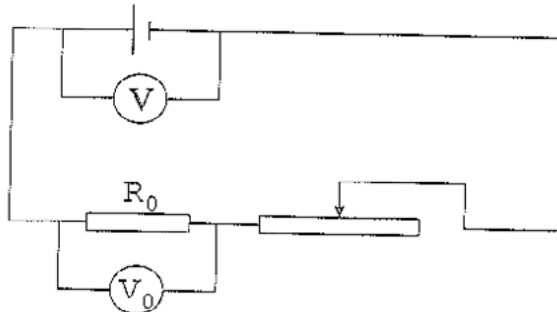
(3) כא"מ הסוללה עלול להשתנות.

חקר 9 מתח הדקים ומתח על נגד טורי

שאלת חקר



משנים את התנגדות הנגד המשתנה במעגל החשמלי שלפניך.



מה הקשר בין המתח ההדקים V לבין המתח V_0 שבקצות הנגד שהתנגדותו R_0 ?

העלאת השערה

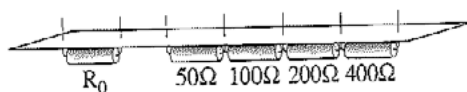
מהן השערותיך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

1. תכנן מערך ניסוי שבאמצעותו ניתן על שאלת החקר.

רשימת בלי המחקר

- (1) סוללה בת $9V$, עם מחברים מתאימים, שאליהם מחוברים שני תיילים מוליכים. בקצותיהם האחרים של שני התיילים מחוברים מצבטי תנין ("קרוקודיל") (תרשים 1);
- (2) נגד שהתנגדותו כ- 50Ω ;
- (3) לוחית שעליה מותקנים 4 נגדים של 50Ω , 100Ω , 200Ω , ו- 400Ω (5%); המחברים בטור, וכן נגד בודד שהתנגדותו $R_0 = 100\Omega$ (תרשים



תרשים 2: לוחית עם נגדים



תרשים 1: מתקרים לסוללה בת 9V

- (4) מד-מתח ספרתי (דיגיטלי);
 (5) 4 תיילי הולכה שבקצותיהם מצבטי תנין;
 (6) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).

בניית המערכת הניסויית

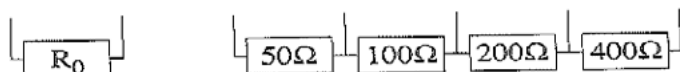
א. הדק את המחברים לסוללה, וחבר את הנגד שהתנגדותו כ- 50Ω אל אחד התיילים המחוברים לסוללה. **נגד זה יחשב בניסוי לחלק מן ההתנגדות הפנימית של הסוללה.**

ב. בנה מעגל חשמלי, שבו לקצה החופשי של הנגד שהתנגדותו כ- 50Ω , ולקצה החופשי של התיל המחובר אל מקור המתח, מחוברים בטור צירוף של נגדים, שהתנגדותם הכוללת 750Ω , וכן הנגד הבודד R_0 (שהתנגדותו 100Ω).

שים לב, אם הסוללה טריה, השאר את המעגל מחובר למשך 5 דקות, על מנת לייצב את מתח המקור.

ביצוע הניסוי

2. בתרשים 3 מתוארים הנגדים המותקנים על גבי הלוחית. העתק את התרשים, והשלם אותו כך שיתאר את המעגל החשמלי שבנית בסעיף ב (הנגד בן ה- 50Ω נחשב כאמור לחלק מן ההתנגדות הפנימית, והוא לא יופיע בתרשים). הוסף לתרשים מד-מתח למדידת המתח V_0 על הנגד R_0 ומד-מתח למדידת מתח ההדקים V .



תרשים 3: הנגדים המותקנים על גבי הלוחית

4. א. במעגל שבנית בסעיף ב, מדוד את המתח v_o על הנגד R_o , ורשום אותו במקום המתאים בטבלה כדוגמת טבלה 1.

ב. באותו מעגל מדוד את מתח ההדקים V , ורשום אותו בטבלה.

ההתנגדות המחוברת בטור ל- R_o יחידות:	מתח v_o על הנגד R_o יחידות:	מתח ההדקים v יחידות:
750		

טבלה 1: לרישום תוצאות מדידות

5. מדוד את המתחים v_o ו- V עבור מספר ערכים נוספים של התנגדויות המחוברות בטור ל- R_o . עבור כל אחד מן המקרים רשום בטבלה את סך ההתנגדות המחוברת ל- R_o , את V_o ואת V . הערכים V_o ו- V ישמשו אותך לבניית הגרף שבסעיף 8.

6. חבר את מקור המתח אל הנגד R_o . מדוד את המתח על הנגד R_o . רשום בטבלה את הערכים הנדרשים.

7. חבר את מד-המתח ישירות אל המקור, מדוד את המתח, ורשום את ערכו.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

8. סרטט גרף של מתח ההדקים V כפונקציה של המתח V_o על הנגד R_o .

9. א. מצא את משוואת הקו, ואת ריבוע מקדם המיתאם.

ב. נסח מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין V ל- V_o .

השוואת המסקנות האמפיריות לתיאוריה

10. הוכח את הקשר $V = \varepsilon \pm \frac{r}{R_o} - V_o$.

11. מצא את הכא"מ של מקור המתח.

12. הסבר את הקשר בין המתח שמדדת בסעיף 7 לעיל לבין, והכא"מ שמצאת בסעיף 11.

13. על סמך הגרף שסרטטת ועל סמך הנוסחה שבסעיף 10, מצא את התנגדותו הפנימית של מקור המתח (הכוללת את זו של הנגד בן ה- 50Ω).

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

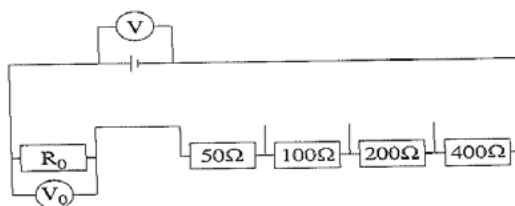
1. משנים את ההתנגדות R , ומודדים בכל פעם את המתחים V_0 ו- V .
הערות:

א. אל הסוללה מחוברת התנגדות של 50Ω בערך, וזאת כדי להגדיל (באופן מלאכותי) את ההתנגדות הפנימית של הסוללה.

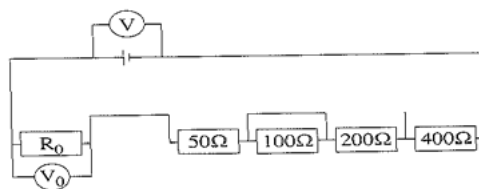
אם הדבר לא יעשה, הגרף המופיע בתרשים 6 עלול להראות מקביל לציר האופקי.

ב. ניתן להתחיל בביצוע המדידות כאשר רואים שהוריית מד המתח התיצבה.

2. בתרשים 4 מתואר המעגל החשמלי המבוקש (מביך נגדי הלוחית, מחוברים בטור לנגד R_0 נגדים שהתנגדותם הכוללת 750Ω).



3. בתרשים 5 מתואר המעגל החשמלי המבוקש (מבין נגדי הלוחית, מחוברים בטור לנגד R_0 נגדים שהתנגדותם הכוללת 650Ω).



תרשים 5: לנגד R_0 מחוברים בטור נגדים שהתנגדותם הכוללת 650Ω .

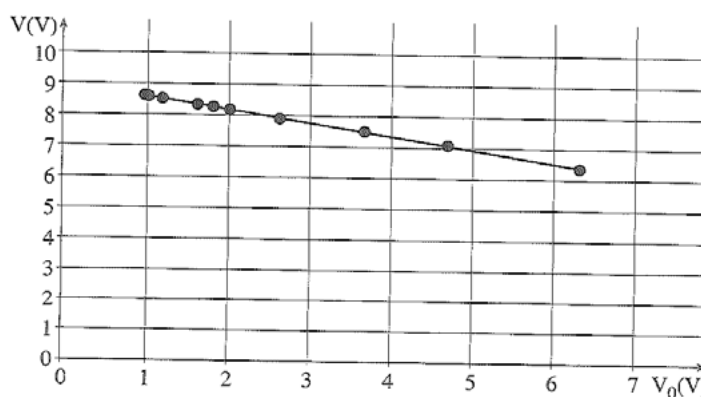
4-6: בטבלה 2 רשומות תוצאות המדידות.

מתח ההדקים V	מתח V_0 על הנגד R_0	ההתנגדות המחוברת בטור R_0 ל- יחידות: אום
8.60	1.00	750
8.57	1.06	700
8.51	1.20	600
8.33	1.64	400
8.27	1.84	350
8.17	2.03	300
7.89	2.64	200
7.44	3.70	100
7.00	4.74	50
6.34	6.34	0

טבלה 2: תוצאות המדידות

הערה: בשורה האחרונה בטבלה 2 מוצגות תוצאות המדידות בהתאם לסעיף 6 (כאשר רק הנגד R_0 מחובר - המתח בקצות נגד זה הוא גם מתח ההדקים).
7. כאשר חיברנו לשירות את מד המתח אל המקור, היתה הוריית מד המתח 9.02 וולט.

8. בתרשים 6 מתואר מתח ההדקים V כפונקציה של המתח V_0 על הנגד R_0 .



תרשים 6

9. א. משוואת הישר שהתקבלה בעזרת גיליון אלקטרוני:

$$(1) \quad V = -0.4255V_0 + 9.0264$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9997$.

ב. הקשר בין V ל- V_0 הוא קשר לינארי.

10. המעגל החשמלי מקיים את הקשר:

$$(2) \quad V = \mathcal{E} - IR$$

חוק אום לגבי הנגד שהתנגדותו R_0 :

$$(3) \quad I = \frac{V_0}{R_0}$$

נציב את קשר (3) בקשר (2) ונקבל:

$$(4) \quad V = \mathcal{E} - \frac{r}{R_0} \cdot V_0$$

11. על-פי קשר (4), נקודת החיתוך של הגרף עם הציר האנכי מייצגת את הכא"מ. כדי לקבוע את ערכה של נקודה זו נתבונן בקשר (1): נקודה זו שווה בקירוב ל- 9.03 וולט.

12. המתח שמדדנו הוא מתח הדקים במצב שבו הזרם עובר רק דרך הוולטמטר. התנגדות הוולטמטר גדולה מאוד, לכן הזרם במעגל קטן מאוד. מכאן, שמתח ההדקים שמדדנו צריך להיות קרוב מאוד לכא"מ, כפי שאכן התקבל.

13. על סמך המקדמים של V_0 בקשרים (1) ו-(4) נרשום:

$$\frac{r}{R_0} = 0.4255$$

נציב בקשר האחרון $R_0 = 100\Omega$:

$$\frac{r}{100} = 0.4255$$

מכאן נקבל: $r = 42.6\Omega$

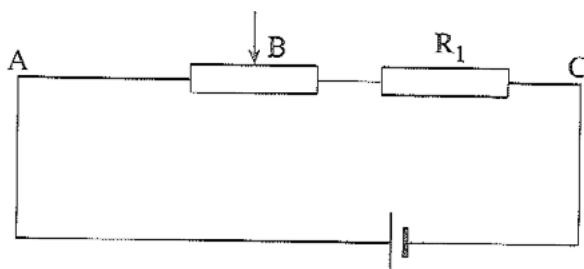
חקר 10

תכונות מעגל חשמלי הכולל נגד משתנה סיבובי



שאלת חקר

התרשים מתאר מעגל חשמלי שבו נגד משתנה סיבובי.



- א. כיצד ניתן לקבוע את תלות ההתנגדות בין R בין C ל- B בזווית הסיבוב a של ציר הנגד המשתנה? ($\alpha = 0$) במצב שבו נקודת המגע B נמצאת בנקודה הימנית ביותר של הנגד המשתנה).
- ב. מחברים בין C ל- B צרכן כלשהו. בהנחה שההתנגדות R כפונקציה של a היא ליניארית - כיצד משתנה המתח בין קצות הצרכן כפונקציה של a ? הבחן בין מצבים: מצב א: התנגדות הצרכן גדולה מאוד ביחס להתנגדות הנגד R_1 וביחס להתנגדות הנגד המשתנה; מצב ב: התנגדות הצרכן אינה גדולה מאוד ביחס להתנגדויות האחרות במעגל החשמלי.

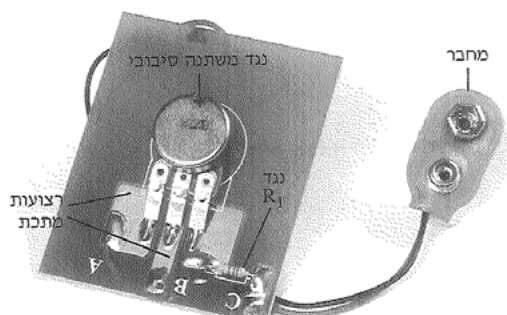
העלאת השערות

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

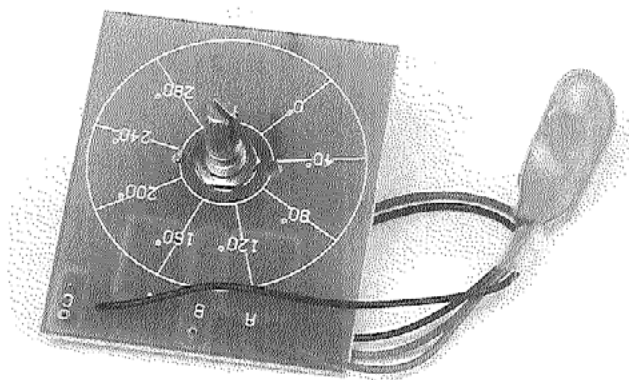
רשימת בלי המחקר

(1) לוחית מבודדת, שעליה:

- מסומנים שלושה הדקים A, B ו-C; הדקים A ו-C מחוברים אל תילי הולכה, עם מחבר המאפשר חיבורם לסוללה (ראה תרשים וא).



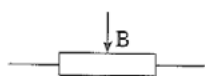
א. תצלום צד אחד של הלוחית



ב. תצלום הצד האחר של הלוחית

תרשים 1: תצלומים של שני צידי הלוחית

- מותקן נגד - משתנה סיבובי (ראה תרשים וא) שהתנגדותו היא מסדר גודל של $20\text{ k}\Omega$; כאשר מסובבים את הציר של הנגד המשתנה - המגע הנייד (המכונה "זחלן" או "גררה") נע על פני הנגד המשתנה. המגע הנייד של הנגד מחובר אל הנקודה B, המסומנת גם בתרשים 2.



ב. סימון הנגד המשתנה



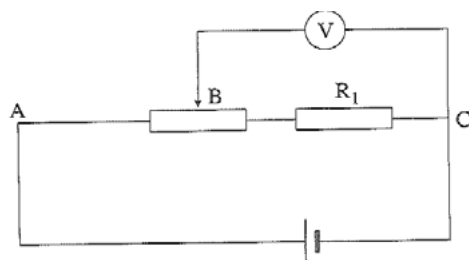
א. צורת הנגד המשתנה

- מותקן נגד שהתנגדותו קבועה (ראה תרשים וא) והוא מסדר גודל של $5\text{ k}\Omega$; נסמן את התנגדותו ב- R_1 ;
- רצועות מתכת בצבע כסף המשמשות להולכת זרם חשמלי (ראה תרשים וא);
- מודפסות שנתות המאפשרות מדידת זוויות (ראה תרשים וב).
- (2) סוללה של 9 וולט.
- (3) רב-מודד דיגיטלי, הכולל מד-מתח בתחום 0 עד כ- 20 V וולט, ומד-התנגדות בתחום 0 עד כ- $40\text{ k}\Omega$;
- (4) שני תיילי הולכה המשמשים לחיבור הרב-מודד למעגל חשמלי. בקצות התיילים מחוברים "מצבטי תנין";
- (5) מהדק קפיצי;
- (6) פס נייר בריסטול, שאורכו כ- 6 ס"מ, ורוחבו כ- 1.5 ס"מ;
- (7) נגד שהתנגדותו קבועה, מסדר גודל של $10\text{ }\Omega$. נסמן את התנגדותו ב- R_2 ;
- (8) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).

ניסוי א

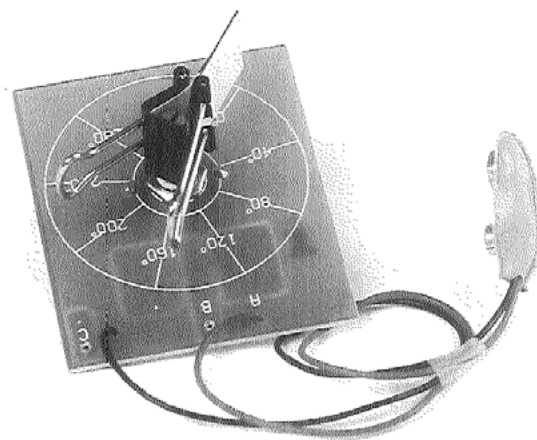
בניית המערכת הניסויית

- א. חבר את הסוללה אל התיילים המחוברים להדקים A ו C. חבר את הרב-מודד, במצב שבו הוא משמש מד-מתח, אל ההדקים B ו C (הדק את מצבטי התנין המחוברים לרב-מודד להדקים B ו C). המעגל החשמלי מתואר בתרשים 3.



תרשים 3: תרשים המעגל החשמלי

ב. סובב את הציר של הנגד המשתנה, ועקוב אחר הוראת מד המתח.
ג. סובב את הציר עד שהוראת מד-המתח תהיה מזערית. בלי לסובב את הציר, הקף את הציר בפס נייר הבריסטול (פריט 6 ברשימת כלי המחקר) כך שפס הנייר יהיה מעט מעל מד-הזווית. הדק את פס הנייר אל הציר, באמצעות המהדק הקפיצי, כך שקצה פס הנייר יצביע על השנת אפס של מד-הזווית (תרשים 4). מעתה נכנה את המצב הזה "מצב האפס" של ציר הנגד המשתנה, ואת פס הנייר נכנה "מחוג".



תרשים 4: המחוג מצביע על השנת אפס

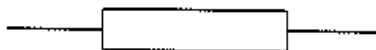
ביצוע ניסוי א

הערה: במהלך הניסויים, כאשר הינך מסובב את הציר, הקפד שפס נייר הבריסטול יהיה מהודק היטב לציר, ולא יסתובב ביחס אליו.

1. התנגדות מד-המתח שברשותך היא מסדר גודל של 10^7 , ולמעשה היא אינסופית ביחס להתנגדויות הנגדים האחרים במעגל החשמלי. התבונן במעגל החשמלי, והסבר מדוע המתח החשמלי בין הנקודות A ו C אינו משתנה בקירוב כאשר משנים את מקומו של המגע הנייד (מסובבים את הציר).

2. סובב את ציר הנגד המשתנה, מדוד ורשום את המתח המזערי שמורה מד- המתח (סמן מתח זה ב V_1 min), ואת המתח המרבי שהוא מורה $(V_1$ max).

3. בתרשים 5 מסורטט הנגד המשתנה עם שני הדקיו הקבועים. הוסף לתרשים את האות A ליד אחד ההדקים, ובהתאם לכך את המגע הנייד במקומו הנכון, במצב שבו הוראת מד-המתח היא מזערית.



תרשים 5: הנגד המשתנה במצב שבו הוראת מד-המתח היא מזערית

4. העתק את טבלה 1. כדי לחקור את הקשר בין זווית הסיבוב, a , של הציר (ביחס למצב האפס שלו), לבין הוראת מד-המתח, רשום בטבלה את הערך שמורה מד-המתח (V) עבור ערכים שונים של a . (רשום בטבלה גם יחידות). הערה: כדי למנוע החלקה של פס נייר על הציר, מוצע לסובב את הציר באמצעות מברג שהלהב שלו מוכנס לחריץ של ציר הנגד המשתנה.

							זווית - a
							מתח - V

טבלה 1: תוצאות המדידות של ניסוי א

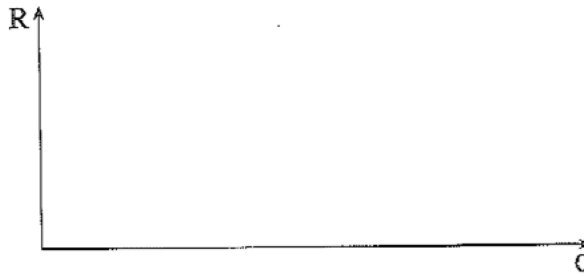
ניתוח הממצאים, מסקנות ושאלות – ניסוי א

5. א. על-פי הערכים הרשומים בטבלה 1, סרטט דיאגרמת פיזור של הוראת מד- המתח V כפונקציה של הזווית. סמן את הנקודות ב"דיאגרמת פיזור א".

6. העתק את תרשים 6, וסרטט בו עקומה איכותית של ההתנגדות R של קטע המעגל שבין הנקודות C ו- B כפונקציה של הזווית a (ללא ציון ערכים

מספריים על הצירים).

יתכן שבנגד המשתנה שברשותך התנהגות דיאגרמת הפיזור שסרטטת בסעיף 5, שונה בזוויות a קטנות מאשר בזוויות האחרות. אם כן – התייחס לכך בעקומה האיכותית של R כפונקציה של a .



תרשים 6: מערכת צירים לסרטוט עקומה איכותית

7. א. מדוד, באמצעות הרב-מודד, את ההתנגדות המרבית של הנגד המשתנה.
- ב. ללא מדידות נוספות, חשב את ההתנגדות R_1 של הנגד הקבוע המחובר על-פני הלוחית.
- ג. מדוד, באמצעות הרב-מודד, את ההתנגדות R_1 . אם יש פער ביו תוצאת המדידה לבין תוצאת החישוב בסעיף 7ב, ציין סיבות אפשריות לקיום הפער.

ניסוי ב

בניית המערכת הניסויית – ניסוי ב

הוסף למעגל החשמלי שבנית בניסוי א את הנגד שהתנגדותו סומנה ב- R_2 (פריט 7 ברשימת כלי המחקר); חבר אותו אל ההדקים B ו- C על-ידי שחלת קצותיו לשקעים הקטנים המחוברים להדקים B ו- C.

ביצוע ניסוי ב

8. העתק את תרשים המעגל החשמלי של ניסוי א (תרשים 3). הוסף לו תרשים של הנגד שהתנגדותו R_2 .
9. סובב את הציר של הנגד המשתנה, מדוד ורשום את המתח המזערי שמורה מד-המתח (סמן ב- $V_{2 \min}$), ואת המתח המרבי שהוא מורה ($V_{2 \max}$).
10. העתק את טבלה 2. רשום בטבלה את הערכים שמורה מד-המתח עבור ערכים שונים של a .

							זווית - a
							מתח - V

טבלה 2: טבלה לרישום תוצאות המדידות של ניסוי ב

ניתוח הממצאים, מסקנות ושאלות - ניסוי ב

11. על-פי הערכים הרשומים בטבלה 2, סרטט דיאגרמת פיזור של הוראת מד- המתח V כפונקציה של הזווית a. סרטט את דיאגרמת הפיזור במערכת הצירים שבה סרטטת את דיאגרמת הפיזור א, וסמן את הנקודות בתרשים ב"דיאגרמת פיזור ב".

12. נתון כי התנגדות מד-המתח שברשותך גדולה מאוד ביחס להתנגדות הנגד המשתנה, וביחס להתנגדות R_1 .

אילו היית חוזר על ניסוי א (שבו הנגד שהתנגדותו R_2 אינו מחובר למעגל החשמלי), אולם במקום מד-המתח היית מחבר מכשיר חשמלי. שהתנגדותו קבועה, והיא מסדר גודל של ההתנגדות R_1 .

האם במקרה זה הקשר בין המתח בקצות המכשיר החשמלי לבין זווית הסיבוב a של הציר היה דומה לדיאגרמת פיזור א או לדיאגרמת פיזור ב? נמק.

13. א. התבונן במצבים שהם מדדת את $V_{1 \max}$ ואת $V_{2 \max}$ הסבר מדוע $V_{2 \max} < V_{1 \max}$, כלומר מדוע המתח המרבי במעגל החשמלי הכולל את הנגד שהתנגדותו R_2 (ניסוי ב) קטן מהמתח המרבי במעגל החשמלי ללא נגד זה (ניסוי א).

ב. הסבר מדוע $V_{2 \min} < V_{1 \min}$.

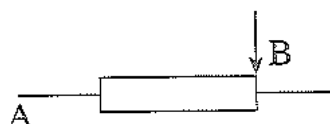
תוצאות שד מדידות ותשובות לשאלות

1. התנגדות הוולטמטר גדולה מאוד ביחס להתנגדות המחוברת אליה במקביל, לכן ניתן להזניח את הזרם העובר בוולטמטר. כלומר, הזרם עובר בעיקרו במעגל הטורי, התנגדות המעגל הטורי אינה משתנה כאשר מסובבים את הציר. לכן המתח בין A ל- C הוא קבוע.

2. המתח המזערי בניסוי א: $V_{1 \min} = 1.95 \text{ V}$;

המתח המרבי בניסוי א: $V_{1 \max} = 9.83 \text{ V}$;

3. בתרשים 7 מתואר מקומו הנכון של המגע הנייד, במצב שבו הוראת מד- המתח היא מזערית.

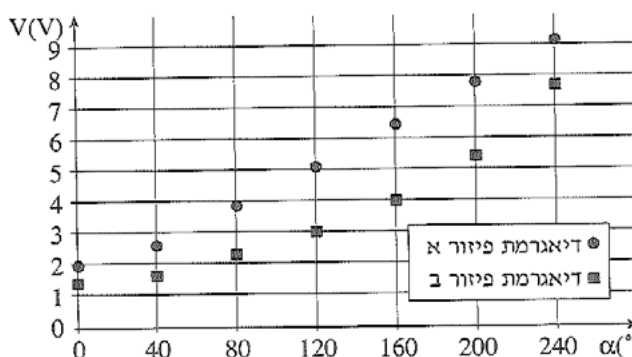


תרשים 7: מקומו של המגע הנייד במצב שבו הוראת מד המתח היא מזערית
4. תוצאות המדידות של ניסוי א רשומות בטבלה 3.

זווית α - (°)	0	40	80	120	160	200	240
מתח V - (V)	1.95	2.59	3.86	5.14	6.47	7.81	9.11

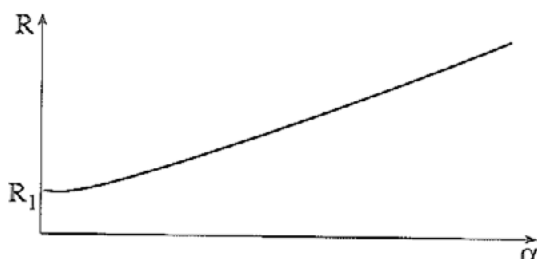
טבלה 3: תוצאות מדידות בניסוי א

5. הנקודות המסומנות ב"דיאגרמת פיזור א" בתרשים 8 מתארת את הוראת מד המתח V, כפונקציה של הזווית α .



תרשים 8: המתח V כפונקציה של α בניסוי א ובניסוי ב

6. הגרף לינארי, כי ככל הנראה התנגדות הנגד המשתנה פרופורציונית לזווית סיבוב הציר. סיבוב הציר בזווית מסוימת גורם להגדלת ההתנגדות בשיעור מסוים. הזרם קבוע, לכן הגידול במתח קבוע לאותה זווית.



תרשים 9: ההתנגדות R כפונקציה של α

7. א. תוצאת המדידה של ההתנגדות המרבית של הנגד המשתנה:
 $R = 20.0 \text{ k}\Omega$

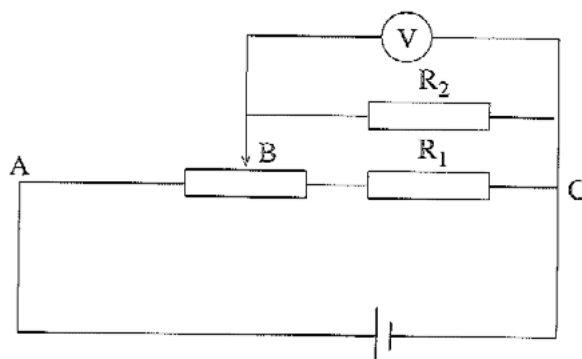
ב. $V_{1 \max}$ מבטא את המתח ביו הנקודות C ו A; מבטא את המתח בין קצות הנגד R_1 ; לכן $V_{1 \max} - V_{1 \min}$ מבטא את המתח (הקבוע) בין קצות ההדקים הקבועים של הנגד המשתנה. מכאן שהזרם (הקבוע), I, בין קצות הנגד המשתנה:

$$I = \frac{V_{1 \max} - V_{1 \min}}{R_{\text{נגד משתנה}}} = \frac{9.83 - 1.95}{20,000} \approx 0.4 \text{ mA}$$

$$R_1 \text{ מחושב} = \frac{V_{1 \min}}{I} = \frac{1.95}{0.4 \text{ mA}} \approx 4.9 \text{ k}\Omega$$

ג. תוצאת מדידה $R_1 \text{ נמדד} = 5.0 \text{ k}\Omega$

8. המעגל החשמלי הכולל את הנגד שהתנגדותו R_2 מתואר בתרשים 10.



תרשים 10: המעגל החשמלי כולל הנגד R_2

9. המתח המזערי בניסוי ב: $V_{2 \min} = 1.38 \text{ V}$;
 המתח המרבי בניסוי ב: $V_{2 \max} = 9.70 \text{ V}$.
 10. תוצאות המדידות של ניסוי ב רשומות בטבלה 4.

זווית - a (°)	0	40	80	120	160	200	240
מתח - V (V)	1.38	1.66	2.32	3.08	4.08	5.46	7.74

טבלה 4: תוצאות מדידות בניסוי ב

11. דיאגרמת הפיזור המתאימה לניסוי ב מתוארת בתרשים 8.
 12. במקרה זה הקשר ביו המתח בקצות המכשיר החשמלי לבין זווית הסיבוב a דומה לדיאגרמת פיזור ב.
 נימוק: ההתנגדות בין C ל-B אינה גדולה מאוד ביחס להתנגדות המחוברת אליה במקביל, לכן המצב דומה למצב שבניסוי ב, בו התקבלה דיאגרמת פיזור ב.
 13. א. המתחים המרביים מתקבלים כאשר המגע הנייד נמצא בנקודה השמאלית של הנגד המשתנה (נקודה A).
 במעגל הראשון מתקיים:

$$(1) \quad \varepsilon = Ir + V_{1 \max}$$

כאשר:

- הכא"מ של הסוללה;

-I הזרם במעגל הראשון;

r - ההתנגדות הפנימית של הסוללה;

במעגל השני מתקיים:

$$(2) \quad \varepsilon = I'r + V_{2 \max}$$

כאשר: I' - הזרם במעגל השני;

במעגל השני ההתנגדות החיצונית קטנה יותר, מכאן ש- I' > I האגפים השמאליים של משוואות (1) ו-(2) שווים, כמו כן $I'r > Ir$, לכן

$$V_{2 \max} < V_{1 \max}$$

ב. המתחים המזעריים מתקבלים כאשר המגע הנייד נמצא בנקודה הימנית של הנגד המשתנה.

במעגל הראשון מתקיים:

$$(3) \quad \varepsilon = Ir + IR_{AB} + V_{1 \min}$$

במעגל השני מתקיים:

$$(4) \quad \varepsilon = I'r + I'R_{AB} + V_{1 \min}$$

האגפים הימניים של משוואות (3) ו-(4) שווים, $I' > I$ לכן $I'r > Ir$, מכאן $I'R_{AB} > IR_{AB}$, $V_{2 \min} < V_{1 \min}$.

חקר 11

מעגל חשמלי

הכולל שני מקורות מתח



שאלת חקר

מעגל חשמלי כולל ספק, סוללה, ונגד המחוברים בטור, וכן וולטמטר המודד את מתח ההדקים, V , של הספק, ואמפרמטר המודד את הזרם, I , במעגל. משנים פעמים אחדות את כ"מ הספק (באמצעות בורר המתחים), ומודדים בכל פעם את המתח V , ואת הזרם I . מסרטטים גרף של I כפונקציה של V .
א. מהי צורת הגרף אם -

- (1) ההדק החיובי של הספק מחובר להדק השלילי של הסוללה?
(נאמר כי במצב זה מקורות המתח מחוברים "באותו כיוון").
 - (2) ההדק החיובי של הספק מחובר להדק החיובי של הסוללה?
(נאמר כי במצב זה מקורות המתח מחוברים "בכיוונים מנוגדים").
- ב. בהנחה כי ההתנגדות הפנימית של הסוללה ניתנת להזנחה ביחס להתנגדות הנגד - אילו גדלים פיזיקליים ניתן לחשב מכל אחר משני הגרפים?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבל התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

רשימת בלי המחקר

- (1) ספק למתח ישר של $1.5V$, $3V$, $4.5V$ ו- $6V$;
- (2) סוללה טריה של $1.5V$ בגודל D, בתוך בית סוללות;
- (3) אמפרמטר לזרם ישר בתחום $0-50mA$.
- (4) וולטמטר לזרם ישר בתחום $0-15V$.
- (5) נגד שהתנגדותו כ- 220Ω ;
- [ניתן להשתמש בנגד שבתיבת הנגדים - תכנית רחובות מספר קטלוגי 0720]
- (6) 6 תיילי הולכה עם מצבטי בננה בקצותיהם - בכל מצבט בננה צריכה להיות כניסה המאפשרת חיבור מצבט בננה אחר;
- (7) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).

בניית המערכת הניסויית

- א. כוון את הספק ל- $1.5V$.
- בנה מעגל חשמלי טורי מהספק, הסוללה והנגד. הקפד על כך שהסוללה והספק יהיו מחוברים "באותו כיוון".
- ב. הוסף למעגל אמפרמטר שיורה על הזרם במעגל, וולטמטר שיורה על מתח ההדקים של הספק.

ביצוע הניסוי

1. סרטט תרשים של המעגל החשמלי שבנית.
2. מדוד את הזרם I ואת מתח ההדקים V.
- חזור על מדידותיך כשאתה מעביר את בורר הספק ל- $3V$, $4.5V$ ו- $6V$ בזה אחר זה. רשום את תוצאות מדידותיך בטבלה מתאימה.
3. חזור את הספק למצב של $1.5V$, הפוך את כיוון החיבור של הסוללה, וחזור על המדידות המתוארות בסעיף 2.
4. כבה את הספק בעזרת המפסק שלו, בלי לפרק את המעגל החשמלי. האם מבשירי המדידה מראים אפס? הצע הסבר לתופעה.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

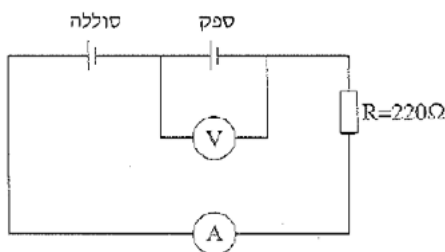
5. סרטט גרפים של עוצמת הזרם I כפונקציה של מתח ההדקים V עבור כל כיוון חיבור של הסוללה. הזנח את התנגדות האמפרמטר ואת ההתנגדות הפנימית של הסוללה, ביחס להתנגדות R .
6. א. מצא את משוואות שני הקווים שסרטטת.
ב. נסח מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין I ו- V .

השוואת המסקנות האמפיריות לתיאוריה

7. א. פתח נוסחה של עוצמת הזרם I כפונקציה של מתח ההדקים V עבור כל כיוון חיבור של הסוללה.
ב. מה מייצגים שיפועי הקווים, ומה מייצגים שיעורי הנקודות שבהן הקווים חותכים את הציר האנכי?
8. מצא מתוך הגרפים שסרטטת את:
 - התנגדות הנגד;
 - כ"מ הסוללה.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. בתרשים 1 מתואר המעגל החשמלי במצב שבו שני מקורות המתח מזרימים זרם באותו כיוון.



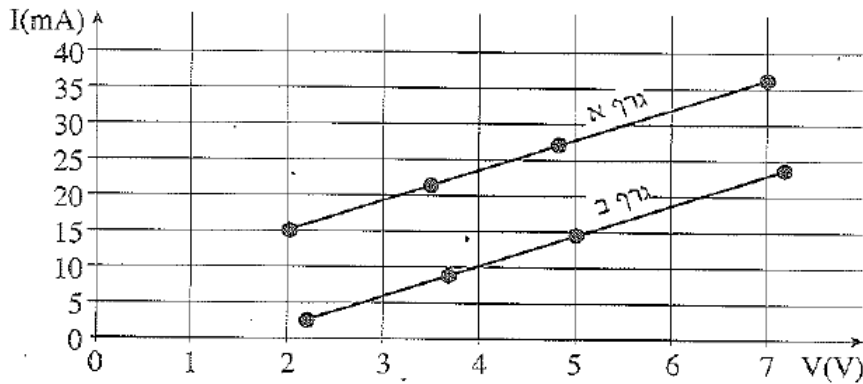
2. תוצאות המדידות במעגל החשמלי שבו שני מקורות המתח היו ב"אותו כיוון" רשומות בטבלה 1 (הניסוי בוצע בעזרת מכשירי מדידה אנלוגיים).

מתח (וולט)	2	3.5	4.8	7
זרם (מיליאמפר)	15	21	27	36

3. תוצאות המדידות במעגל החשמלי שבו שני מקורות המתח מחוברים "בכיוונים מנוגדים" רשומות בטבלה 2.

מתח (וולט)	2.2	3.7	5	7.2
זרם (מיליאמפר)	2	9	14	24

4. כאשר מכבים את הספק באמצעות המפסק, מכשירי המדידה אינם מראים אפס. הסבר: גם כאשר מפסק הספק סגור - המעגל החשמלי בתוך הספק אינו מנותק, וזרם יכול לעבור דרכו.
5. גרף א בתרשים 2 מתאר את עוצמת הזרם I במעגל החשמלי כפונקציה של מתח ההדקים V , כאשר שני מקורות המתח מחוברים "באותו כיוון". גרף ב בתרשים 2 מתאר את עוצמת הזרם I כפונקציה של מתח ההדקים V , במצב שבו שני מקורות המתח מחוברים "בכיוונים מנוגדים".



6. א. משוואת הקו (התקבלה בעזרת גיליון אלקטרוני):

$$(1) I = 4.23 \cdot V + 6.47$$

כאשר I נמדד במיליאמפרים ו- V נמדד בוולטים.

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9994$

משוואת הקו (התקבלה בעזרת גיליון אלקטרוני):

$$(2) I = 4.36 \cdot V - 7.50$$

כאשר I נמדד במיליאמפרים ו- V נמדד בוולטים.

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9991$

ב. הקשר בין V ל- V הוא קשר לינארי.

7. א. נשתמש בקשר:

$$(3) V_{A,B} = \Sigma (R \cdot I) - \Sigma \varepsilon$$

ננישם את קשר (3) לגבי המעגל החשמלי הראשון (אותו כיוון):

$$(4) V = (R + R_A + r) \cdot I - \varepsilon$$

כאשר: V - מתח ההדקים (נמדד);

R - התנגדות הנגד ($\varepsilon 220$);

R_A - התנגדות האמפרמטר;

r - ההתנגדות הפנימית של הסוללה;

I - עוצמת הזרם במעגל (נמדדת);

ε - הבא"מ של הסוללה;

$$(5) \quad V = R \cdot I - \varepsilon \quad \text{בהזנחת } R_A \text{ ו-} r \text{ ביחס ל-} R:$$

$$(6) \quad I = \frac{1}{R} \cdot V + \frac{\varepsilon}{R} \quad \text{ממשוואה (5) נקבל כי:}$$

באופן דומה נוכל למצוא כי במעגל החשמלי שבו שני מקורות המתח

מזרימים זרם בכיוונים מנוגדים מתקיים הקשר:

$$(7) \quad I = \frac{1}{R} \cdot V - \frac{\varepsilon}{R}$$

ב. מקשרים (6) ו-(7) נובע כי שיפועי הקווים בתרשים 2 מייצגים את הערך ההפוך של R ; נקודת החיתוך של גרף א עם הציר האנכי שווה ל- (ε/R) , ונקודת החיתוך של גרף ב עם ציר זה שווה ל- (ε/R) . (-

א. משוואה (1) התקבלה מערכים שבהם הזרם נמדד במיליאמפרים.

במקרה זה השיפוע הוא 4.23. כאשר הזרם נמדד באמפרים, השיפוע

במשוואה (1) הוא אלפית מערך זה, כלומר 0.00423. התנגדות הנגד

$$R \text{ שווה כאמור להופכי של ערך זה, כלומר: } R = \frac{1}{0.00436} \approx 229 \, \Omega$$

באופן דומה, נחשב את ההתנגדות על-פי משוואה (2): לפניך

$$R = \frac{1}{0.00436} \approx 229 \, \Omega \quad \text{נוסחה מורכבת}$$

ב. נחשב את הכא"מ על-פי תוצאות המדידות במעגל הראשון:

האיבר החופשי במשוואה (1) שווה (על-פי משוואה (6)) ל- ε/R .

מכאן:

$$\frac{\varepsilon}{R} = 0.00647 \Rightarrow \frac{\varepsilon}{236} = 0.00647 \Rightarrow \varepsilon = 1.5V$$

(חילקנו את האיבר החופשי 6.47 ב-1000).

נחשב את הכא"מ על-פי תוצאות המדידות במעגל השני: האיבר

החופשי במשוואה (2) שווה (על-פי משוואה (3)) ל- $-\varepsilon/R$. מכאן:

$$-\frac{\varepsilon}{R} = 0.0075 \Rightarrow \frac{\varepsilon}{229} = 0.0075 \Rightarrow \varepsilon = 1.7V$$

חקר 12

אופיון של נורת להט

שאלת חקר



כיצד נראה האופיון (גרף המתאר את הזרם כפונקציה של המתח) של נורת להט?

העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר וציין את שיקולך.

תכנון מערך ניסוי

1. תכנן מערך ניסוי שבאמצעות הממצאים ניתן יהיה לענות על שאלת החקר.

רשימת כלי המחקר

- (1) נורה של $0.3A, 3.5V$ בתוך בית נורה?
- (2) מקור מתח ישר המתאים להפעלת הנורה (רצוי ספק, אפשר גם סוללות בתוך בית סוללות);
- (3) אמפרמטר אנלוגי לזרם ישר בעל תחום מדידה: $0 - mA500$;
- (4) וולטמטר לזרם ישר, בעל תחום מדידה: $0 - V3$;
- (5) נגד משתנה שהתנגדותו המרבית $15 - 20$ אום, לזרמים של $0.5A$ לפחות [למשל הנגד המשתנה של תוכנית רחובות - מספר קטלוגי 0520];
- (6) נגד שהתנגדותו כ- 5Ω (או נגד משתנה נוסף מהסוג המתואר ב-5) לעיל).
- (7) 7 תיילי הולכה.

בניית המערכת הניסויית

א. בנה מעגל חשמלי המאפשר הפעלת הנורה ברצף של מתחים, החל ממתח אפס עד מתח שבו הנורה מופעלת באורה המלא.

ב. הוסף למעגל החשמלי אמפרמטר למדידת הזרם דרך הנורה, וולטמטר למדידת המתה בין קצות הנורה.

ביצוע הניסוי

2. סרטט את המעגל החשמלי שבנית.
3. הפעל את הנורה במתחים של $0.2V, 0.3V, 0.6V, 1.0V, 1.5V, 2.0V$.
 $2.5V, 0.1V$, ו- $3.0V$. מדוד בכל פעם את הזרם בנורה, ורשום את תוצאות מדידותיך בטבלה מתאימה.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

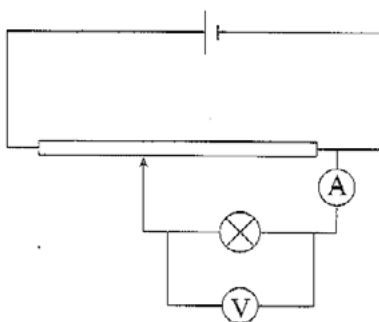
4. סרטט גרף של I כפונקציה של V (אופיין של הנורה).
5. נסח מסקנה אמפירית בדבר התנגדות הנורה.

שאלות

6. הסבר את המסקנה האמפירית שבסעיף 5.
7. במצב שבו המתח על הנורה הוא 0.5 וולט:
 - ★ פתח את המעגל וסגור אותו כעבור זמן מה על-ידי הוצאה והכנסה של מצבת בננה, ולא על-ידי שימוש במפסק של הספק. **שים לב לתנועת מחוג האמפרמטר עם סגירת המעגל.**
 - ★ הוצא את הנורה, וחבר במקומה נגד שהתנגדותו כ- 5Ω (במקום נגד זה תוכל להשתמש בנגד משתנה המכוון להתנגדות מסדר גודל של 5Ω). חזור על הניסוי של פתיחת המעגל וסגירתו. שים לב לתנועת מחוג האמפרמטר עם סגירת המעגל במקרה זה.
- האם יש הבדל בתנועת מחוג האמפרמטר בשני המקרים? אם כן, הסבר.
8. האם ניתן למדוד בעזרת המכשירים שקיבלת (וולטמטר ואמפרמטר) את הקשר בין מתח לזרם גם כאשר המתח בין קצות הנורה קטן $0.1V$? נמק.
9. (א) סרטט מעגל חשמלי, שבאמצעותו ניתן למדוד ערכים של המתח בקצות הנורה והזרם העובר דרכה, כאשר הנגד המשתנה מחובר בצורה שונה מזו שחיברת.
- (ב) מהו יתרון שיטת החיבור שבה בחרת לעומת שיטת החיבור האחרת של הנגד המשתנה? נמק.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

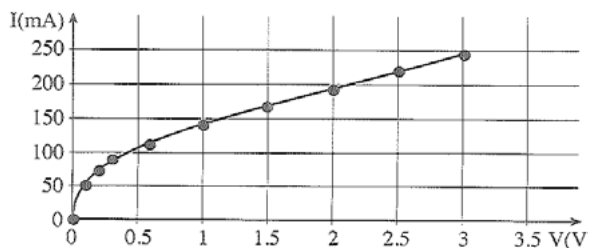
1. בונים מעגל חשמלי שבו ניתן לשנות ולמדוד את המתח, V , בין קצות נורה, ובכל פעם למדוד את הזרם I דרכה. לאחר מכן מסרטטים גרף של I כפונקציה של V .
2. מעגל חשמלי המתאים לביצוע הניסוי הוא מעגל פוטנציומטרי (תרשים 1).



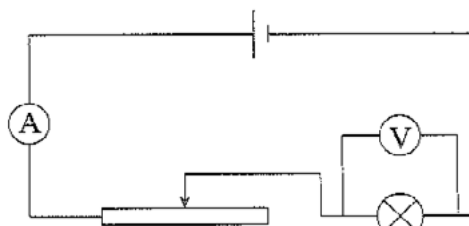
3. תוצאות מדידות מתוארות בטבלה 1.

V (וולט)	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
I (מיליאמפר)	50	73	92	111	139	168	192	219	240

4. בתרשים 2 מתואר גרף של עוצמת הזרם העובר בנורה כפונקציה של המתח בין קצותיה.



5. בתחילה, התנגדות הנורה הולכת וגדלה (שיפוע המשיק לעקומה הולך וקטן), לאחר מכן היא פחות או יותר מתייצבת.
6. התנגדות הנורה משתנית משום שעליית המתח בין קצותיה גורמת לעליית הזרם, וזו גורמת לעליית הטמפרטורה של חוט הלהט. ככל שהטמפרטורה של חוט הלהט גבוהה יותר – גדלה ההתנגדות שלו. התנגדות חוט הלהט מתייצבת (פחות או יותר) כיוון שבטמפרטורות גבוהות יחסית, קצב יצירת החום בחוט הלהט משתווה לקצב פליטת החום לסביבה. לכן במתחים גבוהים יחסית הטמפרטורה אינה עולה, והתנגדות חוט הלהט מתייצבת.
7. ברגע סגירת המעגל החשמלי במצב שבו הנורה מחוברת – **מחוג האמפרמטר עולה, ולאחר מכן יורד ומתייצב במקום קבוע.** לעומת זאת, כאשר במקום הנורה מחובר נגד – ברגע סגירת המעגל החשמלי המחוג עולה, **ומיד מתייצב במקום קבוע.** הסבר: עם סגירת המעגל הכולל את הנורה – בתחילה הנורה אינה חמה, לכן התנגדותה נמוכה, והזרם גדול. אולם מיד הנורה מתחממת והתנגדותה גדלה, לכן הזרם קטן, והוא מתייצב יחד עם התייצבות טמפרטורת הנורה. ההתנגדות של הנגד לעומת זאת, אינה מושפעת כמעט על-ידי הטמפרטורה, לכן היא בקירוב קבועה, לכן מחוג האמפרמטר מתייצב מיד.
8. ניתן למדוד בעזרת המכשירים את הקשר בין המתח לזרם גם כאשר המתח בנורה קטן מ- $Vo.1$. בעיקרון, במעגל הפוטנציומטרי המתואר בתרשים 1, ניתן להקטין את המתח בקצות הנורה באופן רציף עד לערך אפס.
9. (א) ניתן לבצע את הניסוי גם כאשר הנגד המשתנה מחובר כראוסטט, כמתואר בתרשים 3.



- (ב) במעגל החשמלי המתואר בתרשים 1 ניתן להקטין את המתח על הנורה עד כבויה המוחלט. לעומת זאת במעגל החשמלי המתואר בתרשים 3 ניתן להקטין את המתח עד ערך מסוים, ולא ניתן לרדת ממנו (המתח הוא מינימלי במצב שבו התנגדות הנגד המשתנה היא מרבית).

חקר 13 אופיינים של רכיבים חשמליים מוסתרים

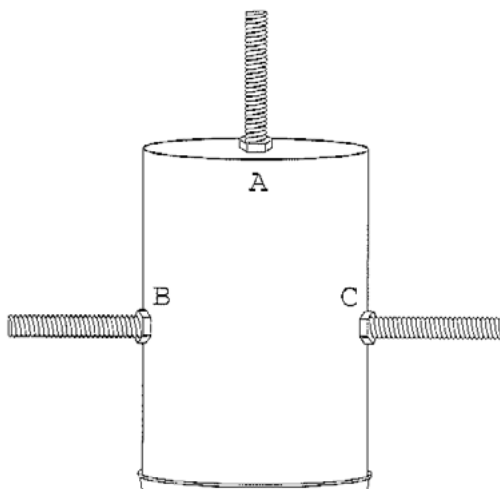


שאלת חקר

לרשותך רכיבים חשמליים מוסתרים. קבע, על-פי האופיינים שלהם, מה עשוי להיות כל אחד משני הרכיבים. (אופיין הוא תיאור של עוצמת הזרם העובר דרך רכיב חשמל, כפונקציה של המתח בין קצות הרכיב).

רשימת בלי המחקר

(1) קופסה עם שלושה הדקים A, B, C, כמתואר בתרשים 1.



להדקים מחוברים שני רכיבים המוסתרים בתוך הקופסה (אין לפתוח אותה):

רכיב אחד מחובר להדקים A ו-B, ורכיב אחר, מחובר להדקים A ו-C;

(2) אמפרמטר דיגיטלי בתחום 0 - 100 mA;

(3) וולטמטר דיגיטלי בתחום 0 - V20;

(4) נגד משתנה שהתנגדותו המרבית 15 - 20 אום, לזרמים של 0.5 A לפחות. [למשל הנגד המשתנה של תוכנית רחובות - מספר קטלוגי 0520];

(5) 7 תיילי הולכה;

(6) מקור מתח בעל כ"מ של כ V12 (ניתן להשתמש בסוללה בעלת כ"מ של V9);

(7) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).

הרכבת המערכת הניסויית

בנה מעגל חשמלי, **כולל מכשירי מדידה**, שבאמצעותו ניתן למדוד נתונים לצורך סרטוט אופיין של **אחד** הרכיבים שבקופסה. על המעגל להיות כזה שבאמצעותו ניתן יהיה לשנות את המתח בין קצות רכיב שבקופסה ברציפות מאפס לערכים גבוהים יותר.

ביצוע הניסוי

1. סרטט תרשים של המעגל חשמלי.
2. בצע מספר מדידות לסרטוט האופיין של הרכיב שמחובר להדקים A ו-B. על המדידות להתפרס על כל תחום המתחים האפשרי במעגל החשמלי שבנית.
3. הכן טבלה ורשום בה את תוצאות המדידות שביצעת.
3. בצע את ההוראות שבסעיף בעבור הרכיב שמחובר להדקים A ו-C.

ניתוח ממצאי הניסוי

4. א. סרטט במערכת צירים אחת, דיאגרמת פיזור (נקודות במערכת צירים) של המדידות שביצעת עבור כל אחד משני הרכיבים.
- ב. האם האופייניים של הרכיבים צריכים לעבור בראשית של מערכת הצירים? נמק.

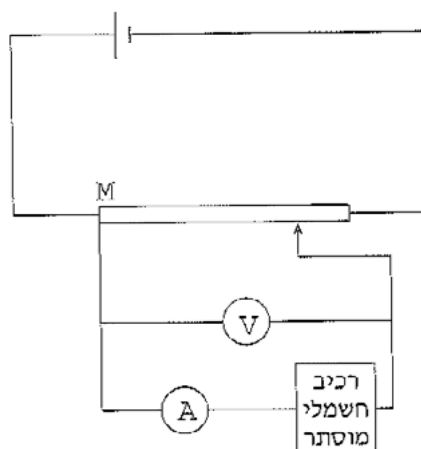
5. סרטט את שני האופיינים לפי הנקודות בדיאגרמת הפיזור שסרטטת.
6. א. איזה משני האופיינים מבטא יחס לשר בין הזרם לבין המתח?
נמק.
- ב. מצא מתוך האופיין שמבטא יחס ישר בין הזרם לבין המתח, את ההתנגדות של הרכיב.
7. האם ההתנגדות של הרכיב, שהזרם דרכו אינו נמצא ביחס ישר למתח, גדלה או קטנה עם עליית המתח עליו? הסבר.

שאלה

8. צייו דוגמה לרכיב חשמלי שהזרם דרכו נמצא ביחס ישר למתח, ודוגמה לרכיב חשמלי שהזרם דרכו אינו נמצא ביחס ישר למתח.

תוצאות של מדידות ותשובות לשאלות

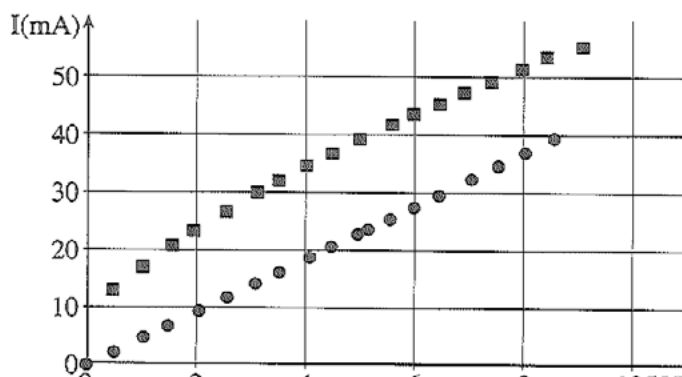
1. המעגל החשמלי שבנינו מתואר בתרשים 2.



2,3: תוצאות מדידות רשומות בטבלה 1.

הרכיב המחובר ל-A ו-C		הרכיב המחובר ל-A ו-B		מספר המדידה
I - זרם (mA)	V - מתח (V)	I - זרם (mA)	V - מתח (V)	
0	0	0	0	1
13.03	0.497	2.27	0.504	2
17.16	1.032	4.79	1.057	3
20.76	1.560	6.88	1.517	4
23.40	1.974	9.26	2.044	5
26.80	2.560	11.70	2.576	6
29.97	3.136	14.11	3.106	7
32.00	3.526	15.91	3.505	8
34.59	4.050	18.70	4.080	9
36.76	4.500	20.50	4.500	10
39.11	5.010	22.57	4.960	11
41.70	5.610	23.53	5.160	12
43.40	6.000	25.27	5.550	13
45.20	6.470	27.39	6.000	14
47.10	6.920	29.50	6.460	15
49.00	7.410	32.24	7.050	16
51.00	7.950	34.43	7.510	17
53.00	8.420	36.77	8.040	18
54.90	9.050	39.33	8.570	19

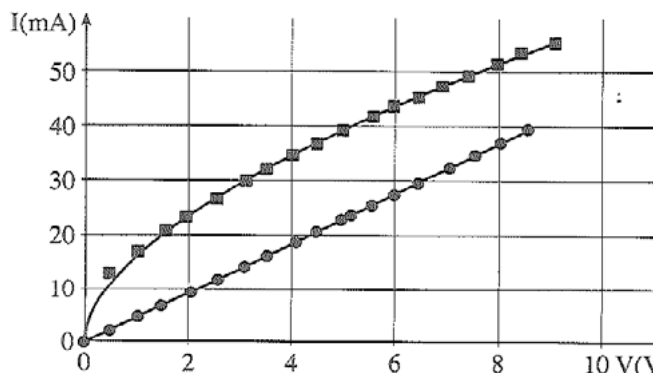
4. א. בתרשים 3 מתוארות שתי דיאגרמות הפיזור של שני הרכיבים.



סרטוט שתי עקומות בעלות ערכי X שונים במערכת צירים אחת, בעזרת Excel 97
 בונים תחילה את אחת העקומות. לאחר מכן מסמנים את הגרף, ובתפריט "תרשים"
 בוחרים באופציה "הוספת נתונים", ומסמנים את שתי העמודות של העקומה השנייה.

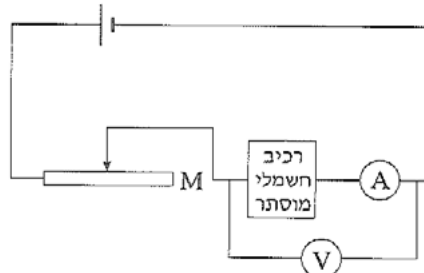
ב. האופיינים צריכים לעבור בראשית הצירים כיוון שלא עובר דרכם זרם כאשר אין מתח חשמלי בין קצות הרכיבים.

5. האופיינים מסורטטים בתרשים 4.



6. א. האופיין של הרכיב המחובר להדקים A ו-B מבטא יחס לשר בין הזרם לבין המתח, כיוון שהגרף המייצג את האופיין הוא קו ישר שעובר בראשית הצירים.
- ב. בעזרת גיליון אלקטרוני מצאנו כל משוואת הקו הישר המתאים לדיאגרמת הפיזור של הרכיב המחובר בין A ל-B היא:
- $$(1) I = 4.59 \cdot V - 0.09$$
- ריבוע מקדם המתאם הוא: $R^2 \approx 1$.
- מהתבוננות בגרף ובקשר (1), ניתן לראות כל האיבר החופשי בקשר (1) ניתן להזנחה. לכן נוכל לרשום את משוואת הישר כך:
- $$I = 4.59 \cdot V$$
- כאשר I נמדד במיליאמפר, ו-V נמדד בוולט.
- משוואת הישר המתאימה לערכי I הנמדדים ביחידה "אמפר" היא:
- $$(2) I = 0.00459 \cdot V$$
- $$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{0.00459} \approx 218 \, \Omega$$
- מכאן:
7. הזרם העובר מ-A ל-C אינו נמצא ביחס ישר למתח בין קצות הרכיב. השיפוע של המשיק בכל נקודה מייצג את הערך ההופכי להתנגדות. כיוון ששיפוע המשיק הולך וקטן, התנגדות הרכיב הולכת וגדלה.
8. דוגמה לרכיב חשמלי שבו הזרם נמצא ביחס ישר למתח הוא נגד "רגיל". דוגמה לרכיב חשמלי שבו הזרם אינו נמצא ביחס לשר למתח הוא נורת להט.

- הערות לגבי מעגלים חשמליים שיכולים לשמש בניסוי זה
1. במקום המעגל החשמלי המתואר בתרשים 2 (במעגל חשמלי זה הנגד המשתנה משמש כפוטנציומטר) ניתן היה לבנות מעגל חשמלי כמתואר בתרשים 5 (שבו הנגד המשתנה משמש כראוסטט).

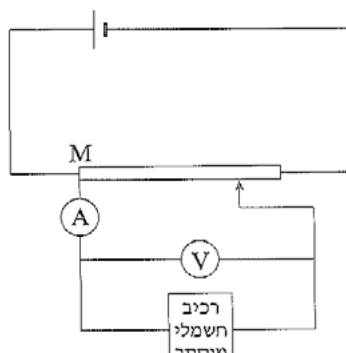


איזה משני המעגלים עדיף – הפוטנציומטרי או הראוסטטי?

לכל אחד משני המעגלים יש יתרון ויש חסרון:
יתרון המעגל הפוטנציומטרי (תרשים 2) מתבטא בכך שניתן להקטין בו את המתח בקצות הצרכן **באופן רציף עד אפס** (על-ידי הזזת המגע הנייד עד לנקודה M שבתרשים 2). במעגל הראוסטטי (תרשים 5) אפשר להקטין את המתח בקצות הצרכן עד ערך מינימלי כלשהו (באשר המגע הנייד בתרשים 5 נמצא ב-M) אך מתח זה אינו אפס; **לא ניתן להקטין את המתח החשמלי באופן רציף עד אפס**. זו הסיבה שלא השתמשנו במעגל זה בניסוי הנוכחי. אילו היינו משתמשים בו, לא היינו יכולים למדוד את הזרמים ברכיב המחובר ל-A ול-C המתאימים למתחים קטנים. יתכן כי במקרה כזה לא היינו מצליחים לזהות את אי-הלינאריות של האופיין המתאים לרכיב זה.

החסרון של המעגל הפוטנציומטרי הוא בכך שלא כל הזרם העובר דרך המקור עובר גם דרך הצרכן – חלק מן הזרם עובר דרך חלק הנגד המשתנה המחובר במקביל לצרכן. זרם זה גורם לבזבוז אנרגיה חשמלית. במעגל ראוסטטי, כל הזרם העובר דרך המקור עובר גם דרך הצרכן.

2. לרשותינו אמפרמטר וולטמטר מסויימים. במעגל הפוטנציומטרי ניתן לחבר אותם באופן המתואר בתרשים 2, וגם באופן המתואר בתרשים 6.



כיצד עדיף לחבר את מכשירי המדידה במעגל פוטנציומטרי – כמתואר בתרשים 2 או כמתואר בתרשים 6?

אמפרמטר נועד למדוד את הזרם העובר דרך הצרכן, וולטמטר נועד למדוד את המתח בקצות הצרכן.

במעגל החשמלי המתואר בתרשים 2 – האמפרמטר מודד בדיוק את הזרם העובר דרך הצרכן, ואילו הוולטמטר אינו מודד ממש את המתח בין קצות הצרכן, אלא את סכום המתחים בין קצות הצרכן ובין קצות האמפרמטר. **בתנאים שבהם משתמשים בצרכן שהתנגדותו גדולה ביחס להתנגדות האמפרמטר, שגיאת המדידה של הוולטמטר, תהיה קטנה.**

במעגל החשמלי המתואר בתרשים 6 הוולטמטר אכן מחובר לקצות הצרכן, והוא מודד בדיוק את המתח הנדרש. אולם האמפרמטר אינו מודד בדיוק את הזרם העובר דרך הצרכן, אלא את סכום הזרמים דרך הצרכן ודרך הוולטמטר (הזרם האמיתי העובר בצרכן קטן מזה שמורה האמפרמטר). **בתנאים שבהם משתמשים בצרכן שהתנגדותו קטנה מאוד ביחס להתנגדות הוולטמטר, שגיאת המדידה של האמפרמטר תהיה קטנה.**

לסיכום: הן במעגל הפוטנציומטרי המתואר בתרשים 2, והן במעגל הפוטנציומטרי המתואר בתרשים 6 – אחד ממכשירי המדידה קורא את הגודל הנדרש, והמכשיר האחר אינו קורא בדיוק את הגודל הנדרש. כאשר עומדים לרשותינו אמפרמטר וולטמטר מסוימים, נשתמש במעגל הפוטנציומטרי המתואר בתרשים 2 עבור צרכנים בעלי התנגדות גדולה, ובמעגל הפוטנציומטרי המתואר בתרשים 6 עבור צרכנים בעלי התנגדות קטנה. כך נבטיח ששגיאת המדידה של המכשיר שאינו קורא בדיוק את הגודל המבוקש תהיה קטנה.

חקר 14

פריק של קבל טעון



שאלת חקר

קבל חשמלי נפרק דרך נגד.

כיצד משתנה המתח בין לוחות הקבל כפונקציה של הזמן?

העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקולך.

תכנון מערך ניסוי

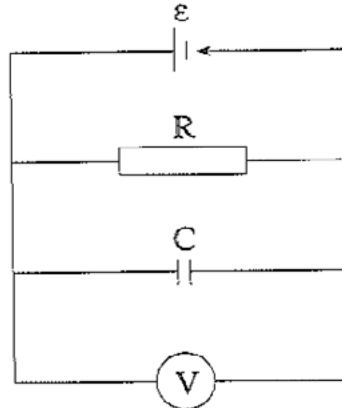
1. תכנן מערך ניסוי, שעל-פי ממצאיו ניתן לענות על שאלת החקר. ציין איזה משתנה הוא בלתי תלוי, ואיזה משתנה הוא תלוי.

רשימת כלי המחקר

- (1) מקור מתח ישר של $V_{1.5}$ (ספק או סוללה טרייה בתוך בית סוללות);
- (2) קבל אלקטרוליטי שקיבולו C הרשום הוא כ- $\Theta F5000$;
[למשל הקבל האלקטרוליטי של ציוד רחובות, מספר קטלוגי 0560]
- (3) נגד בעל התנגדות R ידועה (של כ- 3000Ω , להספק כלשהו);
[למשל הנגד שהתנגדותו 2700Ω בתיבת הנגדים של ציוד רחובות – מספר קטלוגי 0720];
- (4) וולטמטר אנלוגי לזרם ישר בתחום $0 - V_3$;
- (5) 6 תיילי הולכה עם "בננות" בעלות כניסה נוספת;
- (6) שעון עצר;
- (7) גיליון אלקטרוני.

בניית המערכת הניסויית

בנה את המעגל הפתוח המתואר בתרשים 1.



הערה: כדי שלא ייווצר מגע בין מצבטי התנין האוחזים בהדקי הקבל (מגע שיגרום לקצר בין לוחות הקבל), כדאי להניח את הקבל על הצד העגול שלו, ולהימנע מהזזתו בשעת ביצוע המדידות.

ביצוע הניסוי

1. כדי לטעון את הקבל, סגור את המעגל שבנית על-ידי הכנסת הבננה החופשית לשקע המתאים במקור המתח (אם מקור המתח הוא ספק – הפעל אותו לפני הכנסת הבננה לשקע המתאים). מדוד ורשום את המתח שמראה הוולטמטר.
2. פתח את המעגל על-ידי הוצאת "בננה" מאחד השקעים של מקור המתח, ועקוב אחרי תנועת מחוג הוולטמטר במשך כחצי דקה. האם ירידת המתח כפונקציה של הזמן היא לינארית?
3. חזור וטען את הקבל במתואר בסעיף 2. החל לפרוק את הקבל על-ידי פתיחת המעגל, ומדוד בעזרת שעון העצר את הזמן עד שהמתח על הקבל יורד ל- $V_{1.1}$.
4. (יש להקפיד על כך שפתיחת המעגל תיעשה בו זמנית עם הפעלת שעון העצר).
5. חזור שלוש פעמים נוספות על תהליכי הטעינה והפריקה של הקבל, ומדוד את הזמן העובר מתחילת הפריקה (כלומר מרגע פתיחת המעגל) עד שהמתח על הקבל יורד ל- $0.8V$, ל- $0.6V$, ול- $0.3V$. רשום את תוצאות מדידותיך בטבלה מתאימה.

ניתוח מימצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

6. א. סרטט דיאגרמת פיזור של המתח V בין לוחות הקבל כפונקציה של הזמן t מרגע בו התחילה פריקת הקבל.
 ב. תאר במילים את המסקנות האמפיריות בדבר השתנות המתח כפונקציה של הזמן.

השוואה בין המסקנות האמפיריות ותיאוריה

ידוע כי המתח בין לוחות קבל בשעת פריקתו מיוצג על-ידי
$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

- המכפלה RC מכונה "קבוע הזמן" של המעגל.
 7. האם דיאגרמת הפיזור שקבלת על-פי סעיף 6 נראית לך תואמת לנוסחה (1)? נמק.
 8. א. באמצעות הגיליון האלקטרוני, הוסף לדיאגרמת הפיזור של המתח V כפונקציה של t (סעיף 6 לעיל) עקומה מעריכית המתאימה ביותר לנקודות הניסויים.
 ב. מצא את משוואת העקומה, ואת ריבוע מקדם המיתאם.
 ג. על-פי משוואת העקומה, מצא את הערך של קבוע הזמן RC של המעגל.
 9. א. בנה בגיליון האלקטרוני עמודה של ערכי $\ln V$.
 ב. סרטט גרף של $\ln V$ כפונקציה של הזמן t .
 ג. מצא את משוואת הקו שהתקבל, ואת ריבוע מקדם המיתאם.
 ד. קבע על-פי משוואת הקו את הערך של קבוע הזמן RC של המעגל. השווה עם הערך שמצאת בסעיף 8ג.

שאלות

10. הסתמך על קיבול הקבל הרשום עליו, וחשב את ההתנגדות הכוללת של המעגל. מדוע שונה התוצאה שקיבלת מן הערך הידוע של התנגדות הנגד R ? (תן הסבר פיזיקלי, ולא כזה הנסמך על שגיאות מדידה).
 11. בניח שאתה מוציא את הנגד R מתוך המעגל, ומבצע את כל המדידות לפי הסעיפים 2 עד 5 לעיל; כיצד היו משתנות תוצאות מדידותיך בהשוואה למה שקיבלת במדידות שביצעת כאשר הנגד R היה במעגל? נמק.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. בונים מעגל חשמלי שבו קבל נפרק דרך נגד. עבור רגעים שונים, t , במהלך הפריקה מודדים את המתח בין הדקי הקבל. לאחר מכן מנסים להתאים פונקציה שתקשר בין שני המשתנים. המשתנה הבלתי תלוי הוא t והמשתנה התלוי הוא V .

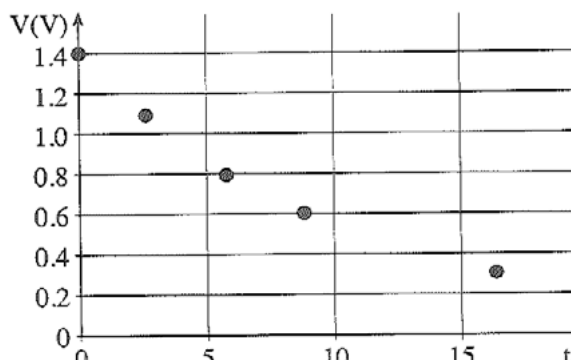
2. הוריית הוולטמטר: $V_{1.4}$.

3. ירידת המתח כפונקציה של הזמן אינה לינארית.

4-5. תוצאות המדידות מתוארות בשתי העמודות הימניות שבטבלה 1.

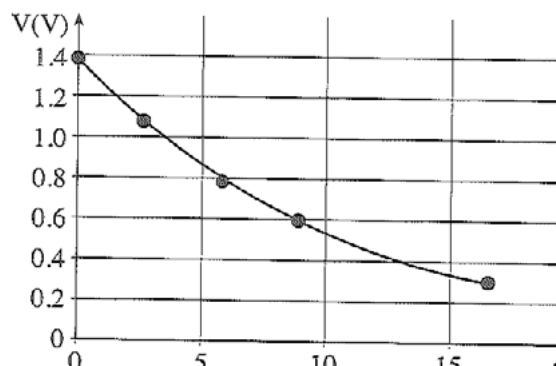
$\ln V$	מתח - V (V)	זמן - t (s)
0.336	1.4	0
0.095	1.1	2.68
0.223-	0.8	5.83
0.511-	0.6	8.90
0.511-	0.3	16.36

6. א. בתרשים 2 מתוארת דיאגרמת פיזור של המתח V כפונקציה של הזמן t .



ב. המתח יורד כפונקציה של הזמן. ככל שהזמן חולף קצב ירידת המתח הולך וקטן.

7. צורת דיאגרמת הפיזור שבתרשים 2 תואמת את נוסחה (1), כי על-פי נוסחה (1) הקשר בין המתח והזמן הוא קשר מעריכי יורד, וכך זה נראה בתרשים 2.
8. א. בתרשים 3 מתוארת העקומה המעריכית המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור.



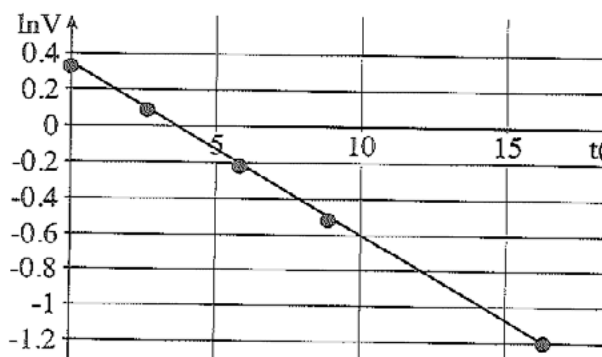
ב. משוואת העקומה כפי שהתקבלה באמצעות גיליון אלקטרוני:

$$V = 1.4008 \cdot e^{-0.0945 t}$$

ג. מהשוואה בין קשר (2) ובין קשר (1), ניתן לראות כי:

$$-\frac{1}{RC} = -0.0945 \Rightarrow RC \approx 10.6 \text{ s}$$

9. א. עמודה של ערכי $\ln V$ מופיעה בטבלה 1 לעיל.
- ב. תרשים 4 הוא גרף של $\ln V$ כפונקציה של הזמן t .



ג. משוואת הישר שהתקבל היא:

$$(3) \ln(V) = -0.0945 \cdot t + 0.3371$$

כאשר t נמדד בשניות ו- V בוולט.

(ריבוע מקדם המיתאם הוא $R^2 = 0.9998$).

ד. כדי למצוא מה מייצגים הקבועים המופיעים בקשר (3) נרשום שוויון בין ערכי ה- $\ln$ של אגף ימין של משוואה (1) לבין ערכי ה- $\ln$ של אגף שמאל של משוואה (1). לאחר מספר פעולות אלגבריות

$$(4) \ln(V) = -\frac{1}{RC} \cdot t + \ln(V_0) \quad \text{(שימוש בחוקי ה- $\ln$) נמצא כי}$$

מהשוואה בין קשר (4) ובין קשר (3), ניתן לראות כי:

$$-\frac{1}{RC} = -0.0945$$

$$RC \approx 10.6 \text{ s}$$

מכאן נקבל כנדרש כי:

$$10. \text{ הערך הרשום על הקבל הוא } C = -4.7 \text{ mC. נציב ערך זה בקשר (5):}$$

$$R \cdot 4.7 \cdot 10^{-3} = 10.6$$

$$R \approx 2250 \Omega$$

ונקבל:

הערך הידוע של הנגד הוא $R = 2700 \Omega$. התוצאה שהתקבלה

בניסוי שונה מן הערך הידוע של R כיוון **שהקבל נפרק גם דרך**

הוולטמטר.

11. במקרה זה פריקת הקבל היתה מתרחשת רק דרך הוולטמטר.

התנגדות הוולטמטר גדולה מן ההתנגדות השקולה של הנגד ושל

הוולטמטר המחוברים במקביל, לכן קצב הפריקה רק דרך הוולטמטר יהיה

איטי יותר. ירידת המתח ל- $V_{1.1}$ לדוגמה, תמשך זמן רב מאשר במצב שבו

הנגד מחובר.

חקר 15

השדה המגנטי של מגנט מוט

שאלת חקר



בוחנים את השדה המגנטי הנוצר על-ידי מגנט מוט, לאורך ציר המגנט.

ביצד משתנה השדה כפונקציה של המרחק מן המגנט?

העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקולריך.

תכנון מערך ניסוי

1. בתרשים 1 מתואר מצפן הניצב על הציר של מגנט מוט. מחט המצפן סוטה מהכיוון צפון-דרום המגנטי בגלל השפעת המגנט.
 - א. העתק את תרשים המצפן, וסרטט בו חצים המייצגים את השדות המגנטיים ואת הכוחות שהם מפעילים על הקטבים של מחט המצפן.
 - ב. הראה כי טנגנס זווית הסטייה של המחט מכיוון צפון-דרום המגנטי פרופורציוני לעוצמת השדה המגנטי של מגנט המוט. רשום קשר מתמטי בין שני המתשנים.
 - ג. תכנן מערך ניסוי שבעזרתו ניתן לענות על שאלת החקר.

רשימת כלי המחקר

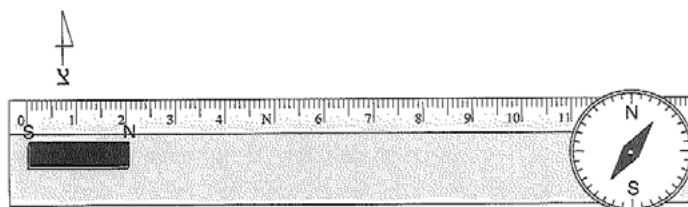
- (1) מגנט מוט;
- (2) מצפן;
- (3) סרגל מכויל באורך 100 ס"מ (מחומר שאינו נמשך אל מגנט);
- (4) זכוכית מגדלת;
- (5) סרט הדבקה;
- (6) גיליון אלקטרוני.

בניית המערכת הניסויית

- א. הנח את מגנט המוט על הסרגל, כך ששניהם יהיו מאונכים לכיוון צפון-דרום המגנטי.
- ב. הצמד, בעזרת סרט הדבקה, את הסרגל אל השולחן ואת המגנט אל הסרגל.

ביצוע הניסוי

2. הנח את המצפן במקומות שונים על הסרגל, מצידו האחד של המגנט, כך שמרכז המצפן ימצא על ציר המגנט, וכך שהמרחק r ממרכז המצפן למרכז המגנט יהיה גדול מאוד ביחס לאורך המגנט (תרשים 1). מדוד בכל פעם את המרחק r ואת הזווית θ בין כיוון מחט המצפן לבין הכיוון צפון-דרום. לשם קריאה מדויקת של הזווית השתמש בזכוכית מגדלת. רשום את תוצאות המדידות בטבלה בת שלוש עמודות: בעמודה הראשונה – ערכי r , ובשנייה הערכים המתאימים של θ .

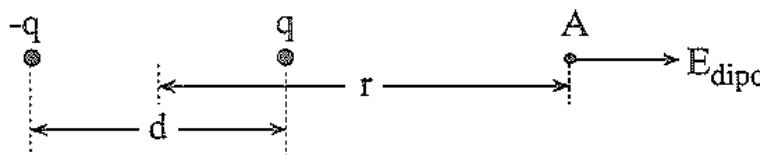


ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

3. חשב את הערכים של $\tan(\theta)$, ורשום אותם בעמודה השלישית של הטבלה.
4. סרטט דיאגרמת פיזור של ערכי $\tan(\theta)$ כפונקציה של r .
5. סרטט עקומה המתאימה לדיאגרמת הפיזור, ומצא את משוואת העקומה ואת ריבוע מקדם המיתאם.
6. העזר בקשרים שמצאת בסעיפים (1) ו-(5), ונסח מסקנה אמפירית בדבר השתנות השדה המגנטי כפונקציה של המרחק r ממרכז המגנט (שים לב, הקשר שמצאת מתאים לתנאי הניסוי, כלומר למצבים שבהם מרחק המצפן מן המגנט גדול ביחס לאורך המגנט).

מודל לשדה מגנטי הנוצר לאורך הציר של מגנט מוט

נתבונן תחילה בשדה חשמלי הנוצר על-ידי זוג מטענים שווים גודל ושונים סימן (מערך כזה מכונה דיפול חשמלי). בתרשים 2 מתואר דיפול חשמלי, שבו המרחק בין המטענים הוא d . נקודה A נמצאת על ציר הדיפול, במרחק r ממרכזו.

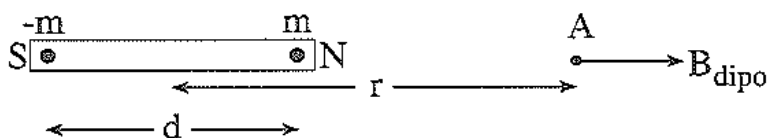


המטען החיובי של הדיפול החשמלי יוצר ב-A שדה חשמלי המכוון ימינה, והמטען השלילי יוצר ב-A שדה חשמלי המכוון שמאלה. עוצמת השדה

הכולל בנקודה A ניתנת על-ידי הביטוי:

$$E_{\text{dipole}} = k \frac{q}{(r - \frac{d}{2})^2} - k \frac{q}{(r + \frac{d}{2})^2} \quad (1)$$

עתה, נבנה מודל לשדה המגנטי של מגנט: נניח כי הכוחות שהמגנט מפעיל על גופים מקורם בשני קטבים מגנטיים נקודתיים – קוטב מגנטי צפוני, N, שעוצמתו תסומן ב- m (באנלוגיה למטען חשמלי q), וקוטב מגנטי דרומי, S, שעוצמתו $(-m)$ (תרשים 3). מערך זה מכונה **דיפול מגנטי**.



בנוסף לכך נניח כי הכוח בין קטבים מגנטיים מתנהג בדומה לכוח בין מטענים חשמליים, כלומר הכוח המגנטי מקיים חוק דמוי חוק קולון. במסגרת הנחה נרשום כי השדה המגנטי B_{pole} הנוצר על-ידי קוטב מגנטי יחיד שעוצמתו m , ניתן על-ידי הביטוי:

$$B_{\text{pole}} = \frac{m}{r^2} \quad (2)$$

הערה: נשים לב שמדובר **במודל**. במציאות, לא ניתן להפריד בין קוטב מגנטי צפוני לבין קוטב מגנטי דרומי.

השוואה בין המסקנות האמפיריות ותיאוריה

7. הראה, על סמך המודל (ולא על סמך תוצאות המדידות), כי עוצמת השדה המגנטי, B_{dipole} , בנקודה הנמצאת לאורך מוט מגנטי שאורכו d , במרחק r ממרכזו (תרשים 3) נתונה על-ידי:

$$(3) \quad B_{\text{dipole}} = \frac{m}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2} - \frac{m}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2}$$

כאשר: m – עוצמתו המגנטית של כל אחד מן הקטבים;

d – אורך המגנט.

8. העזר בנוסחה (3) ובתנאי $r \gg d$, והראה כי מתקיים הקשר:

$$(4) \quad B_{\text{dipole}} \approx \frac{\text{קבוע}}{r^3}$$

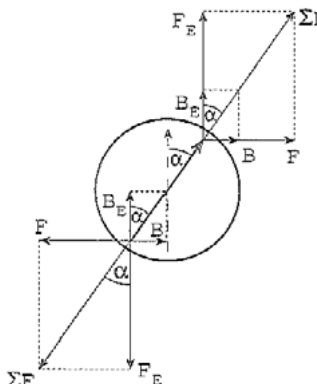
9. השווה בין התבנית המתמטית שמצאת בסעיף (6) לעיל לבין התבנית שבסעיף (8) לעיל. ציין סיבות אפשריות להבדל בין התבניות.

שאלה

10. בהנחיות לבניית המערכת הניסויית נאמר להניח את מגנט המוט על הסרגל, כך ששניהם יהיו מאונכים לכיוון צפון-דרום המגנטי (ראה "בניית המערכת הניסויית", סעיף א). מדוע לא נאמר להניח את מגנט המוט בכיוון מזרח-מערב?

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. א. בתרשים 4 מתוארים השדות המגנטיים הפועלים על מחט המצפן.



באשר: B - השדה המגנטי הנוצר על-ידי המגנט;

$$\tan(\theta) = \frac{B}{B_E} \quad \text{הרכיב האופקי של השדה המגנטי}$$

ב. על-פי תרשים 4 נרשום את הקשר: $\tan(\theta) = \frac{B}{B_E}$ (5)

ג. נציב מצפן על ציר המגנט, במרחקים שונים מהמגנט. לכל מרחק

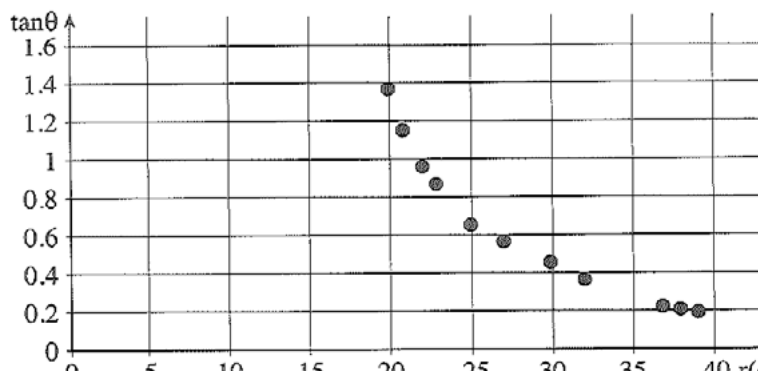
נמדוד את זווית הסטייה של מחט המצפן, ונחשב את הטנגנס של

זווית זו. נחפש קשר בין טנגנס הזווית לבין מרחק המצפן מהמגנט.

2-3: תוצאות מדידות וחישובים רשומות בטבלה 1.

$\tan(\theta)$	θ (°)	r (cm)
1.376	54	20
1.150	49	21
0.966	44	22
0.869	41	23
0.649	33	25
0.566	29.5	27
0.445	24	30
0.364	20	32
0.213	12	37
0.194	11	38
0.176	10	39

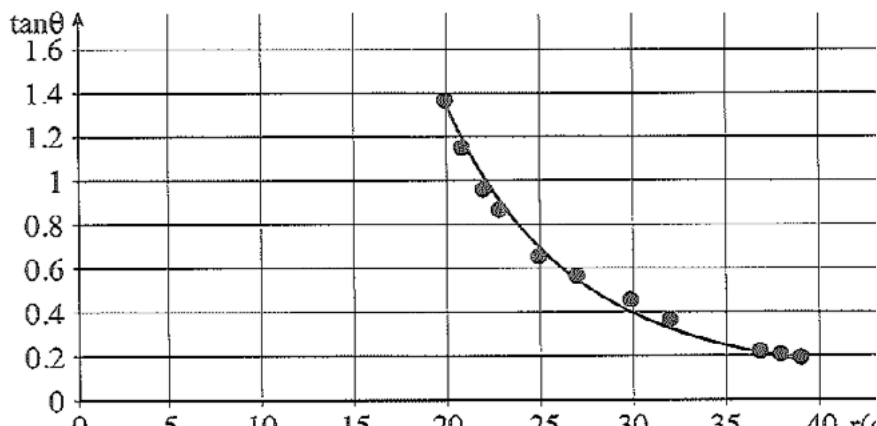
4. בתרשים 5 מתוארת דיאגרמת פיזור של $\tan(\theta)$ כפונקציה של r .



5. נשער כי הפונקציה המתאימה לדיאגרמת הפיזור היא פונקציית חזקה שתבניתה היא $\tan(\theta) = ar^b$ (כאשר b שלילי). זו האפשרות הפשוטה ביותר. נבחן השערה זו, ואם נמצא אותה מתאימה – נחשב את מעריך החזקה b . נציע שתי דרכים למציאת הפונקציה.

דרך א: התאמת עקומת חזקה לדיאגרמת הפיזור

בגיליון האלקטרוני נבחר באפשרות של "התאמת פונקציית חזקה", ונוסיף לדיאגרמת הפיזור סרטוט של עקומת החזקה המתאימה ביותר. העקומה שהתקבלה מתוארת בתרשים 6.



משוואת העקומה, כפי שהתקבלה באמצעות הגיליון האלקטרוני:

$$(6) \tan(\theta) = \frac{9467}{r^{2.96}}$$

כאשר r נמדד בס"מ. ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9945$.

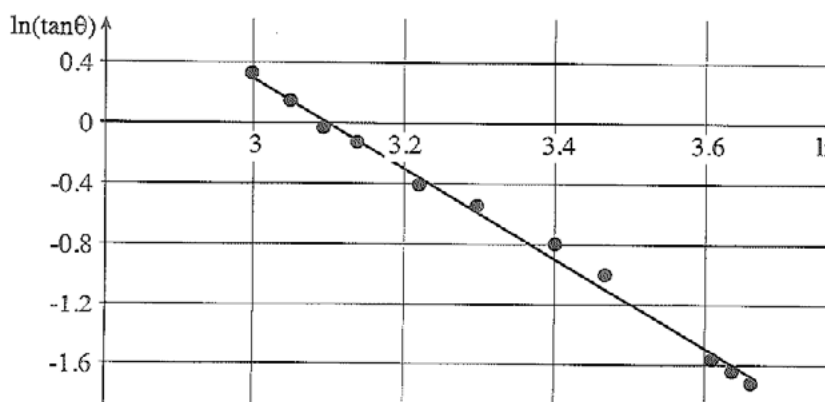
דרך ב: חקירה הקשר בין ערכי $\ln(\tan(\theta))$ לבין ערכי $\ln(r)$.

נוסיף לטבלה 1 את ערכי $\ln(r)$ ואת ערכי $\ln(\tan(\theta))$ תוצאות

החישובים רשומות בטבלה 2.

$\ln(\tan(\theta))$	$\ln(r)$	$\tan(\theta)$	θ (°)	r (cm)
0.319	2.996	1.376	54	20
0.140	3.045	1.150	49	21
-0.035	3.091	0.966	44	22
-0.140	3.135	0.869	41	23
-0.432	3.219	0.649	33	25
-0.570	3.296	0.566	29.5	27
-0.809	3.401	0.445	24	30
-1.011	3.466	0.364	20	32
-1.549	3.611	0.213	12	37
-1.638	3.638	0.194	11	38
-1.735	3.664	0.176	10	39

בחרשים 7 מתוארת דיאגרמת הפיזור של ערכי $\ln(\tan(\theta))$ כפונקציה של ערכי $\ln(r)$.



התאמנו בעזרת הגיליון האלקטרוני את הישר המתאים ביותר.

$$(7) \ln(\tan(\theta)) = -2.96 \cdot \ln(r) + 9.1$$

משוואת הישר:

$$R^2 = 0.9945$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9945$.

ממשוואה (7) ניתן לקבל את משוואה (6).

מהתוצאות הניסיוניות קבלנו, אם כן, כי טנגנס זווית הסטיה של מחט

המצפן פרופורציוני הפוך למרחק המצפן ממרכז המגנט בחזקה 2.96.

6. מקשרים (5) ו-(6) נקבל כי:

$$(8) B = \frac{\text{קבוע}}{r^{2.96}}$$

מסקנה אמפירית: השדה המגנטי של מגנט מוט, לאורך ציר המגנט,

משתנה ביחס הפוך למרחק הנקודה ממרכז המגנט בחזקה 2.96. כלל זה

התקבל עבור מצבים שבהם המרחק מהמגנט גדול ביחס לאורך המגנט.

7. נמצא תחילה ביטוי לשדה המגנטי הנוצר על-ידי הקוטב המגנטי

הצפוני. נקודה הנמצאת במרחק r ממרכז המגנט, נמצאת במרחק $r - d/2$

מן הקוטב הצפוני. לכן את השדה המגנטי הנוצר על-ידי הקוטב הצפוני

$$B_N = \frac{m}{(r - \frac{d}{2})^2}$$

ניתן לבטא כך:

באופן דומה, השדה המגנטי הנוצר על-ידי הקוטב המגנטי הדרומי:

$$B_S = \frac{m}{(r + \frac{d}{2})^2}$$

B_N גדול מ- B_S , לכן כיוון השדה המגנטי הנוצר על ידי שני הקטבים (כלומר

$$B_{\text{dipole}} = \frac{m}{(r - \frac{d}{2})^2} - \frac{m}{(r + \frac{d}{2})^2}$$

על-ידי הדיפול) הוא בכיוון B_N , וגודלו:

8. לאחר שמבצעים מספר פעולות אלגבריות פשוטות על אגף ימין של

$$B_{\text{dipole}} = \frac{2mrd}{(r^2 - \frac{d^2}{4})^2}$$

המשוואה האחרונה מקבלים:

(9)

$r \gg d$, לכן המחובר $d^2/4$ המופיע במכנה של קשר (9) קטן מאוד ביחס

ל- r^2 ,

ולכן נוכל להזניח אותו, ונקבל:

$$B_{\text{dipole}} \approx \frac{2\mu_0 m d}{(r^2)^3}$$

בלומר:

$$B_{\text{dipole}} \approx \frac{\mu_0 m}{r^3}$$

מצאנו איפוא, כי על-פי המודל שבנינו, השדה המגנטי של מגנט מוט, לאורך ציר המגנט, משתנה ביחס הפוך לחזקה השלישית של מרחק הנקודה ממרכז המגנט. כלל זה נכון בקירוב, והקירוב טוב יותר ככל שהמרחק מהמגנט גדול ביחס לאורך המגנט.

9. בסעיף (5) מצאנו, באופן אמפירי, כי השדה המגנטי נמצא ביחס הפוך ל- $r^{2.96}$. בסעיף (8) מצאנו, על-סמך המודל, כי השדה המגנטי נמצא ביחס הפוך ל- r^3 . סיבות אפשריות להבדל:
 - א. יש אי-ודאות בקריאת מרחקים באמצעות סרגל, ובקריאת זוויות במצפן.
 - ב. המודל אינו מתאר בדיוק מוחלט את המציאות.
10. המצפן מצביע לכיוון הצפון המגנטי. ברוב המקומות על פני הארץ כיוון הצפון המגנטי שונה מכיוון הצפון הגאוגרפי. לכן כיוון מזרח-מערב (גאוגרפי) שונה מהכיוון המאונך לצפון-דרום מגנטי.

חקר 16 השדה המגנטי של תיל ישר וארוך



שאלת חקר

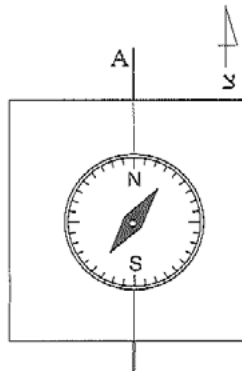
האם השדה המגנטי הנוצר על-ידי זרם העובר בתיל ישר וארוך תלוי במרחק מן התיל?
אם כן – מה הקשר בין השדה המגנטי לבין המרחק מן התיל?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

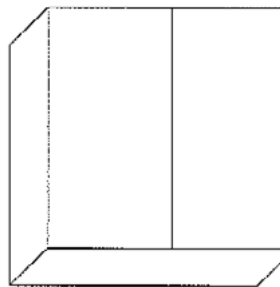
1. תרשים 2 מתאר מצפן הניצב מעל תיל ישר וארוך הנושא זרם. מחט המצפן סוטה מהכיוון צפון-דרום המגנטי בגלל השפעת השדה המגנטי הנוצר על-ידי הזרם בתיל.



- א. העתק את תרשים המצפן, וסרטט בו חצים המייצגים את האודות המגנטיים ואת הכוחות שהם מפעילים על הקטבים של מחט המצפן.
- ב. הראה כי טנגנס זווית הסטייה של מחט המצפן מכיוון צפון-דרום המגנטי פרופורציוני לעוצמת השדה המגנטי הנוצר על-ידי הזרם בתיל. רשום קשר מתמטי בין שני המשתנים.
- ג. תכנן מערך ניסוי שבעזרתו ניתן לענות על שאלת החקר.

רשימת בלי המחקר

- (1) נגד משתנה בעל הספק גבוה [למשל הנגד המשתנה של תוכנית רחובות - מספר קטלוגי 0520];
- (2) מקור מתח ישר היכול לספק זרם שעוצמתו A_4 כאשר הנגד המשתנה המתואר בפריט (1) לעיל מחובר אליו [הספק הסטנדרטי המצוי בבתי הספר מתאים];
- (3) מצפן בעל מחט שאורכה כ- 3 cm;
- (4) אמפרמטר בתחום 0 - 5 אמפר (רצוי דיגיטלי);
- (5) 3 תילי הולכה עם "בננות" בקצותיהם; אורכו של אחד התילים 2-3 מטר;
- (6) סרט הדבקה באורך של כ- 20 cm;
- (7) שתי פיסות קרטון מלבניות: כל פיסה בעלת ממדים של $8 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ בערך, ועוביה שווה לפחות לקוטר התיל הארוך המוזכר בפריט (5) לעיל;
- (8) 5 פיסות קלקר: כל פיסה בעלת ממדים של $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ בערך, ועוביה כ- 0.3 ± 1.5 (1.5 cm ס"מ). על אחת הפיסות מסורטט קו (תרשים 1).

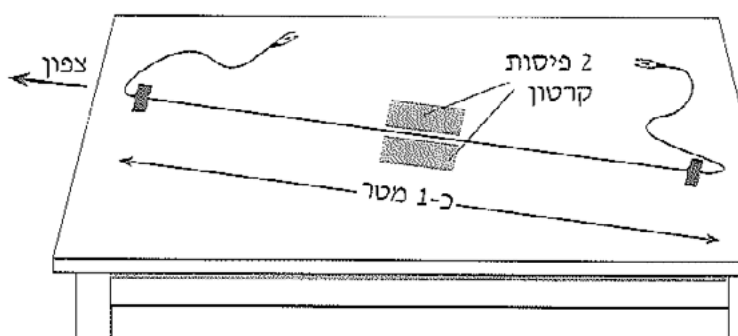


- (9) סרגל עץ שאורכו 1 מ' לפחות (אין צורך שיהיה עם שנתות);
 - (10) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).
- הערה:** את הניסוי יש לערוך על שולחן עץ (ללא חלקים בעלי תכונות מגנטיות).

בניית המערכת הניסויית

א. מתח את התיל הארוך על השולחן בכיוון צפון-דרום (מגנטי), הצמד לשולחן קטע מהתיל, באורך של כ-1 מטר, באמצעות 2 סרטי הדבקה, כמתואר בתרשים 3.

הערה: אם השולחן מונח כך שהכיוון צפון-דרום הינו לרוחב השולחן, סובב אותו כך שאורכו יהיה בכיוון צפון-דרום. אם אין אפשרות לסובב את השולחן, הצמד את הסרגל בעזרת 2 סרטי הדבקה, כך שהסרגל והתיל יהיו בכיוון צפון-דרום.



ב. בנה מעגל חשמלי בו מחוברים הרכיבים החשמליים הבאים בטור למקור המתח: נגד משתנה, אמפרמטר, והתיל המוליך (המוזכר בסעיף א לעיל).

ג. התאם את הרכיבים כך שהאמפרמטר יורה על זרם של 3 - 4 אמפר, וכבה את מקור המתח.

ד. הצב את 2 פיסות הקרטון לצדי התיל, בקטע הנמצא בין שתי נקודות ההדבקה (ראה תרשים 2). הערה: אם הצמדת את התיל לסרגל, תצטרך אולי להשתמש במספר גדול יותר של פיסות קרטון.

ה. הנח פיסת קלקר שעליה מסורטט קו ישר על פיסות הקרטון ועל התיל, כך שהקו המסורטט על הקלקר יהיה מקביל לתיל ויימצא מעליו. הנח את המצפן על הקלקר כך שהשננות 0° ו- 180° תהיינה במדויק מעל הקו.

שים לב: התיל (כשלא עובר בו זרם) צריך להיות מכוון בכיוון מחט המצפן.

ביצוע הניסוי

2. סרטט את המעגל החשמלי שבנית.

3. מדוד ורשום את קריאת האמפרמטר, את עוביה של פיסת קלקר אחת, ואת גובה מחט המצפן מעל תחתית המצפן.

4. הכן טבלה שבה תוכל לרשום נתונים אלה:
- n – מספר פיסות הקלקר עליהן נמצא המצפן;
 r – גובה מחט המצפן מעל תחתית המצפן (מעל התיל).
 α_1 – זווית הסטייה של הקוטב הצפוני של מחט המצפן במגמת סיבוב מחוגי השעון;
 α_2 – זווית הסטייה של הקוטב הצפוני של מחט המצפן נגד מגמת סיבוב מחוגי השעון;
 – ממוצע הזוויות α_1, α_2 ;
 $\tan$ – טנגנס ממוצע הזוויות.
 5. א. הפעל את מקור המתח כך שהקוטב הצפוני יסטה במגמת סיבוב מחוגי השעון. רשום בטבלה את זווית הסטייה α_1 .
 ב. בצע פעולה שתגרום לכך שהקוטב הצפוני של מחט המצפן יסטה נגד מגמת סיבוב מחוגי השעון בהשפעת הזרם. רשום בטבלה את זווית הסטייה α_2 .
 6. רשום מהי הפעולה שביצעת בסעיף 5.
 7. הוסף פיסת קלקר מתחת לפיסת הקלקר שעליה מונח המצפן, וחזור על סעיף 5.
 8. הוסף פיסות קלקר (עד 5), וחזור על סעיף 5 לכל הגבהה של המצפן.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

9. השלם בטבלה את הערכים של $\tan - r$.
 10. סרטט דיאגרמת פיזור של $\tan$ כפונקציה של n (מספר פיסות הקלקר).
 11. א. התאם עקומה לדיאגרמת הפיזור.
 ב. מצא את משוואת העקומה ואת ריבוע מקדם המיתאם.
 ג. השתמש בקשר שמצאת בסעיף 11, ובקשר שמצאת בסעיף 10, ונסח מסקנה אמפירית בדבר הקשר בין עוצמת השדה המגנטי B_1 והמרחק r מהתיל.

השוואה בין המסקנות האמפיריות לתיאוריה

12. נוסחת עוצמת שדה מגנטי בקרבת תיל ישר וארוך הנושא זרם:

$$(1) \quad B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} \quad \text{באשר: } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (ביחידות S.I.)}$$

השווה בין התבנית המתמטית שמצאת בסעיף ווג לעיל, לבין נוסחה (1).
ציין סיבות אפשריות להבדל בין התבניות.

שאלות

13. חשב, על-פי תוצאות הניסוי, את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ במקום שבו נערך הניסוי.

14. מדוע ניתנה ההנחיה למדוד את זווית הסטייה פעמיים – פעם כשהסטייה היא במגמת סיבוב מחוגי השעון, ופעם נגד מגמת סיבוב מחוגי השעון?

15. בסעיף ד לעיל (בחלק "בניית המערכת הניסויית") נאמר, שיש להעמיד את המצפן בערך באמצע בין שתי נקודות ההדבקה. מדוע הממצאים יכולים להיות שונים, אם המצפן יוצב סמוך לאחת מנקודות ההדבקה?

16. במצב המתואר בתרשים 2, האם הזרם בתיל עובר מ-A ל-B או מ-B ל-A? נמק.

17. נניח כי מניחים בניסוי את המצפן במרחק לא גדול מן התיל, כך שמחוג המצפן הוא בגובה התיל, ומעבירים זרם בתיל. האם במקרה זה תסטה מחט המצפן מכיוון צפון-דרום? הסבר.

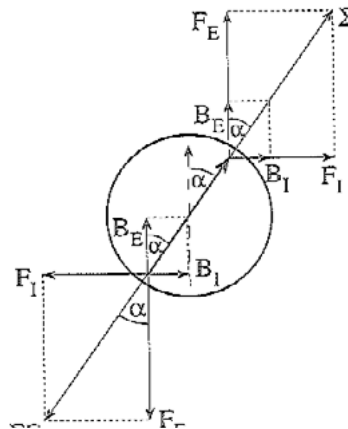
18. אילו היית חוזר בדייקנות על הניסוי במקום גיאוגרפי אחר, האם ערכי הזוויות שהתקבלו היו זהים לערכים כאן? נמק.

19. א. נסח שאלת חקר נוספת שניתן לחקור באמצעות כלי המחקר שבניסוי זה.

ב. תאר את מערך המחקר.

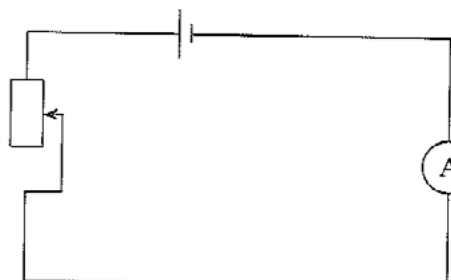
תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. א. בתרשים 4 מתוארים חצים המייצגים את השדות המגנטיים והכוחות הפועלים על הקטבים של מחט המצפן: על הקוטב המגנטי הצפוני של המחט פועלים: א. הרכיב האופקי של השדה המגנטי (B_E) של כדור הארץ. רכיב זה מצביע לכיוון צפון. ב. השדה המגנטי שנוצר על-ידי הזרם (B_I). שדה זה פועל בקירוב בכיוון ניצב לכיוון צפון-דרום המגנטי (אילו הקוטב הצפוני של מחט המצפן היה נמצא בדיוק מעל התיל - השדה בו היה בדיוק בכיוון זה). הכוחות המגנטיים פועלים על הקוטב הצפוני בכיוון השדות.
- על הקוטב הדרומי פועלים שדות מגנטיים באותם הכיוונים, אלא שכיווני הכוחות שהם הפעילים מנוגדים לכיווני השדות.



$$\frac{B_I}{B_E} = \tan \alpha$$

- ב. על-פי תרשים 4:
- ג. נציב מצפן מעל התיל, במרחקים שונים ממנו. לכל מרחק נמדוד את זווית הסטייה של המחט, ונחשב את הטנגנס של זווית זו. נחפש קשר בין טנגנס הזווית לבין מרחק המצפן מן התיל.
2. המעגל החשמלי מתואר בתרשים 5.

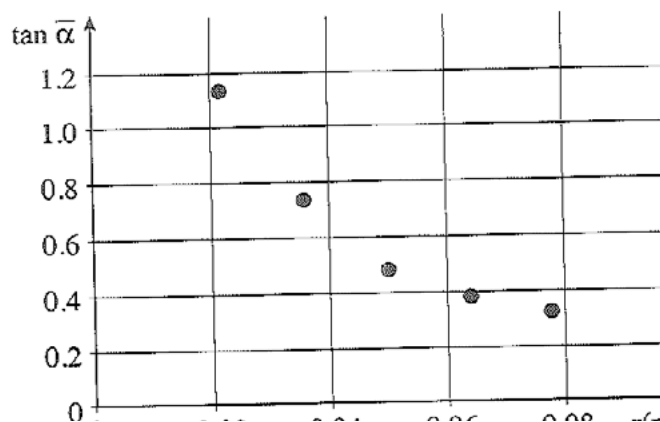


3. קריאת האמפרמטר: $I = 3.7 \text{ A}$; עובי של פיסת קלקר: $d_0 = 0.8 \text{ cm}$. גובה מחט המצפן מעל תחתית המצפן: $d = 1.4 \text{ cm}$.
4, 5, 7 - 9: בטבלה 1 רשומות תוצאות מדידות וחישובים.

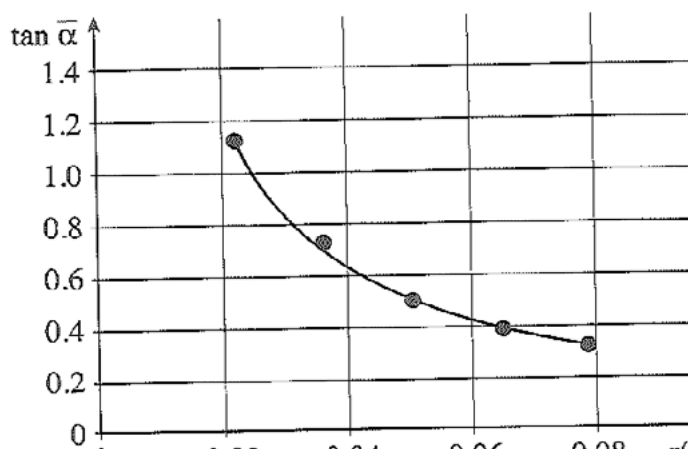
$\tan$	$(^\circ)$	$\alpha_2 (^\circ)$	$\alpha_1 (^\circ)$	$r \text{ (cm)}$	n
1.13	48.5	48	49	2.2	1
0.73	36	35	37	3.6	2
0.49	26	26	26	5.0	3
0.38	21	21	21	6.3	4
0.32	18	18	18	7.8	5

6. כדי שהקוטב הצפוני של מחט המצפן יסטה נגד מגמת סיבוב מחוגי השעון יש להפוך את כיוון הזרם בתיל (החלפת קצות התיילים המחוברים להדקי הספק).

10. בתרשים 6 מתוארת דיאגרמת פיזור של $\tan$ כפונקציה של מרחק המצפן, r , מן התיל.



11. א. נשער כי הפונקציה המתאימה לדיאגרמת הפיזור היא פונקציית חזקה שתבניתה $\tan \alpha = ar^b$ (כאשר b שלילי). נבחן השערה זו. התאמת עקומת חזקה לדיאגרמת הפיזור. נסרטט בעזרת הגיליון האלקטרוני עקומת חזקה המתאימה ביותר לדיאגרמת הפיזור המתוארת בתרשים 6, הגרף מתואר בתרשים 7.



- ב. משוואת העקומה: $\tan =$ (3)
 (היחידה של המספר 0.025 היא מטר).
 ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.997$.

ג. על-פי משוואות (2) ו-(3) נקבל כי:

$$B_I = \frac{0.025 \cdot B_E}{r^{1.01}}$$

מסקנה אמפירית: השדה המגנטי הנוצר על-ידי תיל לשר וארוך משתנה ביחס הפוך למרחק מהתיל.

12. בסעיף ווג מצאנו כי $B_I \propto 1/r^{1.01}$, ועל-פי נוסחה (1) $B_I \propto 1/r$. ההבדל הקטן יכול לנבוע משגיאות מדידה של המרחקים $d - d_0$, ושל הזוויות α .

לכן:

$$B_I = \frac{0.025 \cdot B_E}{r} \quad (4)$$

13. השדה המגנטי הנוצר על-ידי תיל ישר וארוך (נוסחה (1) שעובר בו

זרם $I = 4A$:

$$B_I = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{4}{r} = \frac{8 \cdot 10^{-7}}{r} \quad (5)$$

כאשר r מרחק הנקודה מן התיל הישר.

נשווה בין אגפים ימניים של קשרים (4) ו-(5):

$$\frac{8 \cdot 10^{-7}}{r} = \frac{0.025 \cdot B_E}{r} \quad (6)$$

פתרון המשוואה:

$$B_E \approx 3.2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

14. כדי לקזז טעויות הנובעות מכך שהתיל אינו מכוון במדויק בכיוון צפון-דרום.

15. סמוך לנקודת ההדבקה, המצפן עלול להיות מושפע מהשדה המגנטי של קטע התיל שמעבר לנקודת ההדבקה. קטע זה אינו נמצא על הישר הכולל את התיל הצמוד לשולחן.

16. כיוון השדה המגנטי הפועל על הקוטב הצפוני הוא ימינה, לכן על-פי כלל יד ימין כיוון הזרם הוא מ-B ל-A.

17. המחט לא תסטה מכיוון צפון-דרום כי השדה המגנטי פועל על הקוטב הצפוני והדרומי כלפי מטה. מכאן שכוח המגנטי פועל על הקוטב הצפוני של המחט כלפי מטה ועל הקוטב הדרומי כלפי מעלה, אך ציר המצפן אינו מאפשר למחט להסתובב במישור זה.

18. באיזור גיאוגרפי אחר ערכי הזוויות לא יהיו זהים בהכרח לערכים כאן, כיוון שהרכיב האופקי של השדה המגנטי של הארץ – B_E עלול להיות שונה; על-פי משוואה (5) ערכי הזוויות α יהיו שונים. ניתן להגיע למסקנה זו גם מהתבוננות בתרשים 4.
19. א. שאלת חקר שניתן לנסח: האם השדה המגנטי של תיל ישר וארוך תלוי בעוצמת הזרם? אם כן – מה הקשר ביניהם?
- ב. מערך המחקר: לא משנים במהלך הניסוי את מרחק המצפן מן התיל אלא את הזרם: לזרמים שונים I מודדים את זווית הסטייה α של מחט המצפן, ובודקים את תלות $\tan\alpha$ בעוצמת הזרם I .

חקר 17

השדה המגנטי של סילונית

שאלת חקר

זרם מוזרם בסילונית.



- א. באילו גורמים תלוי השדה המגנטי בתוך הסילונית?
- ב. כיצד תלוי השדה המגנטי בכל אחד מן הגורמים שצינת?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

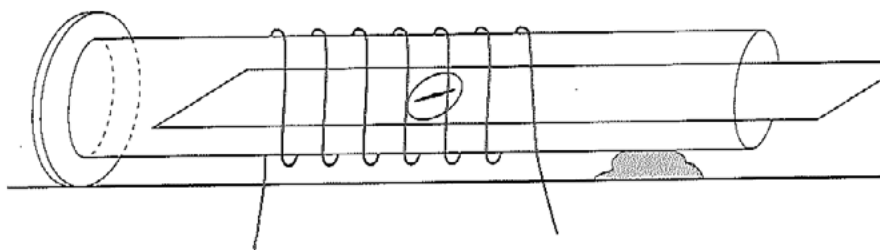
1. בתרשים 1 מתואר מצפן הנמצא בתוך סילונית. ציר הסילונית ניצב לכיוון צפון-דרום המגנטי. מחט המצפן סוטה מהכיוון צפון-דרום המגנטי בהשפעת השדה המגנטי הנוצר על-ידי הזרם בסילונית.
- א. סרטט תרשים סכמתי של המצפן, וסרטט בו חצים המייצגים את השדות המגנטיים ואת הכוחות הפועלים על הקטבים של מחט המצפן.
- השתמש בסימון: B_I - עצמת השדה המגנטי של הסילונית.
- B_E - הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ.
- ב. הראה כי טנגנס זווית הסטייה של מחט המצפן מכיוון צפון-דרום המגנטי פרופורציוני לעוצמת השדה המגנטי הנוצר על-ידי הזרם בתיל. רשום קשר מתמטי בין שני המשתנים.
- ג. תכנן מערך ניסוי שבעזרתו ניתן לענות על שאלות החקר.

רשימת בלי המחקר

- (1) מקור מתח של 3 V (ספק מתח או שני תאים חשמליים של 1.5 וולט כל אחד, בתוך בית סוללות מתאים);
- (2) נגד משתנה שהתנגדותו המרבית כ-20 אום;
- (3) משורה שקופה (או שקף);
- (4) תיל מוליך מנחושת שקוטרו 0.3 – 0.5 מ"מ, ואורכו כשני מטר;
- (5) סרגל עץ (או סרגל פלסטי) שאורכו כ-30 ס"מ;
- (6) מצפן שקוטרו החיצוני קטן מהקוטר הפנימי של המשורה המוזכרת
- ב- (3) לעיל;
- (7) אמפרמטר D.C. בעל תחום mA0-500;
- (8) 5 תילי הולכה, שניים מהם עם מצבטי תנין באחד מקצותיהם;
- (9) גוש פלסטלינה;
- (10) סרט הדבקה שקוף;
- (11) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).

בניית המערכת הניסויית

- א. בניית סילונית: לפף את תיל הנחושת סביב גוף המשורה. על המרווחים בין שני ליפופים עוקבים להיות שווים בקירוב זה לזה (מרחק של כ-1 ס"מ). על אורך הסילונית להיות כ-12 – 15 ס"מ. בסיום הליפוף, הדק את התיל למשורה באמצעות סרט ההדבקה. הערה: במקום משורה ניתן להשתמש בשקף שגולל לצורת גליל, בעל קוטר מתאים.
- ב. הנח על השולחן את המשורה עליה מלופף תיל הנחושת (סילונית), כך שציר המשורה יהיה מקביל לשולחן. תוכל להיעזר לשם כך בגוש הפלסטלינה.
- ג. הנח את המצפן על הסרגל, והדק אותו לסרגל באמצעות סרט ההדבקה.
- ד. הכנס לתוך המשורה את הסרגל אליו מחובר המצפן, כך שמרכז המצפן יהיה על ציר המשורה ובמרכז הסילונית, והסרגל יהיה אופקי (ראה תרשים 1).



ה. בנה מעגל חשמלי הכולל: מקור מתח בעל כ"מ של V_3 , נגד משתנה, אמפרמטר ואת הסילונית, כך שניתן יהיה לשנות את עצמת הזרם בסילונית באופן רציף, החל מאפס.

1. כוון את הסילונית כך שצירה יהיה בכיוון מאונך לכיוון צפון-דרום המגנטי.

ביצוע הניסוי

2. סרטט תרשים את המעגל החשמלי שבנית.
3. הכן טבלה כדוגמת טבלה 1. קבע מהו מספר הליפופים של התיל סביב המשורה, ורשום בטבלה ליד המלים "צפיפות הליפופים", מתחת לכותרת "צפיפות ליפופים נמוכה", את מספר הליפופים ליחידת אורך.
4. כוון בעזרת הנגד המשתנה את עצמת הזרם בסילונית ל mA_{50} . מדוד את זווית הסטייה α של מחט המצפן. הפוך את כיוון הזרם בסילונית ובדוק אם סטיית המחט שווה לסטייה שהייתה לפני הפוך הזרם. אם היא שווה, רשום את α בטבלה. אם היא שונה, חשב את הממוצע של שתי הסטיות ורשום אותו בטבלה.
5. לכל אחד מהזרמים הרשומים בטבלה 1, מדוד את α של המחט המגנטית, והשלם את חלק הטבלה שמתחת לכותרת "צפיפות ליפופים נמוכה".

צפיפות ליפופים כפולה צפיפות הליפופים:		צפיפות ליפופים נמוכה צפיפות הליפופים:		
$\tan\alpha$	$\alpha(^{\circ})$	$\tan\alpha$	$\alpha(^{\circ})$	I (mA)
				50
				100
				150
				200
				250

6. לפף מחדש את תיל הנחושת סביב גוף המשורה, כך שמספר הליפופים ליחידת אורך יהיה כפול מזה שהיה קודם. על המרווחים בין שני ליפופים עוקבים להיות שווים בקירוב. הדק את התיל למשורה באמצעות סרט ההדבקה.

רשום בטבלה 1 ליד המלים "צפיפות הליפופים" תחת הכותרת "צפיפות ליפופים כפולה" את מספר הליפופים ליחידת אורך. חזור על הפעולות הנדרשות בסעיפים ב, ד, ה ו-1, ועל סעיפים 3 ו-4, אך הפעם רשום את תוצאות המדידות המתאימות בטבלה בשתי העמודות שמתחת לכותרת "צפיפות ליפופים כפולה".

7. הזז את הסרגל כך שהמצפן יהיה בתוך הסילונית, אך בקצה שלה, ורשום את זווית הסטייה α' כאשר עצמת הזרם היא mA250.

ניתוח ממצאי הניסוי ומסקנות אמפיריות

8. סרטט, באותה מערכת צירים, גרף המתאר את $\tan \alpha$ כפונקציה של עצמת הזרם 1, בכל אחד משני הניסויים.
9. מצא את המשוואות של כל אחד משני הגרפים ($\tan \alpha$ כפונקציה של I), ואת הריבועים של מקדמי המתאם.
10. השתמש בקשר שמצאת בסעיף 9, ובקשרים שמצאת בסעיף 9, ורשום מסקנות אמפיריות בדבר תלות השדה המגנטי B_I במשתנים בלתי תלויים.

השוואה בין המסקנות האמפיריות ותיאוריה

11. עצמת השדה המגנטי בתוך סילונית נתונה בנוסחה:

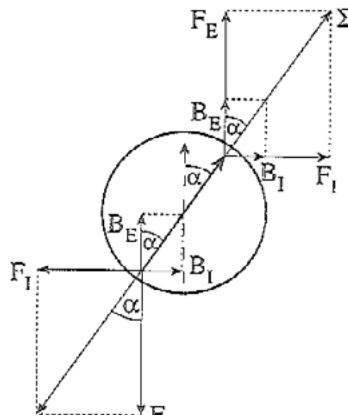
$$B_I = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (1)$$
 כאשר: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (ביחידות S.I.)
- השווה בין המסקנות האמפיריות שניסחת בסעיף 10 לבין נוסחה (1).

שאלות

12. חשב את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של הארץ.
13. הסבר את ההבדל בין זווית סטיית המחט, כאשר המצפן היה במרכז הסילונית, לבין זווית סטייתה, כאשר המצפן היה בקצה הסילונית (בשני המקרים, כאשר הזרם היה mA250).

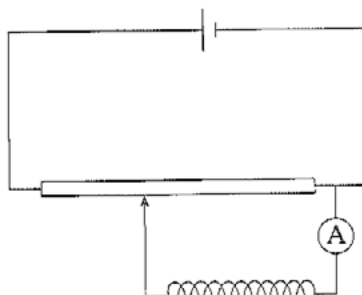
תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. א. בתרשים 2 מתוארים וקטורים המייצגים את השדות המגנטיים והכוחות הפועלים על הקטבים של מחט המצפן: על הקוטב המגנטי הצפוני של המחט פועלים: א. הרכיב האופקי של השדה המגנטי (B_E) של כדור הארץ. רכיב זה מצביע לכיוון צפון המגנטי. ב. השדה המגנטי שנוצר על-ידי הזרם בסילונית (B_I). שדה זה פועל בכיוון ניצב לכיוון צפון-דרום המגנטי. הכוחות המגנטיים פועלים על הקוטב הצפוני בכיוון השדות. על הקוטב הדרומי פועלים שדות מגנטיים באותם הכיוונים, אלא שכיווני הכוחות שהם הפעילים מנוגדים לכיווני השדות. המחט מתייצבת בכיוון הכוחות השקולים הפועלים על קטבי מחט המצפן (ראה תרשים 2).



$$\tan \alpha = \frac{B_I}{B_E}$$

- ב. מתרשים 4 ניתן לראות כי:
ג. משערים מהם המשתנים הבלתי תלויים שעשויים להשפיע על עוצמת השדה B_I בתוך הסילונית (המשתנה התלוי). לגבי כל אחד מהמשתנים הבלתי תלויים: דוגמים בעזרת ניסוי ערכים של המשתנה הבלתי תלוי, ואת הערכים המתאימים של המשתנה התלוי (B_I), ומתאימים פונקציה שתקשור בין שני המשתנים.
2. המעגל החשמלי שבעזרתו נערך הניסוי מתואר בתרשים 2.



3-6: תוצאות מדידות וחישובים רשומות בטבלה 2.

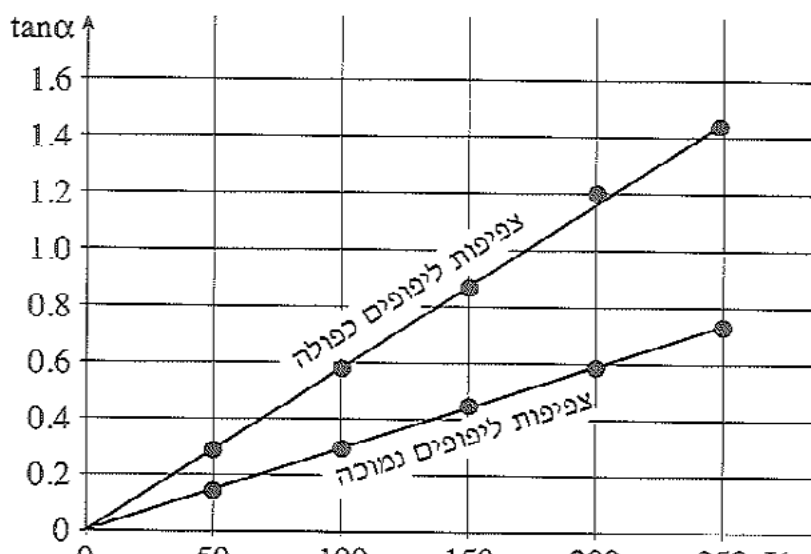
צפיפות ליפופים כפולה צפיפות הליפופים: 158m ⁻¹		צפיפות ליפופים נמוכה צפיפות הליפופים: 79m ⁻¹		
$\tan \alpha$	$\alpha(^{\circ})$	$\tan \alpha$	$\alpha(^{\circ})$	I (mA)
				50
				100
				150
				200
				250

7. כאשר המצפן הונח בקצה הסילונית, ועצמת הזרם היתה 250mA,

זווית הסטייה של המצפן היתה: $\alpha' = 46^{\circ}$.

8. בתרשים 3 מתואר גרף של $\tan \alpha$ כפונקציה של I (ביחידה mA) עבור

הסילונית שצפיפות ליפופיה נמוכה, ועבור הסילונית שצפיפות ליפופיה כפולה.



9. על-פי הגרפים שהתקבלו, $\tan \alpha$ משתנה ביחס ישר לעצמת הזרם I . משוואת הישר המתאים לצפיפות ליפופים נמוכה (כפי שהתקבל בגיליון האלקטרוני):

$$\tan \alpha = 0.0029 \cdot I - 0.0035$$

(ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9994$).

מהתבוננות בגרף ניתן לראות כל במשוואה האחרונה נוכל להזניח את המספר 0.0035.

המשוואה האחרונה התקבלה מתוך ערכי I שנמדדו ב-mA. אם היחידה של I היא אמפר, אזי יש לכפול את המספר 0.0029 ב-1000, ואז משוואת הישר היא:

$$\tan \alpha = 2.9I \quad (3)$$

משוואת הישר המתאים לצפיפות ליפופים כפולה (כפי שהתקבל בגיליון האלקטרוני):

$$\tan \alpha = 0.0058 \cdot I + 0.0018$$

(ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9982$).

משיקולים דומים, נרשום את המשוואה של הישר המתאים לסליל שצפיפות

ליפופיו כפולה כך:

$$(4) \tan \alpha = 5.8 I$$

בעזרת נוסחה (2) ונוסחאות (3) ו-(4) נרשום:

לגבי צפיפות ליפופים נמוכה:

$$(5) B_I = B_E \cdot 2.9 \cdot I$$

לגבי צפיפות ליפופים כפולה:

$$(6) B_I = B_E \cdot 5.8 \cdot I$$

10. א. השדה המגנטי בתוך סילונית תלוי בעוצמת הזרם בסילונית, ובצפיפות הליפופים.

ב. השדה המגנטי פרופורציוני לעוצמת הזרם בסילונית, ופרופורציוני לצפיפות הליפופים.

11. I/N מייצג את צפיפות הליפופים. מנוסחה (1) ניתן לראות כי עבור צפיפות ליפופים נתונה - השדה המגנטי בתוך הסילונית, הנוצר על-ידי הזרם בסילונית פרופורציוני לעצמת הזרם בסליל. תוצאה זו מיוצגת בניסוי זה על-ידי קשרים (5) ו-(6).

12. מהשוואת האגפים הימניים של משוואות (1) ו-(5) נקבל:

$$B_E \cdot 2.9 = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \Rightarrow B_E \cdot 2.9 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 79$$

פתרון המשוואה:

$$B_E \approx 3.4 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

13. כאשר המצפן היה במרכז הסילונית, זווית סטיית המחט היתה 55° (ראה טבלה 2), וכאשר המצפן היה בקצה הסילונית, זווית הסטייה היתה 46° (ראה תשובה לסעיף 7). הסיבה לכך היא שבמרכז הסילונית השדה הוא אחיד, אך כאשר מתקרבים לקצות הסילונית - השדה מפסיק להיות אחיד, והוא נחלש.

חקר 18

מערכת של עדשה ומראה מישורית

שאלת חקר

עדשה מרכזת מונחת על מראה מישורית. עצם מאיר נמצא מעל העדשה.



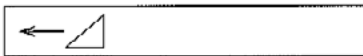
האם במערכת זו נוצרת דמות? אם כן – מהם מאפייני הדמות, וכיצד הם תלויים במרחק העצם מן העדשה?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקולייך.

רשימת כלי המחקר

- (1) מראה מישורית מלבנית שאורך צלעותיה 6 ס"מ לפחות.
- (2) עדשה דו-קמורה סימטרית, בעלת קוטר 4-5 ס"מ ומרחק מוקד 10-15 ס"מ.
- (3) פס נייר לבן (רצוי נייר בריסטול) שרוחבו כ- 0.5 - 0.7 ס"מ, ואורכו כ- 5 ס"מ; בקרבת אחד מקצוות פס הנייר סרטט ריבוע וחץ, כמתואר בתרשים וא. בצד האחר של פס הנייר, סמוך לאותו קצה, סרטט משולש וחץ, כמתואר בתרשים ב.



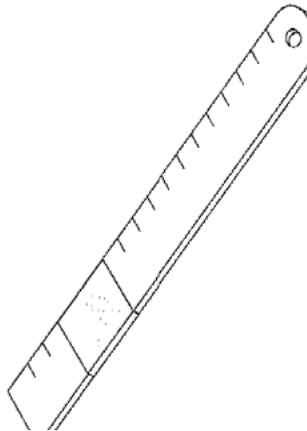
א



ב

- (4) סרגל (רצוי מפלדה) שאורכו 30 ס"מ לפחות.
- (5) טפי המכיל כ-19 מ"מ ק"מ מים (או כל נוזל שקוף אחר).

- (6) פיסת נייר שחור, שממדיה בערך בממדי המראה, אשר גזור בה חור שקוטרו קטן במקצת מקוטר העדשה (פריט זה אינו הכרחי).
 (7) סרט הדבקה.
 (8) "שרוול" המולבש סביב הסרגל המתואר בסעיף (1), כך שניתן להזיז את ה"שרוול" לאורך הסרגל (תרשים 2).



- (9) כן (סטטיב) עם אוחד.
הערה: על המעבדה להיות מוארת, אך רצוי שלא ימצא מקור אור מעל מערכת הניסוי.

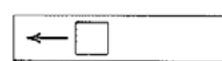
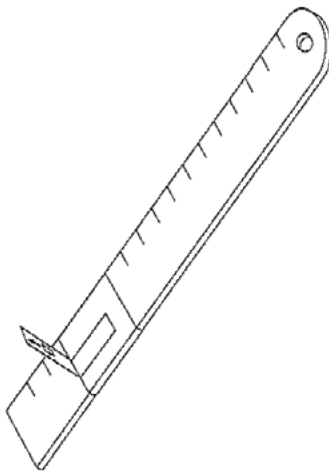
הרכבת המערכת הניסויית

הנח על השולחן את המראה (הצד המחזיר כלפי מעלה) ועליה הנח את העדשה. אם ברשותך הנייר השחור (פריט (7) ברשימת כלי המחקר) – הנח את הנייר על המראה, ומעל החור שבנייר מקם את העדשה. הנייר השחור נועד למנוע יצירת דמות על-ידי אור שפוגע ישירות במראה, ללא מעבר דרך העדשה.

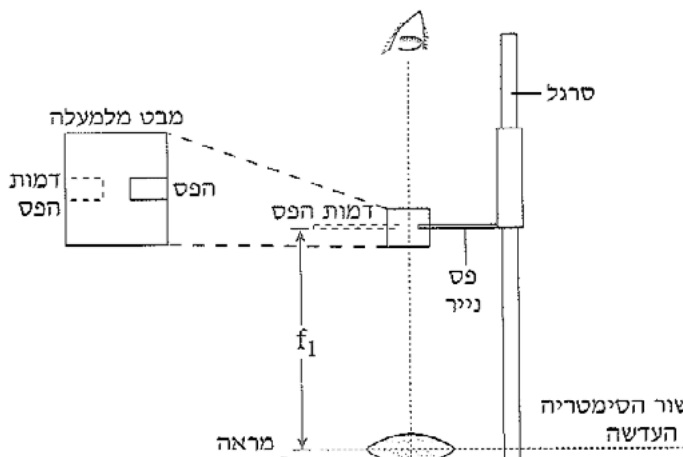
ביצוע הניסוי

1. אחוז בפס הנייר כך שהריבוע המסורטט על פס הנייר יפנה כלפי מעלה (והמשולש יפנה כלפי העדשה) והבא אותו לגובה קטן (1 ס"מ בערך) מעל העדשה. הבט בעדשה מלמעלה, לאורך הציר האופטי, ואתר את דמות פס הנייר. נכנה את הדמות הנוצרת במצב זה בשם "דמות א".

- (א) האם הינך רואה את דמות המשולש או את דמות הריבוע "על גבי" דמות פס הנייר? הסבר מדוע.
- (ב) האם החץ המסורטט על פס הנייר ודמות החץ פונים לאותו ביוון או לכיוונים מנוגדים?
2. הרם באיטיות את פס הנייר, ועקוב אחר הדמות, עד למצב שבו הדמות מתהפכת. (כיוון דמות החץ "שעל" דמות פס הנייר הפוך לכיוון דמות החץ במקרה של דמות א). נכנה את הדמות במצב זה בשם "דמות ב". בין המצב שבו התקבלה דמות ב, לבין המצב שבו התקבלה דמות א, היה מצב שבו לא נראתה דמות. העלה השערה לגבי מה שמתרחש כאשר לא נוצרת דמות.
3. הסבר, מדוע במצב שבו פס הנייר נמצא במוקד של העדשה גם הדמות שלו נמצאת במוקד של העדשה.
4. קפל את פס הנייר כמתואר בתרשים 3א, והצמד אותו ל"שרווול" שעל הסרגל, בעזרת סרט הדבקה, כמתואר בתרשים 3ב.



5. הצב את הסרגל בקרבת העדשה, בצורה אנכית בעזרת כן (סטטיב) ואוחז מתאימים, או אחוז אותו ביד.
6. הבט מלמעלה, לאורך הציר האופטי, והזז את השרווול עם הפס עד שתראה את דמות הפס בעדשה ברוחב הפס ובהמשכו (ראה תרשים 4). הזז את הראש במידת מה בכיוון אופקי הניצב לפס - קדימה ואחורה, ושים לב שהפס ודמותו יראו כל הזמן צמודים. מצב זה מכונה "ראייה ללא פרלקסה".



7. מדוד את המרחק ממישור הסימטריה של העדשה עד לפס, ורשום את תוצאת מדידתך - זהו מרחק המוקד f_1 של העדשה.
8. הורד את העדשה מהמראה, טפטף על פנל המראה טיפות של הנוזל הנתון והחזר את העדשה למקומה. מתחת לעדשה, וצמודה לה, נוצרת "עדשת נוזל".
9. מדוד בדרך המתוארת בסעיף (6) לעיל את מרחק המוקד, f , של "צמד העדשות". רשום את תוצאת המדידה.

10. העדשה שברשותך הלא עדשה סימטרית, כלומר שני המשטחים הבדוריים שלה הם בעלי רדיוסי עקמומיות שווים.

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

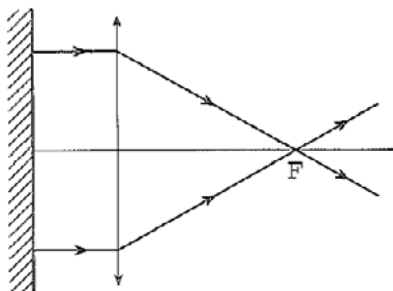
השתמש בנוסחת לוטשי העדשות: $f = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ובמרחק המוקד f_1 של העדשה שמדדת, כדי לחשב את רדיוס העקמומיות R_1 של העדשה; הנח כי מקדם השבירה של חומר העדשה הוא $n_1 = 1.5$.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

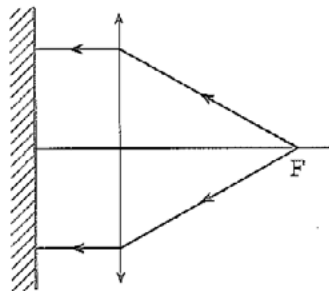
12. מהם רדיוסי העקמומיות של עדשת הנוזל? נמק אה תשובתך.
13. חשב את מקדם השבירה n_2 של הנוזל.
14. האם עדשת הנוזל הלא עדשה מרכזת או מפזרת? נמק.
15. השתמש בסימולציה ממוחשבת של מקור אור הנמצא מעל עדשה המונחת על מראה מישורית, וחקור את אופי הדמויות הנוצרות.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. (א) רואים את דמות המשולש. הריבוע שעל פס הנייר פונה כלפי מעלה, ואור הנפלט ממנו (כתוצאה מהחזרה) אינו יכול להגיע למערכת העדשה עם המראה, ולכן אינו יכול ליצור דמות.
(ב) החץ המסורטט על פס הנייר ודמות החץ (דמות א) פונים באותו כיוון, כלומר הדמות היא ישרה.
2. המצב שבו לא נצפת דמות מתרחש ככל הנראה כיוון שהאור שמקורו בנקודה כלשהי על העצם (פס הנייר) מוחזר ממערכת העדשה והמראה כאלומה מקבילה, לכן אין דמות – לא ממשית ולא מדומה.
3. מן העצם (פס הנייר) נפלט אור לכל הכיוונים. אור הנפלט מנקודה מסוימת שעל העצם פוגע בעדשה, נשבר, ויוצא מעדשה כשהוא מקביל לציר העדשה. ציר העדשה ניצב למראה המישורית, לכן קרני האור פוגעות במראה בזווית פגיעה בת 0° (תרשים 5א). הקרניים מוחזרות בזווית החזרה 0° , כך שהן מקבילות לציר העדשה. האור המוחזר נשבר בעדשה, וחולף דרך מוקד העדשה, במקום שבו נמצא העצם (תרשים 5ב).



תרשים 5א: קרניים מוחזרות



תרשים 5ב: קרניים מוחזרות

7-9: תוצאות של מדידות: $f = 26.5 \text{ cm}$; $f_1 = 16.4 \text{ cm}$. (הנוזל שבו השתמשנו הוא מי ברז).

10. נוסחת לוטשי העדשות עבור עדשה שרדיוסי העקמומיות של

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \frac{2}{R} \quad \text{משטחיה שווים:}$$

נציב ערכים מספריים בנוסחה הרשומה לעיל:

$$R_1 = 16.4 \text{ cm} \Rightarrow \frac{1}{16.4} = (1.5 - 1) \cdot \frac{2}{R_1}$$

R1 - רדיוס השטחים הכדוריים של עדשת הזכוכית.

11. חישוב רוחק המוקד של "עדשת המים":

$$f_2 \approx -43 \text{ cm} \Rightarrow \frac{1}{26.5} = \frac{1}{16.4} + \frac{1}{f_2} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

כלומר "עדשת המים" היא מפזרת, ורוחק המוקד שלה שווה ל-43

ס"מ.

12. משטח אחד של עדשת המים, זה שבמגע עם המראה המישורית הוא

מישורי, לכן רדיוס העקמומיות שלו הוא ∞ . המשטח האחר של עדשת

המים, זה שבמגע עם העדשה הוא קעור, ורדיוסו שווה לזה של העדשה,

כלומר ל-16.4 cm.

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{13. חישוב מקדם השבירה של המים:}$$

נוסחת לוטשי העדשות:

נציב בנוסחת לוטשי העדשות $R_2 = \infty$ (ה"רדיוס" של המשטח

המישורי של העדשה) $R_1 = -16.4$:

$$n \approx 1.38 \Rightarrow \frac{1}{-43} = (n-1) \left(\frac{1}{-16.4} \right)$$

14. עדשת הנוזל הלא מפזרת.

נימוק א: עדשת הנוזל היא עדשה מישורית - קעורה. עדשות מסוג

זה הנמצאות בסביבה שמקדם השבירה שלה קטן ממקדם השבירה של

העדשה הן עדשות מפזרות.

נימוק ב: רוחק המוקד המחושב של העדשה הוא שלילי, ורוחק מוקד שלילי

מאפיין עדשות מפזרות.

15. מחקירת המערכת באמצעות סימולציה ממוחשבת עולה כי: כאשר פס

הנייר נמצא בין העדשה לבין הנקודה שמרחקה מן העדשה שווה למחצית

רוחק המוקד - מתקבלת דמות מדומה וישרה. כאשר מרחק פס הנייר

מהעדשה שווה למחצית רוחק המוקד - אור היוצא מנקודה מסוימת על

פס הנייר חוזר כאלומה מקבילה, ולא נוצרת דמות. כאשר מרחק פס הנייר

מהעדשה גדול ממחצית רוחק המוקד - נוצרת דמות ממשית והפוכה.

לסיכום, מערכת העדשה והמראה המישורית מתנהגת כמראה מרכזת.

חקר 19

מקור אור נקודתי בקרקעית כלי המכיל מים

שאלות חקר



בחדר חשוך נמצאת צלוחית המכילה מים (גובהם קטן ביחס לקוטר הצלוחית). על קרקעית הצלוחית נמצא מקור אור נקודתי הפולט אור לכל הכיוונים. על קרקעית הצלוחית, סביב מקור האור, יש עיגול כהה (אפל), ומחוץ לעיגול זה קרקעית הצלוחית מוארת. א. הסבר את התפלגות האור על קרקעית הצלוחית. ב. מה הקשר בין גובה המים בצלוחית לבין קוטר העיגול הכהה?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

1. תכנן מערך ניסוי לחקירת הקשר בין גובה המים בצלוחית לבין קוטר העיגול הכהה.

רשימת כלי המחקר

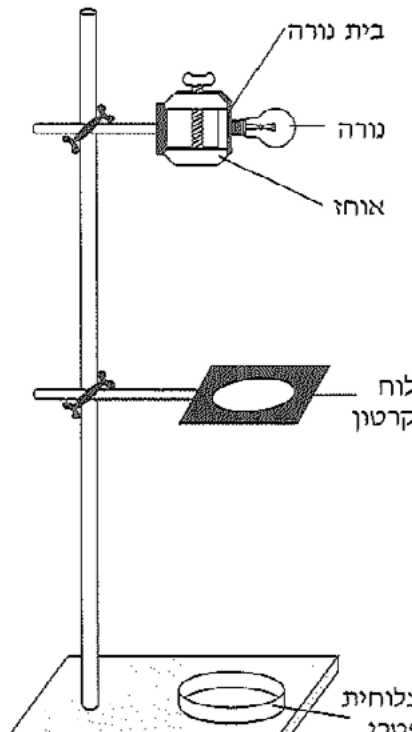
- (1) כן (סטטיב) שגובהו 50 ס"מ לפחות, עם אווז, ועם מוט שבקצהו טבעת;
- (2) עדשה מרכזת (קמורה) בעלת מרחק מוקד של 8-11 ס"מ;
- (3) לוח קרטון (או בריסטול) שממדיו 15cm x 15cm בערך, עם חור עגול במרכז. קוטר החור צריך להיות קטן ב-1 ס"מ בערך מקוטר העדשה המוזכרת לעיל;

- (4) נורה של $V3.5, A0.3$ בתוך בית נורה. רצוי שבית הנורה יהיה כהה;
- (5) מקור מתח מתאים להפעלת הנורה המתוארת בסעיף (4) לעיל;
- (6) צלוחית פטרי בעלת דפנות אנכיים שקוטרה כ- 9 ס"מ, ועומקה כ- 1.5 ס"מ. קרקעית הצלוחית צבועה בצבע לבן עמיד בפני מים (למשל ב"טיפקס");
- (7) משורה שתכולתה 25-50 סמ"ק;
- (8) בקבוק שטיפה (מזלף) שנפחו כ- 250 סמ"ק, עם מים;
- (9) מחוגת "עוקצים" למדידת הקוטר של מעגלים שונים (אפשרית מחוגה רגילה אם ניתן "לסגור" את זרועותיה כמעט לגמרי);
- (10) סרגל שאורכו כ- 30 ס"מ;
- (11) גיליון אלקטרוני או נייר מילימטרי.

שים לב, את הניסוי יש לבצע בחדר מעבדה **מואפל**, **לפחות חלקית**.

הרכבת המערכת

א. בנה את המערכת המתוארת בתרשים 1.



ב. סובב את הנורה כך שחרט הלהט יהיה אנכי.
ג. כשהנורה מאירה ומוצמדת לחלקו העליון של מוט הסטטיב, הזז את העדשה לאורך המוט עד שדמות חוט הלהט שבנורה תתקבל על קרקעית הצלוחית (בהמשך הניסוי נתייחס לדמות זו כאל "מקור אור נקודתי").
במצב זה הצמד את העדשה לסטטיב.

ביצוע הניסוי

2. בעזרת המחוגה והסרגל – מדוד את הקוטר הפנימי של הצלוחית וחשב את שטח הקרקעית שלה.
3. א. מזוג לצלוחית מים (מתוך בקבוק השטיפה), כך שגובה פני המים בצלוחית יהיה $h = 0.3$ ס"מ. השתמש במשורה כדי לקבוע את נפח המים שיש למזוג לצלוחית.
- ב. מה הייתרון של שיטה זו על-פני מדידת הגובה בעזרת סרגל? נמק.
- שים לב:** (1) סביב הדמות הנקודתית של חוט הלהט, על קרקעית הצלוחית, תגלה **עיגול כהה** (אפל) וסביבו – **טבעת מוארת**.
- (2) יש למנוע הופעה של דמות בהירה של בסיס הנורה ושל קצה האוחז על הקרקעית הלבנה של הצלוחית. דבר זה מפריע לראיה של העיגול הכהה.
- (3) חשוב שהשולחן יהיה אופקי כדי למנוע מצב שבו עומק המים בצלוחית לא יהיה אחיד.
4. הכן טבלה הכוללת את המשתנים:
 h – עומק המים בצלוחית;
 D – קוטר העיגול הכהה על קרקעית הצלוחית.
5. מדוד את הקוטר D של העיגול הכהה, ורשום בטבלה את גובה המים ואת קוטר העיגול הכהה.
6. הוסף לצלוחית מן המים שבבקבוק השטיפה, כך שעומק המים יגיע ל-0.5 ס"מ. מדוד את הקוטר החדש של העיגול הכהה. רשום בטבלה את ממצאי המדידות.
7. חזור על הפעולה המתוארת בסעיף 6 פעמיים נוספות – פעם אחת כשעומק המים בצלוחית שווה ל-0.7 ס"מ ופעם שנייה כשעומק המים שווה ל-0.9 ס"מ.

ניתוח ממצאי הניסוי

8. סרטט גרף של D כפונקציה של h .
 9. מצא את משוואת הקו, ואת ריבוע מקדם המיתאם.

המסקנות האמפיריות ותיאוריה

10. סרטט מראה מן הצד של הצלוחית. במרכז קרקעית הצלוחית סמן נקודה, המייצגת את מקור האור הנקודתי. העזר בתרשים, והסבר את התהוותו של העיגול הכהה שקוטרו D . סמן בסרטוטך את h ואת D .
 11. הוכח את הנוסחה הבאה (העזר בסרטוט שבסעיף 10):

$$D = \frac{4h}{\sqrt{\pi^2 - 1}} \quad (1)$$

- כאשר: h – גובה המים בצלוחית;
 D – קוטר העיגול הכהה על קרקעית הצלוחית;
 n – מקדם השבירה של המים.
 12. חשב את n בעזרת נוסחה (1), ועל-פי תוצאות מדידותיך בסעיף 5.
 13. קבע, על-פי הגרף, את מקדם השבירה n של המים.
 14. האם חישוב n על פי הגרף (סעיף 13) מדויק יותר או מדויק פחות מהחישוב שביצעת בסעיף 12? נמק.

שאלות

15. חשב, בעזרת תוצאות מדידותיך, את זווית הגבול (הזווית הקריטית) למעבר אור מהמים לאוויר.
 16. מדוע יש לצבוע את קרקעית הצלוחית בצבע לבן?
 17. האם היינו מקבלים את העיגול הכהה סביב הדמות "הנקודתית" של חוט הלהט של הנורה, אילו שמנו על קרקעית הצלוחית מראה מישורית? נמק.
 18. נניח שהיינו מציבים על קרקעית הצלוחית מראה מישורית, צובעים איזור קטן ("נקודה") בצבע לבן, ומטילים את הדמות "הנקודתית" של חוט הלהט של הנורה על איזור המראה הצבוע בצבע לבן. כיצד היה מתפשט האור במערכת זו?
 19. ציין סיבות אפשריות לשגיאות שאינן נובעות מאי דיוק של מכשירי המדידה.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

- משנים מספר פעמים את גובה המים, h , בצלוחית. בכל פעם מודדים את h ואת הקוטר D של העיגול הכהה. מתאימים פונקציה המתארת את הקשר בין h לבין D . הוא המשתנה הבלתי תלוי, ו- D המשתנה התלוי.
- הקוטר הפנימי של הצלוחית הוא $d = 9.1 \text{ cm}$. מדדנו אותו

כך: פתחנו את מחוגת העוקצים כך שקצותיה היו מונחים על קרקעית הצלוחית, כשהם נוגעים בדפנות הצלוחית. חיפשנו את המצב שבו זווית הפתיחה של המחוגה היא מרבית. במצב זה המרחק בין קצות העוקצים שווה לקוטר הפנימי של הצלוחית. את המרחק בין קצות העוקצים מדדנו באמצעות סרגל.

$$A = \pi r^2 = \pi \cdot \left(\frac{9.1}{2}\right)^2 = 65 \text{ cm}^2$$

3. שטח קרקעית הצלוחית:

א. קביעת כמות המים בצלוחית, בהתאם לגובהם הנדרש: כאשר גובה המים בצלוחית הוא למשל 0.3 cm , אזי נפחם:

$$V = A \cdot h = 65 \cdot 0.3 = 19.5 \text{ cm}^3$$

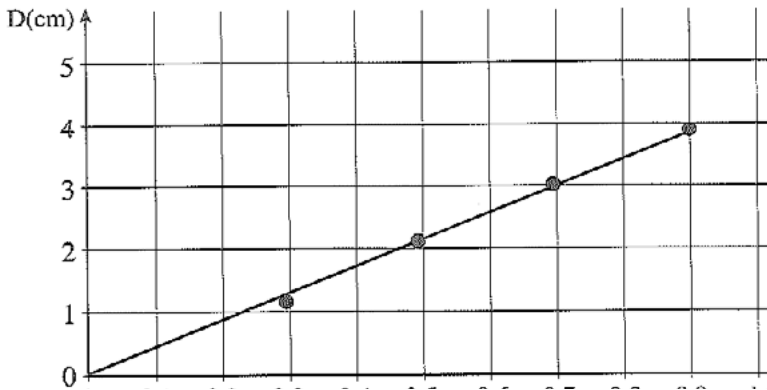
מדדנו באמצעות המשורה נפח של מים בשיעור 19.5 cm^3 , ומזגנו אותם לצלוחית הפטרי. גובה המים בצלוחית שווה בקירוב טוב ל- 0.3 cm .
 ב. לא רצוי למזוג מים לצלוחית ולמדוד את גובהם באמצעות סרגל, כיוון שאז אי-הוודאות המוחלטת במדידת הגובה שווה לפחות ל- 0.5 mm , והיא מהווה כ- 17% מהגודל הנמדד (3 mm). במילים אחרות, אי-הוודאות היחסית היא לפחות בת 17%. לעומת זאת בשיטה הנסמכת על מדידת נפח המים אי-הוודאות קטנה ממנה במידה רבה.

4-7: תוצאות של מדידות וחישובים רשומות בטבלה 1.

קוטר העיגול הכהה - D (cm)	נפח המים בצלוחית - V (cm^3)	גובה המים בצלוחית - h (cm)
1.1	19.5	0.3
2.1	32.5	0.5
3.0	45.5	0.7
3.9	58.5	0.9

באופן מעשי, בשלב הראשון מזגנו לצלוחית מים שנפחם 19.5 cm^3 (לשם קבלת גובה 0.3 cm) ואחר-כך הוספנו מים שנפחם 13 cm^3 , כדי שגובה המים יעלה ל- 0.5 cm , וכך הלאה.

8. בתרשים 2 מתואר גרף של קוטר העיגול הכהה (D) בפונקציה של גובה המים בצלוחית (h) (הקו סורטט בעזרת גיליון אלקטרוני, כך שהוא יעבור בראשית הצירים).



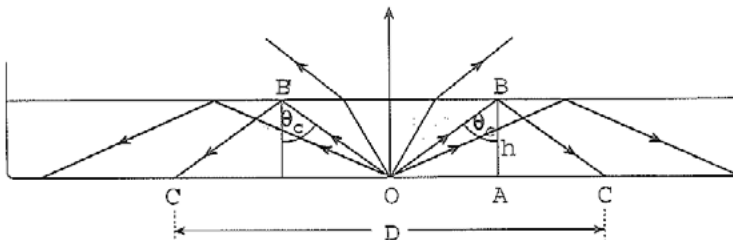
9. משוואת הקו, כפי שהתקבלה בעזרת גיליון אלקטרוני:

$$D = 4.26 \cdot h$$

כאשר h ו-D נמדדים בס"מ.

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9914$

10. בתרשים 3 מתוארת הצלוחית מן הצד:



האור הפוגע בנקודה O מוחזר לכל הכיוונים. לכל קרן אור הפוגעת בפני המים בין הנקודות B לבין B' זווית פגיעה הקטנה מהזווית הקריטית. לכן קרניים אלו יוצאות מפני המים לאוויר (תוך שבירה בזווית הגדולה מזווית הפגיעה). לקרני אור הפוגעות בפני המים מימין לנקודה B ומשמאל לנקודה B' זווית פגיעה גדולה מן הזווית הקריטית, לכן הן מוחזרות במלואן לתוך המים, ופוגעות בקרקעית הצלוחית מימין לנקודה C או משמאל לנקודה C. לכן אזורים אלה מוארים.

התופעה היא מרחבית (ולא מישורית) ולכן נוצרת **טבעת** מוארת בעלת רדיוס פנימי המסומן בתרשים 3 על-ידי OC. לקטע CC' (או לעיגול שרדיוסו OC) קרני אור אינן מגיעות – לא באופן ישיר מן הנורה, ולא לאחר החזרה מפני המים. לכן עיגול זה הוא כהה.

11. מהתבוננות במשולש OAB שבתרשים 3 ניתן לראות כי:

$$(3) \quad \tan \theta_c = \frac{D/4}{h}$$

מצד שני:

$$(4) \quad \sin \theta_c = \frac{1}{n}$$

$$(5) \quad \cos \theta_c = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}$$

מחילוק משוואה (4) במשוואה (5) מקבלים:

$$(6) \quad \tan \theta_c = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

ומהשוואת האגפים הימניים של משוואות (3) ו-(6) מקבלים:

$$D = \frac{4h}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

12. חישוב מקדם השבירה n על-פי תוצאת מדידת D, במצב שבו עומק

המים הוא 0.3 cm:

$$D = \frac{4h}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad n = 1.48 \Rightarrow 1.1 = \frac{4 \cdot 0.3}{\sqrt{n^2 - 1}} \Rightarrow$$

13. על-פי משוואת הישר, שיפוע הישר הוא 4.26. על פי נוסחה (1), ניתן

לבטא את שיפוע הגרף על-ידי $\frac{4}{\sqrt{n^2 - 1}}$

$$4.26 = \frac{4}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

לפיכך:

$$n = 1.37$$

פתרון המשוואה:

14. קרוב לודאי שחישוב n על פי הגרף מדויק מהחישוב שבצענו בסעיף 12. הסיבה לכך היא שהחישוב בסעיף 12 נסמך על **מדידה אחת**, בעוד שהגרף נסמך על **מספר מדידות**, ושגיאות מדידה אקראיות מתקזזות במידה מסוימת. יתר על כן, במדידה הראשונה (סעיף 12) D הוא הקוטר הקטן ביותר מבין הקטרים הנמדדים, ולכן **השגיאה היחסית** במדידתו היא הגדולה ביותר.

$$\frac{\sin_{\kappa} \theta}{\sin_n \theta} = n$$

15. חוק סנל למעבר אור מאוויר לחומר שקוף:

- זווית קריטית היא זווית הפגיעה בחומר שקוף, שלה מתאימה זווית שבירה באוויר בת 90° (או 'קרובה מאוד' ל- 90°). לכן:
- $$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_c}$$

16. יש לצבוע את קרקעית הצלוחית בצבע לבן משום שחומר לבן מחזיר את רוב האור הפוגע בו, ומפזר אותו. כתוצאה מכך הדמות הממשית הנוצרת על קרקעית הצלוחית משמשת **כמקור הפולט אור כלפי המים**.

17. אילו שמנו על קרקעית הצלוחית מראה מישורית, לא היינו מקבלים סביב הדמות "הנקודתית" של חוט הלהט עיגול כהה שסביבו טבעת מוארת. הסיבה לכך היא **שלא היתה נוצרת החזרה פנימית גמורה**, וכל שטח קרקעית הצלוחית היה כהה.

- הסבר: בניגוד לצבע לבן המפזר אור לכל הכיוונים - האור הפוגע במראה מוחזר ממנה **לכיוונים מסוימים בלבד**. קרן המוחזרת מן המראה היא סימטרית לקרן שפגעה במראה, ובגלל שמהלך קרני האור בשבירה הינו הפיך - תצא הקרן המוחזרת לאוויר באותה זווית בה חדרה הקרן למים.

18. חלק מהאור יפגע בפני המים בזווית קטנה מהזווית הקריטית, ויצא לאוויר. אור שיפגע בפני המים בזווית גדולה מהזווית הקריטית יוחזר לתוך המים, יפגע במראה, ויוחזר על ידה. אור זה שוב יפגע בפני המים בזווית הגדולה מן הזווית הקריטית ושוב יוחזר למים ויחזר חלילה (עד פגיעתו בדופן הצלוחית). כלומר האור שיוצא מהמקור ומוחזר בהחזרה מלאה יתפשט כלפי דפנות הצלוחית, בדומה לאור המתפשט בסיב אופטי.

19. סיבות אפשריות לשגיאות:

א. אם השולחן אינו אופקי - עומק המים בצלוחית אינו אחיד, **והאיזור הכהה אינו עגול.**

ב. הכנסת המחוגה למים שבצלוחית במהלך המדידה של קוטר העיגול הכהה גורמת לעליית פני המים, ולכן **משנה את קוטר העיגול הכהה.**

ג. בניתוח היווצרות הטבעת המוארת, הנחנו כי היא נוצרת אך ורק על-ידי אור שהוחזר למים במלואו(החזרה מלאה). לאמיתו של דבר, כאשר זווית הפגיעה של אור בפני המים קרובה לזווית הקריטית (אך קטנה ממנה) - אחוז גבוה של האור חוזר למים כהחזרה חלקית (ורק אחוז קטן יוצא לאוויר). אור זה תורם ליצירת הטבעת המוארת. (בזוויות קטנות - רוב האור יוצא לאוויר, ורק אחוז קטן מוחזר למים. ככל שזווית הפגיעה בפני המים הולכת וגדלה - גדל גם אחוז האור המוחזר). לכן, **קוטר העיגול הכהה שמדדנו קטן מקוטר העיגול הכהה שהיה נוצר אילו לא היתה החזרה חלקית של אור.**

חקר 20

דמויות ממשיות הנוצרות על-ידי עדשה דו-קמורה

שאלת חקר



מציבים מסך במרחק d ממקור אור. בין מקור האור לבין המסך מציבים עדשה שרוחק המוקד שלה מסומן ב- f , ומתקיים $d > 4f$. מזיזים את העדשה ממקור האור כלפי המסך, עד שהיא מגיעה למסך.

א. כמה פעמים מתקבלת דמות מקור האור על המסך?
 ב. מרחק ההזזה של העדשה, מהמצב שבו מתקבלת הדמות הראשונה על המסך, עד למצב שבו מתקבלת הדמות השנייה על המסך, מסומן ב- x .

1. נסח קשר מתמטי בין x , d ו- f .
 2. כיצד ניתן לקבוע את f בעזרת תוצאות מדידות של ערכי d ו- x ?

ג. במצב שבו מתקבלת הדמות השנייה על המסך; v מסמן את מרחק העדשה מן המסך; m מסמן את ההגדלה הקווית של הדמות.

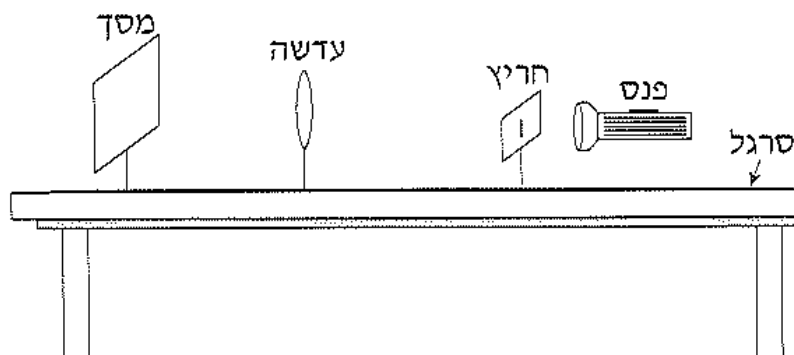
1. נסח קשר מתמטי בין v , m ו- f .
 2. כיצד ניתן לקבוע את f בעזרת תוצאות מדידות של m ו- v .

רשימת בלי המחקר

- (1) לוח שבמרכזו חריץ מכוסה בנייר פרגמנט, שאורכו 300 מ"מ ורוחבו 20 מ"מ;
- (2) פנס בעל אלומה שרוחבה גדול מאורך החריץ;
[הערה: מקור האור של תבנית רחובות, מספר קטלוגי 0011, שלחזיתו מוצמדת לוחית עם חריץ, המכוסה בנייר פרגמנט, יכולים לשמש כפריטים (1) ו-(2) לעיל];
- (3) עדשה דו-קמורה דקה, בעלת רוחק מוקד של כ- 10 ס"מ;
- (4) מסך: לוח עליו מודבק נייר מילימטרי שממדיו כ- 5 ס"מ x 2 ס"מ;
- (5) מחזיקים עבור העדשה, עבור המסך, עבור החריץ ועבור הפנס (המחזיקים יכולים להיות גושי פלסטלינה);
- (6) סרגל שאורכו 1 מ' לפחות;
- (7) שתי כליבות או סרטי הדבקה;
- (8) גיליון אלקטרוני או נייר מילימטרי.

בניית המערכת הניסויית

הרכב את המערכת המתוארת בתרשים 1. את הסרגל הצמד לשולחן באמצעות כליבה או באמצעות סרטי הדבקה.



על החריץ להיות סמוך לפנס ובמרחק קבוע ממנו בכל מהלך הניסוי. החריץ המואר באמצעות הפנס, כך שעוברת דרכו אלומת אור, ייקרא להלן **העצם**.

פיתוח קשרים מתמטיים על סמך תאוריה

1. הוכח, כי בין המשתנים d ו- x ו- f מתקיים הקשר:

$$(1) \quad d^2 - x^2 = 4df$$

2. הוכח, כי בין המשתנים m ו- v ו- f מתקיים הקשר:

$$(2) \quad m = \frac{v}{f} - 1$$

ביצוע הניסוי

טבלה 1 שלהלן כוללת את הגדלים האלה:

d - המרחק בין העצם לבין המסך;

x_1 - מרחק העדשה מראשית הסרגל, כאשר מתקבלת על המסך דמות מוגדלת;

x_2 - מרחק העדשה מראשית הסרגל, כאשר מתקבלת על המסך דמות מוקטנת;

x - מרחק ההזזה של העדשה ($x = |x_2 - x_1|$);

v - המרחק בין העדשה לבין הדמות המוקטנת;

H_i - גובה הדמות המוקטנת;

m - ההגדלה הקווית (היחס בין גובה הדמות לבין גובה העצם) של הדמות המוקטנת.

$d^2 - x^2$	m	H_i	v	x	x_2	x_1	d

3. מדוד את גובה העצם H_o (אורך החריץ), ורשום את ערכו. העתק את

טבלה 1.

4. הצב את המסך במרחק d של כ-90 ס"מ מן החריץ. הזז את העדשה, כך שעל המסך תתקבל דמות מוגדלת וחדה של העצם. מדוד את d ואת x , ורשום את ערכיהם בטבלה (כולל יחידות מתאימות).
5. מבלי לשנות את המרחק d בין העצם לבין המסך, הזז את העדשה עד שתתקבל על המסך דמות מוקטנת וחדה של העצם. מדוד ורשום בטבלה את ערכיהם של v ו- H_i .
6. הקטן בכ-10 ס"מ את המרחק d בין העצם לבין המסך, ובצע את הפעולות המפורטות בסעיפים 4 ו-5. חזור על כך עוד ארבע פעמים (בכל פעם לגבי מרחק d אחר).

ניתוח הממצאים, מסקנות ושאלות

7. חשב את ערכיהם של x , של m ושל $d^2 - x^2$, ורשום את תוצאות החישובים בטבלה.
8. א. סרטט גרף של $d^2 - x^2$ כפונקציה של המרחק d בין העצם לבין המסך.
ב. מצא את משוואת הקו ואת ריבוע מקדם המיתאם.
ג. מצא באמצעות גרף זה את רוחק המוקד f .
9. א. סרטט גרף של ההגדלה הקווית m כפונקציה של המרחק v בין הדמות המוקטנת לבין העדשה.
ב. מצא את משוואת הקו ואת ריבוע מקדם המיתאם.
ג. מצא באמצעות גרף זה את רוחק המוקד f .
10. איזה מבין הערכים של f שקיבלת בסעיפים 8 ו-9, הוא קרוב לוודאי מדויק יותר? נמק.

תוצאות של מדידות ותשובות לשאלות

1. הוכחת קשר (1):

$$(3) \quad \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

$$(4) \quad u + v = d$$

ממשוואות (3) ו-(4) מתקבלת משוואה ריבועית עבור u , שפתרונותיה:

$$u_{1,2} = \frac{d \pm \sqrt{d^2 - 4fd}}{2}$$

$$u_2 = \frac{d - \sqrt{d^2 - 4fd}}{2}$$

-1

$$u_1 = \frac{d + \sqrt{d^2 - 4fd}}{2}$$

או:

מזוג הקשרים האחרון נקבל:

$$(5) \quad u_1 - u_2 = \sqrt{d^2 - 4fd}$$

$$(6) \quad u_1 - u_2 = x$$

מצד שני:

ממשוואות (5) ו-(6) נקבל את קשר (1):

$$d^2 - x^2 = 4fd$$

2. הוכחת קשר (2):

הגדרת ההגדלה הקווית (עבור דמות ממשית):

$$(7) \quad m = \frac{v}{u}$$

$$(8) \quad \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

נציב את הביטוי ל- u / $|$ מקשר (8) בקשר (7), ונקבל את קשר (2):

$$m = \frac{v}{f} - 1$$

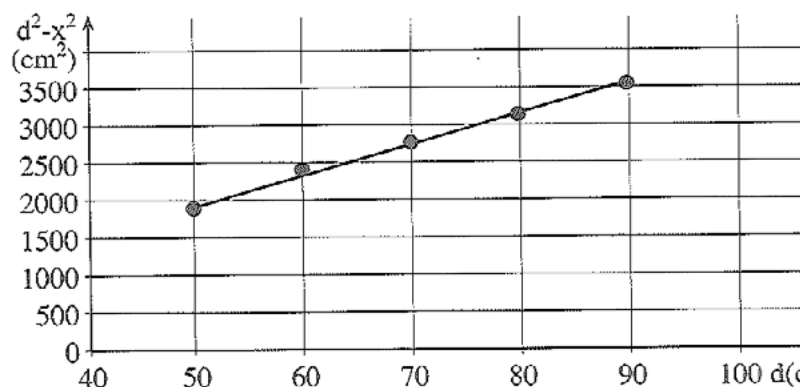
הערה: בניסוי זה, עבור כל מרחק d בין העצם לבלן המסך צריכות להתקבל שתי דמויות (המתקבלות עבור מיקומים שונים של העדשה). כדי לקבל שתי דמויות, צריך להתקיים כל $d > 4f$. ערכי d המוצעים בניסוי מתאימים לעדשה בעלת רוחק מוקד של כ- 10 ס"מ. עבור עדשה בעלת רוחק מוקד אחר, יש לקבוע ערכים מתאימים של d .

3. גובה העצם: $H_0 = 2.8 \text{ cm}$.

4 - 7: תוצאות מדידות וחישובים רשומים בטבלה 2.

$d^2 - x^2$ (cm^2)	m	H_i (cm)	v (cm)	x (cm)	x_2 (cm)	x_1 (cm)	d (cm)
3557.2	0.21	0.6	11.2	67.4	78.8	11.4	90
3128.2	0.25	0.7	11.6	57.2	68.4	11.2	80
2774.8	0.29	0.8	12.2	46.1	57.8	11.7	70
2361.0	0.32	0.9	12.3	35.2	47.7	12.5	60
1885.0	0.43	1.2	12.8	24.8	37.6	12.8	50

8. א. גרף של $d^2 - x^2$ כפונקציה של d מתואר בתרשים 2.



ב. משוואת הישר (התקבלה באמצעות גיליון אלקטרוני):

$$(9) \quad d^2 - x^2 = 41.1d - 136.9$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9977$.

ג. על פי קשר (9), שיפוע הגרף של $d^2 - x^2$ כפונקציה של d הוא 41.1 cm, ועל-פי קשר (1) שיפוע הגרף הוא $f/4$. לכן:

$$4f = 41.1 \Rightarrow f \approx 10.3 \text{ cm}$$

9. א. גרף של ההגדלה הקווית m של הדמות המוקטנת כפונקציה של המרחק v בין הדמות המוקטנת לבין העדשה מתואר בתרשים 3.

ב. משוואת הישר (התקבלה באמצעות גיליון אלקטרוני):

$$(10) \quad m = 0.13v - 1.23$$

ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9111$.

ג. על פי קשר (10) שיפוע הגרף של m כפונקציה של v הוא 0.13 cm⁻¹, ועל-פי קשר (2) שיפוע הגרף הוא $f/1$. לכן:

$$\frac{1}{f} = 0.13 \Rightarrow f \approx 7.7 \text{ cm}$$

10. קרוב לוודאי שהערך של f שהתקבל בסעיף 8 מדויק מהערך של f שהתקבל בסעיף 9. הסיבה לכך היא שבמידות בסעיף 9 התחום בו v משתנה הוא קטן, ולכן כל שגיאת מדידה משפיעה מאוד על התוצאה.

חקר 21: שבירת אור בתיבה שקופה

שאלת חקר

אור פוגע בתיבת זכוכית.



• כיצד משפיעה התיבה על מהלך האור?

- מהם המשתנים הבלתי תלויים הקובעים את מידת ההשפעה על מהלך האור?
- כיצד תלויה מידת ההשפעה של התיבה על מהלך האור בכל אחד מן המשתנים הבלתי תלויים?
- מהי הנוסחה המתארת את תלות מידת ההשפעה בכל המשתנים הבלתי תלויים?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובות לשאלות החקר? ציין את שיקולייך.

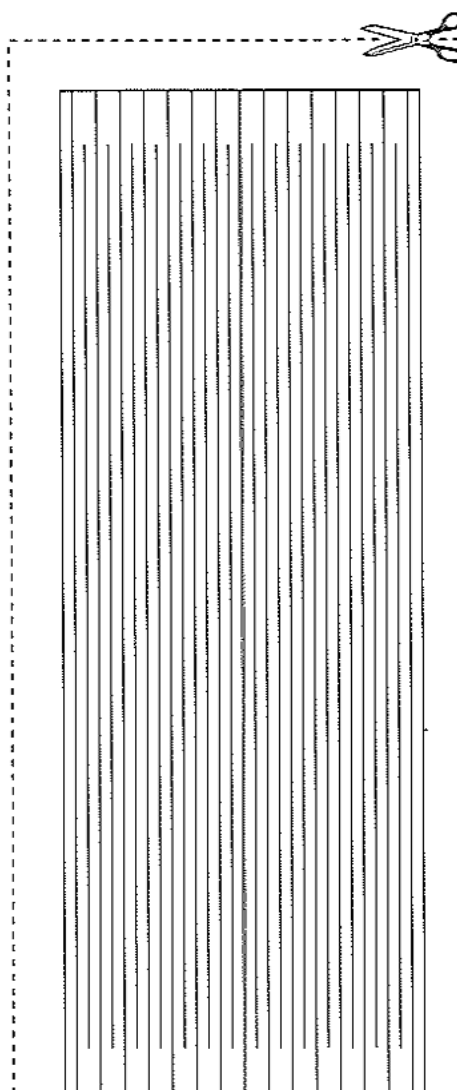
תכנון מערך מחקר

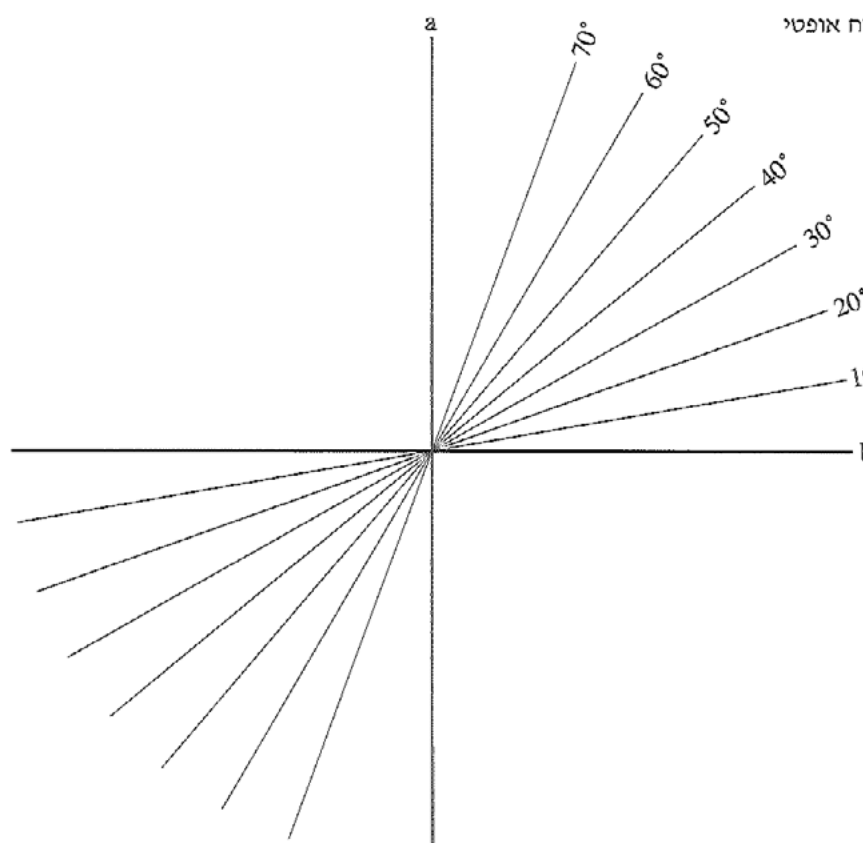
1. תכנון מערך מחקר שעל פי ממצאיו ניתן יהיה לענות על שאלות החקר.

רשימת בלי המחקר

- (1) 10 לוחיות פרספקס שוות עובי (ממדיה של כל לוחית הם כ-
 $10 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0.3 \text{ cm}$);
- (2) גומייה;
- (3) שקף, צלם, בעזרת מכונת צילום, את תרשים 1 על גבי שקף, וגזור את השקף במקום המסומן: בתרשים ישרים מקבילים שמרחקם זה מזה הוא 1 מ"מ. הישר האמצעי עבה יותר. ניתן להשתמש בשקף זה גם כסרגל.

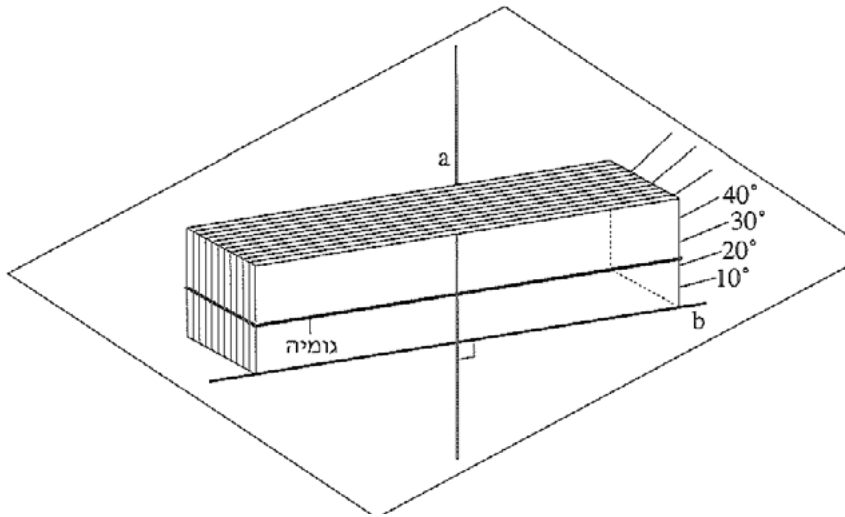
(5) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).





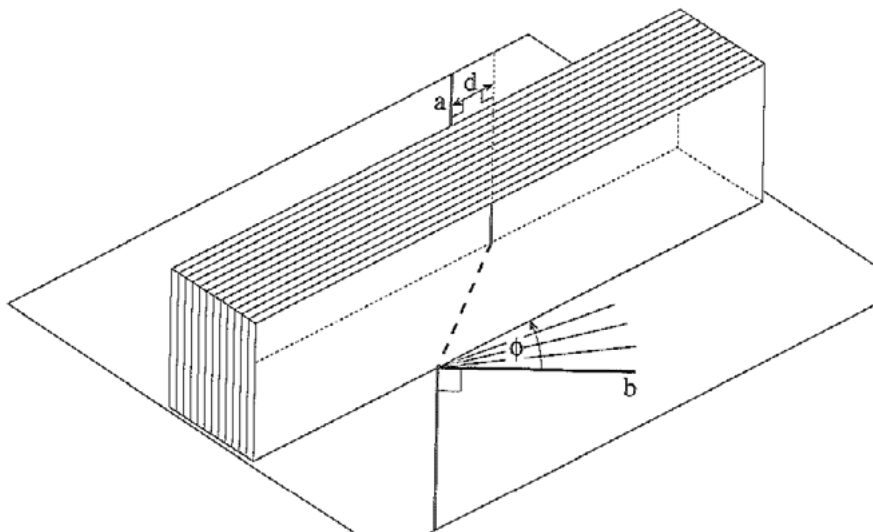
בניית המערכת הניסויית

- א. הצמד 10 לוחיות זו לזו באמצעות גומייה כך שתיווצר תיבה (ודא כי הלוחיות נקיות ונצמדות היטב זו לזו).
- ב. הצב את התיבה על הלוח האופטי, כך שהפיאה (הדופן) הקדמית תתלכד עם הישר b , כמתואר בתרשים 3.



ביצוע הניסוי

הבט אל תוך התיבה מלפנים והתבונן בישר a . סובב את התיבה כך שהפיאה הקדמית (הקרובה אליך) תיצור זווית ϕ עם הישר b , כמתואר בתרשים 4 (כלומר, הפיאה הקדמית תהיה מונחת לאורך אחת מצלעות הזוויות המסומנות). הבט אל תוך התיבה עד שתבחין שחלק מן הישר a נראה מוסח בתוך התיבה. המרחק d בין הקו הנראה בתוך התיבה ובין הקו הישר a מכונה **מרחק ההסחה**.

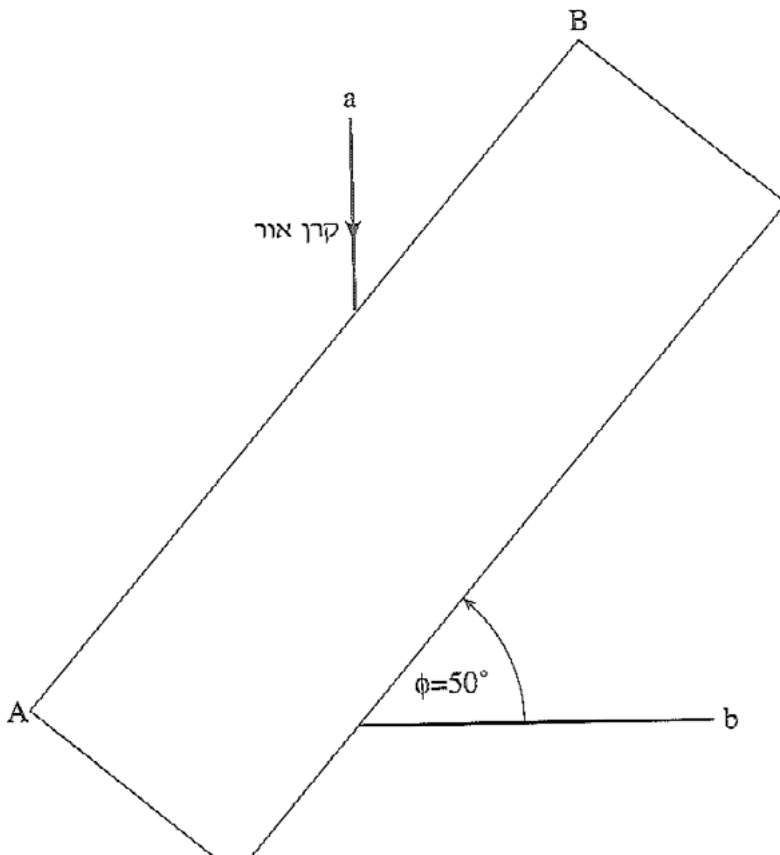


2. א. מהו מרחק ההסחה d כאשר הזווית $\phi = 0$?
- ב. סובב את התיבה כך שהזווית ϕ בין הפיאה הקדמית לבין הישר b תלך ותגדל. עקוב אחרי ההסחה. איך משפיע גודלה של הזווית ϕ על מרחק ההסחה d - האם הוא גדל, קטן או אינו משתנה?
3. א. העמד את התיבה כך שהפיאה הקדמית תיצור זווית $\phi = 50^\circ$ עם הישר b .
- הנח את השקף על הלוח האופטי, כך שהקו המוסח יראה בהמשכו של הקו העבה המסורטט על השקף. מדוד את מרחק ההסחה d .
- רשום בטבלה את מספר הלוחיות, N , ואת מרחק ההסחה, d .
- ב. חזור על המדידה של d עבור מספרים שונים, N , של לוחיות (בכל המדידות הקפד להניח את התיבה כך ש $\phi = 50^\circ$). רשום את תוצאות המדידות בטבלה.
4. מדוד את עוביה של לוחית אחת. הסבר כיצד קבעת זאת.

ניתוח הממצאים, מסקנות ושאלות

5. סרטט גרף, המתאר את מרחק ההסחה d כפונקציה של מספר הלוחיות N , כאשר הזווית ϕ קבועה ($\phi = 50^\circ$).
6. א. מצא את משוואת הקו שהתקבל, ואת ריבוע מקדם המתאם.
- ב. מצא את שיפוע הקו, והסבר את **משמעותו**.

7. בתרשים 5 מתוארת קרן אור הנעה אל תיבה שקופה המורכבת מ-10 לוחיות. הקרן מתפשטת לאורך הקו a , פוגעת בדופן AB , ויוצאת מן הדופן CD . התיבה מסורטטת בקנה מידה 1:1 (דהיינו מידות התיבה שבסרטוט זהות למידות התיבה שבניסוי).



א. העתק את תרשים 5. היעזר בתוצאות המדידות ובשקף שברשותך, וסרטט את קרן האור בצאתה מהדופן CD . השלם את מהלך הקרן בתוך התיבה.

ב. סמן בתרשים ב- α את זווית הפגיעה של הקרן בדופן AB , ב- β את זווית השבירה בדופן זו, ב- γ את זווית הפגיעה בדופן CD וב- δ את זווית השבירה בדופן זו.

ג. מה ערכן של הזוויות α ו- δ ?

ד. היעזר במהלך הקרן שסרטטת ובשקף שברשותך, וחשב את זווית השבירה β .

8. חשב את מקדם השבירה, n של התיבה על-פי תוצאות מדידותיך והסרטוט שסרטטת.
9. איזה קשר נוסף אפשר לחקור באמצעות בלי המחקר שבניסוי זה? תאר את מערך המחקר.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. מטילים אלומת אור צרה ("קרן") על תיבת זכוכית, ובוחנים מהי השפעת התיבה על אלומת האור. מאפיינים את ההשפעה של התיבה על האלומה על-ידי משתנה תלוי, שיסומן באות d . משערים מהם המשתנים הבלתי תלויים שעשויים להשפיע על d . לאחר מכן, לגבי כל משתנה בלתי תלוי, דוגמים בניסוי ערכים של המשתנה הבלתי תלוי ואת הערכים המתאימים של d , כאשר כל שאר המשתנים הבלתי תלויים נשארים קבועים. לגבי כל משתנה בלתי תלוי מחפשים פונקציה שתתאר את תלות d במשתנה זה.

2. א. כאשר הזווית $\phi = 0^\circ$ מרחק ההסחה הוא אפס.

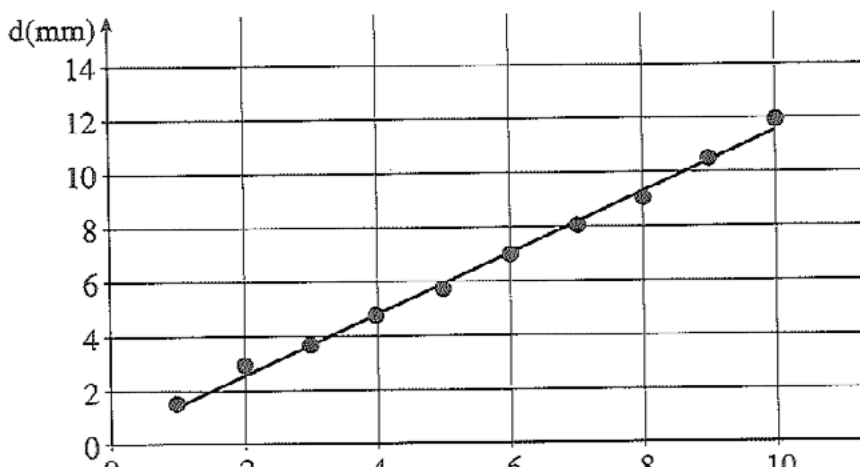
ב. כאשר הזווית ϕ גדלה, גם מרחק ההסחה d גדל.

3. תוצאות מדידות רשומות בטבלה 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N
1.5	2.7	3.7	4.7	2.7	7	8	9	10.5	12	d (מ"מ)

4. עובייה של לוחית אחת הוא 0.3 mm. קבענו זאת כך: מדדנו בעזרת השקף את עוביין של 10 לוחיות; תוצאת המדידה היא 30 mm. את תוצאת המדידה חילקנו ב-10.

5. בתרשים 6 מתואר הגרף של מרחק ההסחה d כפונקציה של מספר הלוחיות N , כאשר הזווית ϕ קבועה ($\phi = 50^\circ$).

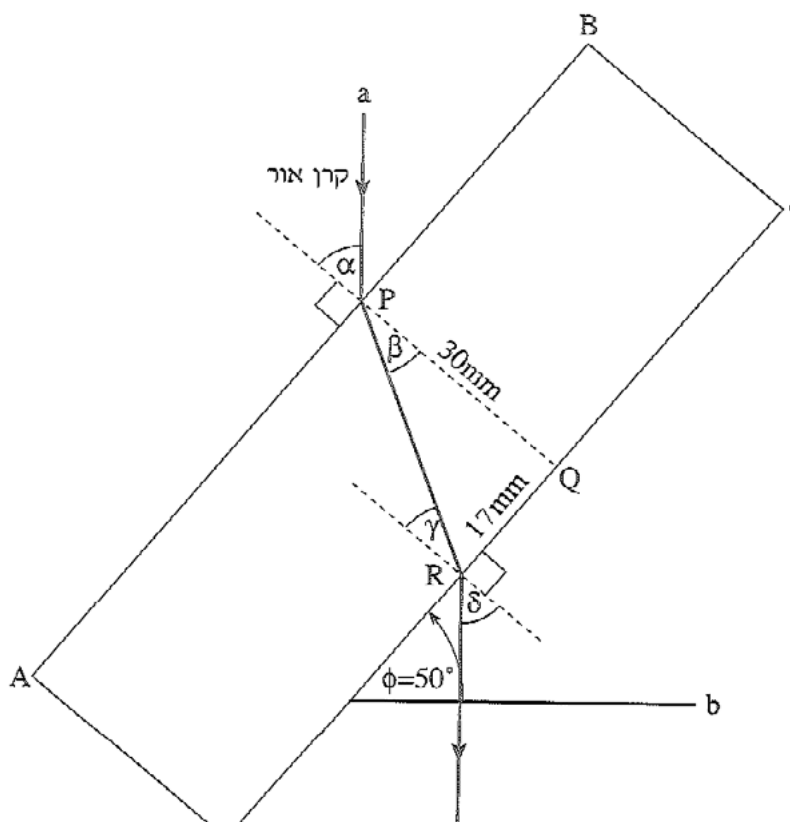


6. א. משוואת הגרף: $d = 1.13N + 0.25$ (1)
ריבוע מקדם המיתאם: $R^2 = 0.9961$

ניתן היה לצפות שהגרף יעבור בראשית הצירים. על-פי המשוואה, הגרף חותך את הציר האנכי בנקודה ששיעורה רבע מילימטר.

ב. על-פי משוואה (1) שיפוע הקו הוא 1.13 מ"מ ללוחית. משמעות השיפוע היא שתוספת של לוחית אחת גורמת לתוספת הסחה של 1.13 מ"מ.

7. א. על-פי משוואה (1), מרחק ההסחה של תיבה המורכבת מ-10 לוחיות - הוא כ- 11.6 מ"מ. לכן סרטטנו מימין לקרן a ישר המקביל לקרן, במרחק 11.6 מ"מ ממנה. חלק הישר הנמצא מתחת לתיבה מתאר את מהלך הקרן היוצאת מן התיבה. לאחר מכן חיברנו בקו את נקודת הפגיעה של הקרן a בתיבה עם נקודת היציאה של הקרן מן התיבה. הקו מתאר את מהלך הקרן בתוך התיבה (ראה PR בתרשים 7).
ב. הזוויות α , β , γ ו- δ מסומנות בתרשים 7.



ג. $\alpha = 50^\circ$. הסבר: הזווית בין הקרן a לבין הכיוון האופקי שררה ל- 90° , והזווית בין הצלע AB לכיוון האופקי שווה ל- 50° . לכן הזווית בין הקרן a לצלע AB שווה ל- 40° . מכאן שהזווית $\alpha = 50^\circ$.

$\delta = 50^\circ$. הסבר: הקרן נכנסת לתיבה בזווית α , ונשברת בזווית β . $\beta = \gamma$, בזוויות מתחלפות בין ישרים מקבילים. מהלך האור בשבירה הוא הפוך, לכן $\delta = \alpha$. מכאן ש- $\delta = 50^\circ$.

ד. בתרשים 7 מדדנו את האורך RQ בעזרת השקף, ומצאנו שאורכו 17 mm. באופן דומה מצאנו כי $PQ = 30 \text{ mm}$. מכאן:

$$\tan \beta = \frac{RQ}{PQ} = \frac{17}{30} \Rightarrow \beta \approx 29.5^\circ \quad 8. \quad \text{על-פי חוק סנל:}$$

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin 50^\circ}{\sin 29.5^\circ} \Rightarrow n = 1.56$$

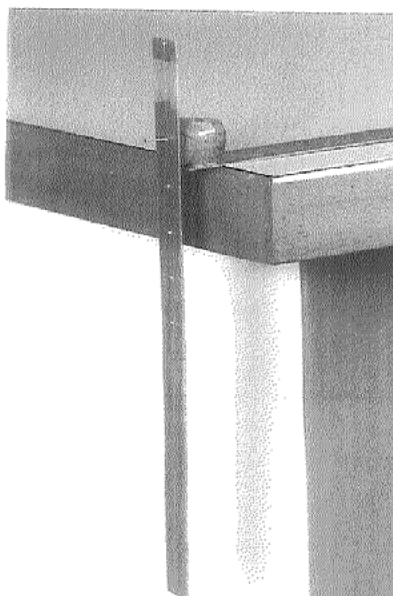
על-פי ממצאי הניסוי, מקדם השבירה של התיבה שווה איפוא ל-1.56.
9. ניתן לחקור גם את הקשר בין מרחק ההסחה לבין זווית הפגיעה של הקרן בדופן התיבה, כאשר מספר הלוחיות קבוע.
מערך המחקר: קובעים מספר לוחיות (למשל חמש לוחיות), ולא משנים את מספרן במהלך הניסוי. מודדים את מרחק ההסחה עבור זווית שונות, למשל מזווית 0° עד 80° בקפיצות של 10° . לאחר מכן מסרטטים גרף של מרחק ההסחה כפונקציה של הזווית.

חקר 22: תנודות פס מתכת סביב ציר

שאלת חקר



פס מתכת אחיד מתנודד במישור אנכי סביב ציר אופקי.



מה הקשר בין זמן מחזור התנודות לבין מרחק הציר
ממרכז הפס?

העלאת השערה

מהן השערותיך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקוליך.

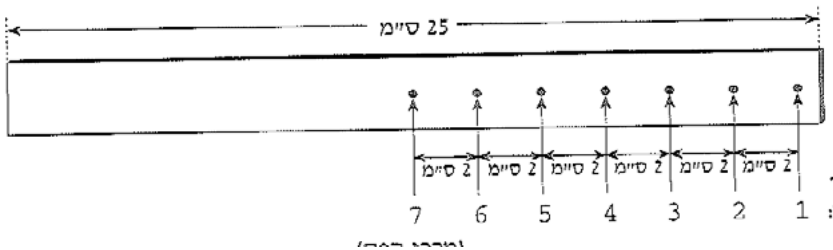
תכנון מערך ניסוי

1. תכנון ניסויי שבעזרת ממצאיו, ניתן יהיה לענות על שאלת החקר. ציין איזה משתנה הוא המשתנה הבלתי תלוי, ואיזה משתנה הוא התלוי.

רשימת בלי במחקר

- (1) פס אלומיניום שבו 7 נקבים (בהמשך רשומות הנחיות לבניית הפס);
- (2) סיכה;
- (3) פקק שעם;
- (4) שני סרגלים שאורך כל אחד מהם 30 ס"מ;
- (5) שעון עצר;
- (6) סרט הדבקה;
- (7) גיליון אלקטרוני (או נייר מילימטרי).

הנחיות לבנייה פס האלומיניום: ממדי הפס: עוביו 0.5 מ"מ – 0.7 מ"מ, רוחבו 2 ס"מ ואורכו 25 ס"מ. בפס שבעה נקבים, שאחד מהם במרכז הפס, וכל האחרים מצידו האחד של נקב זה, במרחק 2 ס"מ זה מזה, כמתואר בתרשים 1.



את הנקבים ניתן לעשות באמצעות פטיש ומסמר (שקוטרו גדול במקצת מקוטר הסיכה).

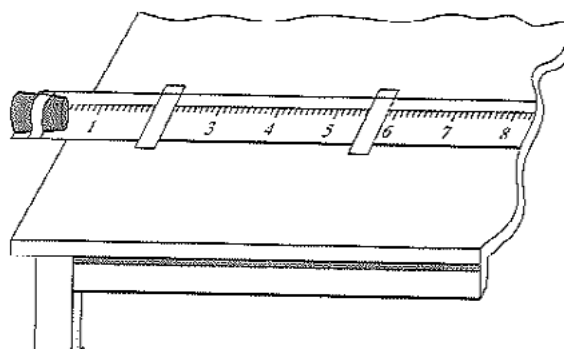
אין בניסוי זה שימוש לשיר בנקב שבמרכז הפס, וניתן להסתפק בסימון נקודת המרכז. בכל זאת כדאי לנקב את מרכז הפס משני טעמים:
א. נקב דק מהווה סימון מדויק של מרכז הפס, ושאלנו נמחק.

ב. פס האלומיניום עשוי לשמש בניסויים אחרים כגון חקירת מומנטים, בהם עשוי להיות שימוש בנקב זה.

בניית המערכת הניסויית

א. הצמד, באמצעות סרט הדבקה, את פקק השעם אל קצה אחד הסרגלים, כמתואר בתרשים 2.

ב. הצמד, באמצעות סרט הדבקה, את הסרגל אל השולחן, כך שהפקק יבלוט מעט מעבר לשפת השולחן (ראה תרשים 2).



ביצוע הניסוי

לכל נקב בפס האלומיניום ניתן מספר סידורי, כמתואר בתרשים 1.

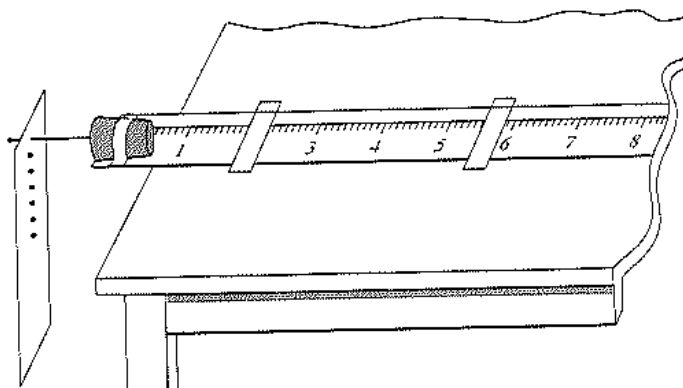
2. לגבי כל אחד מהנקבים 1-6:

א. הכן טבלה כדוגמת טבלה 1, מדוד את המרחק l מהנקב אל מרכז הפס (נקב מספר 7) ורשום את תוצאות המדידה בטבלה, בעמודה שכותרתה

l .

מס' סידורי של הנקב	l (cm)	T (s)	l^2 (cm ²)	$T^2 l$ (s ² ·cm)

ב. העבר את הסיכה דרך הנקב, ונעץ אותה בפקק השעם, כך שהסיכה תהיה אופקית ופס האלומיניום יוכל להתנודד באופן חופשי סביב הסיכה המשמשת ציר סיבוב ובתרישים 3 מתואר מצב זה ביחס לנקב מספר 1).



ג. הסט את פס האלומיניום ממצב שיווי-משקל והרפה ממנו, כך שהוא יתנודד סביב הסיכה, כשהתנודות הן במישור המאונך לסיכה, ומדוד את זמן מחזור התנודות T . תכנן את המדידות כך שתקבל דיוק גבוה בתוצאת המדידה של T . העמודות בטבלה שאין להן כותרת נועדו לרישום תוצאות מדידות ביניים לפני מציאת זמן המחזור.
ד. רשום את זמני המחזור בטבלה בעמודה שכותרתה T .

3. הסבר כיצד ביצעת את המדידות, על-מנת להגדיל את הדיוק במדידה של זמן המחזור T .
4. נסמן: x – רוחב פס האלומיניום; y – אורך פס האלומיניום. מדוד את הערכים x ו y , ורשום את תוצאות המדידות.

ניתוח הממצאים

5. סרטט גרף של זמן המחזור T כפונקציה של l . הערך מתוך הגרף את האורך l , שעבורו זמן המחזור T הוא מינימלי.

המסקנות האמפיריות ותיאוריה

לפניך נוסחה הקושרת בין פרמטרים של המערכת:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{k^2 + l^2}{lg}} \quad (1)$$

כאשר: g - תאוצת הנפילה החופשית;

l - המרחק בין ציר הסיבוב לבין מרכז המסה של הפס (מרכז הפס);

T - זמן מחזור התנודות.

k - קבוע הפס, הניתן על-ידי:

$$k = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{12}} \quad (2)$$

6. הסבר מדוע התלות של T^2 ב- l היא לינארית.
7. חשב ורשום בטבלה את ערכיהם של l^2 ושל T^2 .
8. סרטט גרף של T^2 כפונקציה של l^2 .
9. מצא מתוך הגרף, באמצעות נוסחה (1), את תאוצת הנפילה החופשית g .
10. מצא מתוך הגרף, באמצעות נוסחה (1), את קבוע הפס k .
11. חשב את ערכו של k בעזרת נוסחה (2).
12. השווה בין ערכו של k , שהתקבל מתוך הגרף (סעיף 10), לבין ערכו של k , שהתקבל מנוסחה (2) (סעיף 11). הבע דעתך ביחס למידת הדיוק של התוצאות.

שאלה

13. אילו ביצעת את הניסוי עם פס נחושת שממדיו זהים לממדי פס האלומיניום, האם תוצאות הניסוי היו שונות? נמק.

תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. נותנים לפס המתכת להתנודד סביב ציר אופקי פעמים אחדות – בכל פעם יהיה מרחק^ל אחר של הציר ממרכז הפס. לכל מרחק^ל מודדים את זמן המחזור T . ואחר מכך מתאימים פונקציה המתארת את הקשר בין T לבין l .
^ל הוא המשתנה הבלתי תלוי ו- T המשתנה התלוי.

הערה: במהלך הניסוי, יש להשתדל שהפס יתנודד רק במישור ניצב לסיכה, ולהימנע (במידת האפשר) מתנודות סביב ציר העובר לאורך הפס (תנודות אלה גוברות ככל שציר הסיבוב קרוב יותר למרכז המסה).
 על התנודות להיות בזוויות לא גדולות מדי, כי נוסחה (1) נכונה בקירוב שבו הזוויות קטנות.

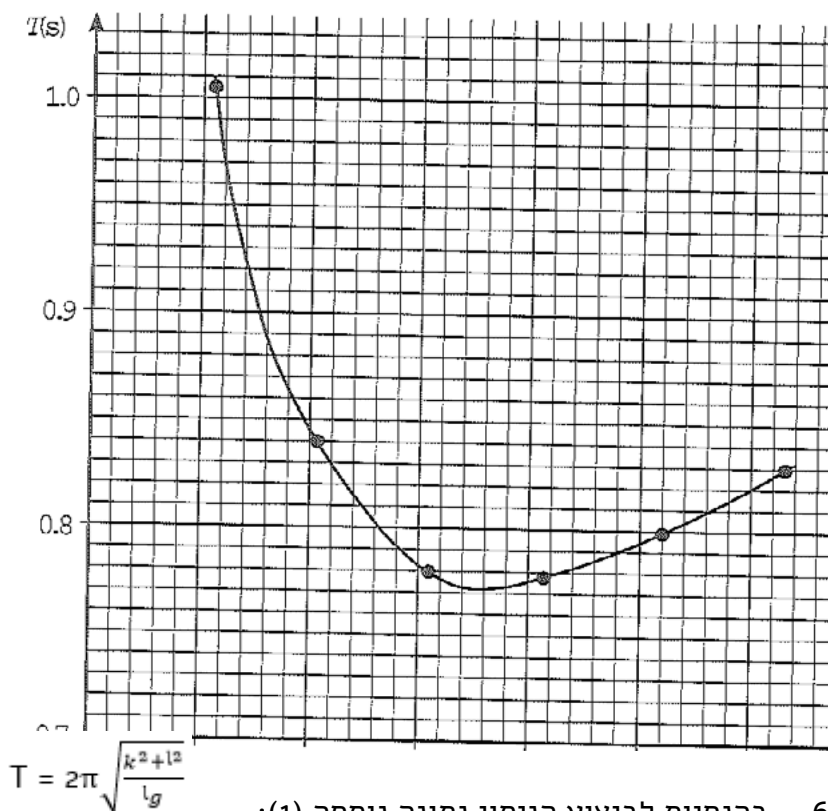
2. בטבלה 2 מוצגות תוצאות מדידות וחישובים.

$T^2 l$ (s ² ·cm)	l^2 (cm ²)	$\bar{T}$ (s)	10T (s)			l (cm)	מס' סידורי של הנקב
			מדידה III	מדידה II	מדידה I		
8.44	150.1	0.83	8.3	8.3	8.3	12.25	1
6.53	104.0	0.80	8.0	8.1	8.0	10.20	2
4.92	65.6	0.78	7.8	7.8	7.8	8.10	3
3.71	37.2	0.78	7.8	7.8	7.8	6.10	4
2.86	16.4	0.84	8.4	8.4	8.4	4.05	5
2.35	4.2	1.07	10.7	10.6	10.7	2.05	6

3. כדי להקטין את אי-הוודאות במדידת זמן המחזור מדדנו את הזמן הדרוש עבור עשר תנודות. עבור כל^ל מדדנו 3 פעמים את הזמן עבור 10 תנודות, כדי לבדוק אי תלות זמן המחזור באמפליטודה (בזווית). לאחר מכן חישבנו את זמן המחזור הממוצע.

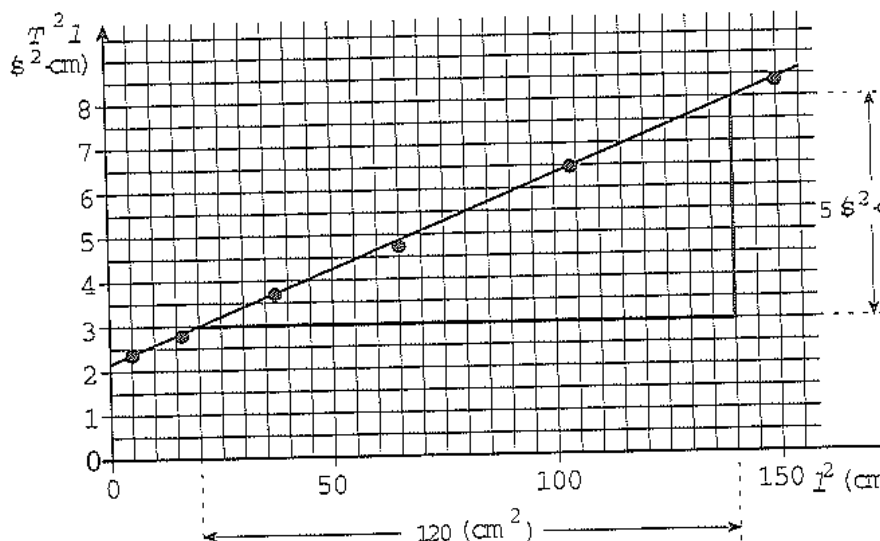
מדידת הזמן בוצעה באמצעות שעון עצר המודד מאיות השנייה. בגלל סדר הגודל של השונות בזמני התגובה של המודד, אין משמעות לסיפרת המאיות, ולכן רשמנו את הזמן עבור עשר תנודות עם סיפרת עשיריות השנייה בלבד.

4. רוחב הפס: $x = 2.0 \text{ cm}$; אורך הפס: $y = 25.2 \text{ cm}$
5. בתרשים 4 מופיע גרף המתאר את זמן המחזור T כפונקציה של l :
לגרף יש נקודת מינימום עבור l שערכו בין 6.1 cm לבין 8.1 cm .



6. בהנחיות לביצוע הניסוי נתונה נוסחה (1):
נעלה את שני אגפי המשוואה בחזקה שנייה, נכפול אותם ב- l ונקבל:
- $$T^2 l = \frac{4\pi^2 k^2}{g} + \frac{4\pi^2}{g} l^2 \quad (3)$$
- מ- (3) ניתן לראות שהעקום המתאר את $T^2 l$ כפונקציה של l^2 אמור להיות קו ישר.
7. ערכיהם של l^2 ו- $T^2 l$ מופיעים בטבלה 1.

8. תרשים 5 הוא הגרף המתאר את T^2 כפונקציה של l^2 .



9. חישוב g מתוך הגרף: שיפוע הישר המתאר את T^2 כפונקציה של l^2

שווה ל- $4\pi^2/g$; יחידות השיפוע הן $\frac{5}{120} \frac{s^2}{cm}$; מתרשים 5 מקבלים כי שיפוע הישר הוא $\frac{5}{120} \frac{s^2}{cm}$, לכן:

$$\frac{4\pi^2}{g} = \frac{5}{120} \frac{s^2}{cm}$$

פתרון המשוואה: $g = 947 \text{ cm/s}^2$. תאוצת הנפילה החופשית שקיבלנו (ביחידות SI):

$$g \approx 9.5 \frac{m}{s^2}$$

10. חישוב k מתוך הגרף: מהתבוננות במשוואה (3) ניתן לראות שהגרף

חותך את הציר האנכי בנקודה ששיעורה שווה ל- $4\pi^2 k^2/g$.

הגרף שקיבלנו חותך את הציר האנכי בנקודה ששיעורה $2.1 \text{ s}^2 \cdot \text{cm}$,

לכן:

$$\frac{4\pi^2 k^2}{947} = 2.1 \text{ s}^2 \cdot \text{cm}$$

פתרון המשוואה: $k \approx 7.3 \text{ cm}$

11. חישוב k על פי נוסחה (2): על פי תוצאות המדידה הרשומות בסעיף

$$k = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{12}} = \sqrt{\frac{25.2^2 + 2^2}{12}} \quad :4$$

$$k \approx 7.3 \text{ cm}$$

12. לא התקבל פער בין שני הערכים עד הסיפרה הראשונה אחרי הנקודה העשרונית.

13. תוצאות הניסוי עם פס נחושת בעל ממדים זהים לפס האלומיניום לא יהיו שונות (למעט כמובן שגיאות מדידה מקריות) כי על פי נוסחה (1), זמן המחזור תלוי רק בגדלים גאומטריים של הפס.

שאלה: כיצד יתכן שהגרף של T^2 כפונקציה של l^2 אינו עובר בראשית? שהרי, כאשר $I^2 = 0$ אז $l = 0$, לכן T^2 צריך להיות שווה לאפס, בסתירה לתוצאות הניסוי!

הערות לגבי התיאוריה (לבקיאים בנושא "מכניקה של גוף קשיח")

א. ערך l שעבורו מתקבל זמן מחזור T מינימלי

בסעיף 5 מצאנו על פי תוצאות הניסוי כי הערך המינימלי של זמן המחזור נתקבל עבור מרחק l שבין 6.1 ס"מ לבין 8.1 ס"מ. נראה על פי נוסחה (1), כי הערך המינימלי של זמן המחזור מתקבל עבור l המקיים $l=k$.

$$T = 2\pi \left(\frac{k^2 + l^2}{lg} \right)^{\frac{1}{2}}$$

תנאי הכרחי לנקודת קיצון הוא התאפסות הנגזרת הראשונה, כלומר:

$$\frac{dT}{dl} = 2\pi \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{k^2 + l^2}{lg} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2l \cdot gl - (k^2 + l^2)g}{(lg)^2} \right) = 0$$

לכן זמן מחזור מינימלי מתקבל עבור $l=k$. התוצאה הניסויית שמצאנו בסעיף 5 אמנם מתאימה למסקנה זו.

ב. פיתוח נוסחאות (1) ו (2) שבהנחות הניסוי פס המתכת המתנודד סביב ציר (הסיכה) מהווה מטוטלת פיזיקלית. זמן המחזור של מטוטלת פיזיקלית המתנודדת בזווית קטנה ייתן יל-ידי הנוסחה:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} \quad (4)$$

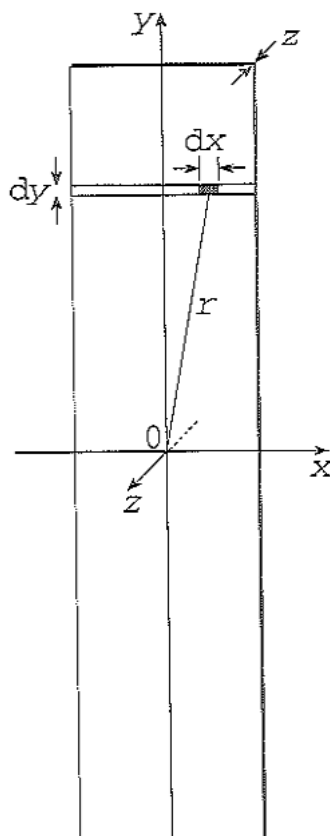
כאשר: l - מומנט ההתמדה של המטוטלת ביחס לציר הסיבוב;

l - מרחק ציר הסיבוב ממרכז המסה של המטוטלת;

m - מסת המטוטלת.

נמצא תחילה ביטוי למומנט ההתמדה I_0 של פס האלומיניום. **העובר דרך מרכז המסה של הפס.**

תרשים 6 מתאר פס אחיד. נבחר מערכת צירים שראשיתה במרכז המסה של הפס, הציר y לאורך הפס, הציר x לרוחבו, והציר z מאונך לשניהם.



מומנט התמדה של גוף מוגדר על-ידי: $I_0 =$

כאשר: r - מרחק אלמנט המסה מציר הסיבוב.

אם צפיפות הגוף אחידה אזי:

$$I_0 = \rho \quad (5)$$

נסמן x - אורך הפס; y - רוחב הפס; z - עובי הפס.

נסתכל על אלמנט מסה שרוחבו dx , אורכו dy , ועוביו z .

$$(6) \quad dV = z dx dy$$

נפחו:

נציב את (6) ב-(5):

$$I_0 = \rho \int r^2 dx dy = \rho z \int_{-\frac{y}{2}}^{\frac{y}{2}} \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} (x^2 + y^2) dx dy$$

$$I_0 = \rho x y z \frac{x^2 + y^2}{12} = \rho V \frac{x^2 + y^2}{12} = m \frac{x^2 + y^2}{12}$$

$$(7) \quad I_0 = m \frac{x^2 + y^2}{12}$$

$$k^2 = \frac{x^2 + y^2}{12}$$

נסמן:

$$(8) \quad I_0 = m k^2$$

ולפיכך:

על פי משפט שטיינר, מומנט ההתמדה ביחס לציר שאינו עובר במרכז המסה, אלא במרחק l ממנו, ניתן על ידי:

$$(9) \quad I = I_0 + m l^2$$

נציב את (8) ב-(9) ונקבל:

$$(10) \quad I = m k^2 + m l^2$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mk^2 + ml^2}{mIg}}$$

נציב את (10) ב-(4) ונקבל:

לסיכום:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{k^2 + l^2}{lg}}$$

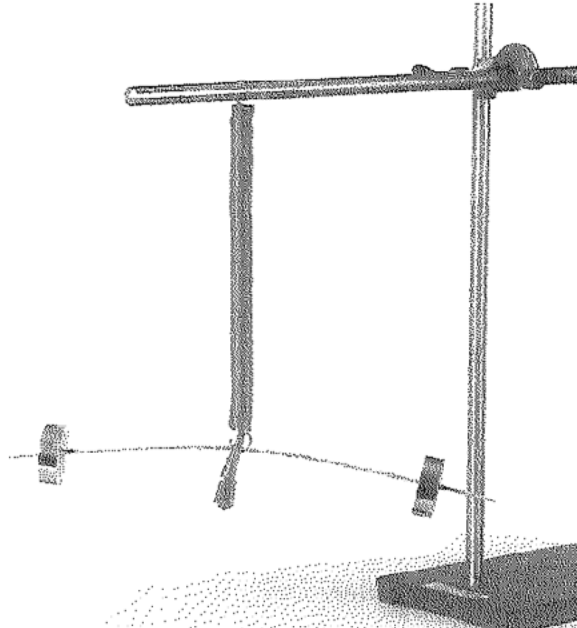
$$k^2 = \frac{x^2 + y^2}{12}$$

חקר 23: מטוטלת פיתול

שאלת חקר



שתי משקולות זהות תלויות בקצה מוט אופקי. מרכז המוט תלוי על קפיץ אנכי. מסובבים את המוט במישור אופקי, מרפים ממנו, והוא מתנדנד.



- א. באילו גורמים תלוי זמן מחזור התנדודות?
- ב. איך תלוי זמן המחזור בכל אחד מהגורמים שציינת?
- ג. איזו נוסחה מתארת את זמן המחזור כפונקציה של המשתנים הבלתי תלויים?

העלאת השערות

מהו השערותיך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקוליך.

תכנון מערך ניסוי

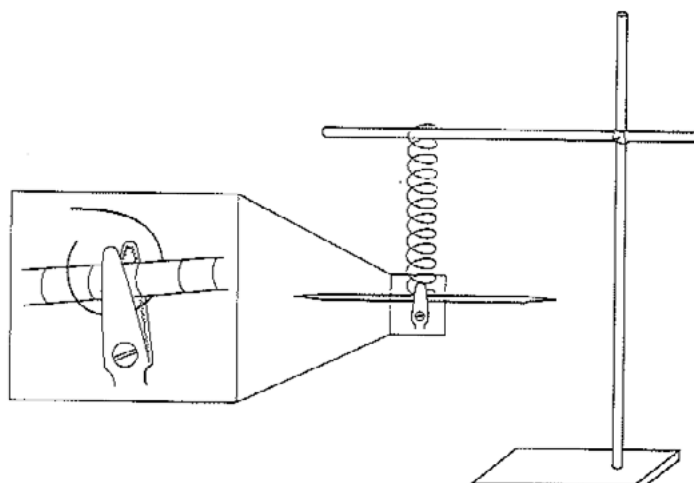
1. תכנון ניסוי לחקירת תלות זמן המחזור בגורמים שונים. ציין איזה משתנה הוא התלוי, ואילו משתנים הם בלתי תלויים.

רשימת בלי המחקר

- (1) כן (סטטיב) עם אוחד;
- (2) מוט שאפשר להדק אותו לכן באמצעות האוחד;
- (3) קפיץ שהקבוע שלו הוא מסדר גודל של 10 ניוטון למטר;
- (4) ארבעה זוגות של משקולות גליליות, שבכל משקולת יש נקב לאורך ציר הגליל: זוג ראשון – כל משקולת בת 20 גרם ("ממערכות אלסטיות", תכנית רחובות מספר קטלוגי 0020); זוג שני – כל משקולת בת 40 גרם (ניתן לחבר 2 משקולות בנות 20 גרם); זוג שלישי – 50 גרם (ממערכת ברנדייס) וזוג רביעי – כל משקולת בת 100 גרם (ממערכת ברנדייס). יש לעטוף כל גליל בסרט הדבקה, כך שיכסה כל נקב משני צידיו;
- (5) קיסם (שיפוד) שאורכו 30 ס"מ, מחודד משני צידיו;
- (6) שעון עצר;
- (7) סרגל שאורכו 30 ס"מ;
- (8) מצבט תנין ("קרוקודיל");
- (9) סרט הדבקה;
- (10) גיליון אלקטרוני או נייר מילימטרי.

בניית המערכת הניסויית

- ב. תלה את הקפיץ על המוט האופקי המחובר לכן (תרשים 1).
- ג. חבר באמצעות מצבט התנין את קיסם העץ אל קצהו התחתון של הקפיץ התלוי (תרשים 2). הקפד על כך שהקיסם יהיה אופקי, ושהוא יהיה מהודק היטב לקפיץ.
- ד. השחל כל אחת משתי המשקולות בנות 20 גרם על הקיסם משני צידי נקודת התלייה תוך ניקוב סרט ההדבקה, כך שהקיסם ישאר מאוזן (ראה תצלום המופיע בניסוח שאלת החקר).



2. סובב אופקית את הקיסם בזווית מסוימת והרפה. הקיסם עם המשקולות מבצע תנודות. בדוק האם זמן המחזור תלוי במשרעת (אמפליטודה) התנודה (המשרעת היא הזווית בה סובבת את הקיסם).

3. בצע סדרה של 4 ניסויים, שבכל אחד מהם המרחק R של המשקולות מנקודת התלייה של הקיסם יהיה שונה. מדוד בכל ניסוי את R ואת זמן המחזור T , ורשום את תוצאות המדידות בטבלה כדוגמת טבלה 1. ערוך את המדידות של זמן המחזור כך שאי-הוודאות בערך המספרי של זמן המחזור תהיה קטנה. וודא כי בזמן התנודות המשקולות אינן מתרחקות מנקודת התלייה.

				m	R

4. עבור אותם ארבעה ערכים של R , בצע את הניסוי המתואר בסעיף 3 עבור זוגות המשקולות שמסותיהן 40 גרם, 50 גרם ו-100 גרם. רשום את ממצאי הניסוי בטבלה.
5. א. תאר כיצד ערכת את המדידות כך שאי-הוודאות בערך המספרי של זמן המחזור תהיה קטנה.
- ב. כיצד מדדת את מרחק המשקולות מנקודת התלייה?

ניתוח ממצאי הניסוי

6. א. סרטט, במערכת צירים אחת, ארבעה גרפים של זמן מחזור התנודות T כפונקציה של המרחק R (כל גרף עבור זוג אחר של משקולות).
- ב. מצא את המשוואה של כל אחד מארבעת הגרפים, ואת ריבועי מקדמי המיתאם.
- ג. רשום תבנית מתמטית כללית של T כפונקציה של R .
7. א. סרטט, במערכת צירים אחת, ארבעה גרפים של זמן מחזור התנודות T כפונקציה של המסה m (כל גרף עבור מרחק R אחר).
- ב. מצא את המשוואה של כל אחד מארבעת הגרפים (הזכר בקשר בין T לבין m בתנועה מחזורית אחת). מצא את ריבועי מקדמי המיתאם.
- ג. רשום תבנית מתמטית כללית של T כפונקציה של m .
8. רשום תבנית מתמטית המתארת את תלות זמן המחזור T ב- R וב- m .

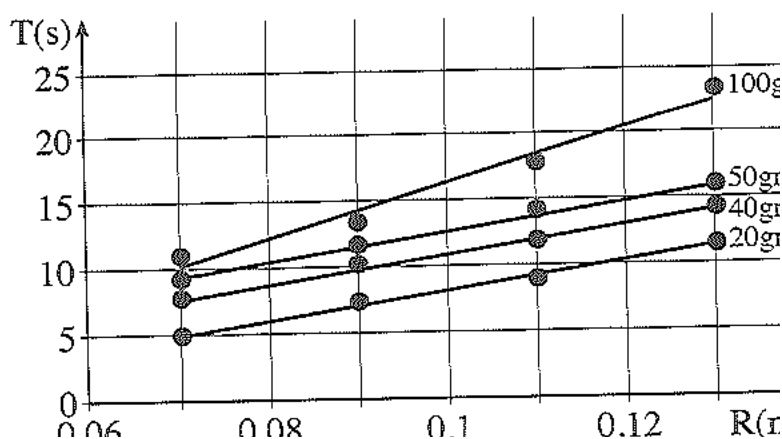
תוצאות של מדידות, ותשובות לשאלות

1. הגורמים שאותם ניתן לשנות (מלבד הקפיץ) הם המרחק R של המשקולות מנקודת התליה של הקיסם, והמסה m של משקולת. כדי לחקור את תלות זמן המחזור T (המשתנה התלוי) ב- R (משתנה בלתי תלוי) יש לבצע ניסויים שבהם המסה m קבועה, ועבור ערכים שונים של R מודדים את זמן המחזור T . כדי לחקור את תלות זמן המחזור T ב- m (משתנה בלתי תלוי) יש לבצע ניסויים שבהם המרחק R קבוע, ועבור ערכים שונים של m מודדים את T .
2. זמן המחזור אינו תלוי במשרעת. בדקנו זאת על-ידי מדידת חמישה מחזורים - פעם ב"זווית קטנה", פעם ב"זווית בינונית", ופעם ב"זווית גדולה". זמני מחזור היו בקירוב שווים (תוצאות מדידות אלה אינן מוצגות כאן).

3-4. תוצאות מדידות וחישובים רשומות בטבלה 2.

$m(kg)$	0.02	0.04	0.05	0.1	$R(m)$
0.07	5.17	7.80	9.42	10.90	
0.09	7.09	9.94	11.86	13.54	
0.11	8.89	11.84	13.85	17.85	
0.13	11.37	14.27	15.90	23.31	

5. א. את זמן המחזור מדדנו כך: מדדנו את משך הזמן של 5 תנודות. ניתן היה להסתפק במדידה זו, ולחלק את הזמן הנמדד ב-5 כדי למצוא את זמן המחזור. אולם אנו חזרנו שתי פעמים על מדידת הזמן של 5 תנודות. חישבנו את ממוצע הזמנים של 5 התנודות, ואת התוצאה חילקנו ב-5.
- ב. כדי למצוא את מרחק המשקולות מנקודת התליה מדדנו את המרחק בין מרכזי המשקולות, ואת התוצאה חילקנו ב-2.
6. א. סרטטנו באמצעות גיליון אלקטרוני ארבע דיאגרמות פיזור של T כפונקציה של R . עבור ערכים שונים של מסת משקולת m . דיאגרמות הפיזור נראו לינאריות, לכן העברנו את ארבעת הישרים המתאימים ביותר לדיאגרמת הפיזור. ארבעת הגרפים מתוארים בתרשים 3.



ב. משוואות הישרים הן:

$$T = 207.7 R - 4.4 \quad \text{עבור } m = 0.1 \text{ kg}$$

$$R^2 = 0.9773 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

$$T = 107.2 R + 2.0 \quad \text{עבור } m = 0.05 \text{ kg}$$

$$R^2 = 0.9978 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

$$T = 106.6 R + 0.3 \quad \text{עבור } m = 0.04 \text{ kg}$$

$$R^2 = 0.9978 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

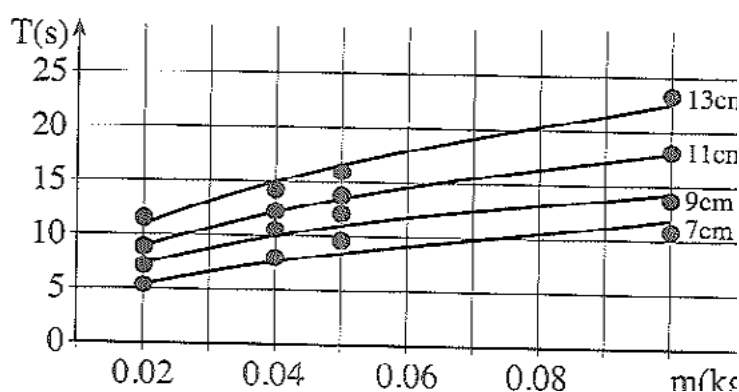
$$T = 102.0 R - 2.1 \quad \text{עבור } m = 0.02 \text{ kg}$$

$$R^2 = 0.9947 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

ג. התבנית המתמטית של T כפונקציה של R:

$$(1) \quad T \propto R \quad \text{כאשר } m \text{ קבוע:}$$

7. א. סרטטנו (באמצעות גיליון אלקטרוני) ארבע דיאגרמות פיזור של T כפונקציה של m, עבור ערכים שונים של R. דיאגרמות הפיזור לא ניראו לינאריות. על סמך זאת, ועל סמך הידע שבתנועה הרמונית $T \propto \sqrt{m}$ סרטטנו עקומות חזקה המתאימות ביותר לדיאגרמת הפיזור. הגרפים מתוארים תרשים 4:



ב. משוואות הישרים הן:

$$T = 62.8 m^{0.45} \quad \text{עבור } R = 0.13 \text{ m}$$

$$R^2 = 0.9775 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

$$T = 49.6 m^{0.44} \quad \text{עבור } R = 0.11 \text{ m}$$

$$R^2 = 0.992 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

$$T = 36.8 m^{0.41} \quad \text{עבור } R = 0.09 \text{ m}$$

$$R^2 = 0.9395 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

$$T = 34.6 m^{0.47} \quad \text{עבור } R = 0.07 \text{ m}$$

$$R^2 = 0.9325 \quad \text{ריבוע מקדם המיתאם:}$$

ג. על סמך ממצאי הניסוי, אפשר לרשום כי בקירוב:

$$(2) \quad T \propto \sqrt{m} \quad \text{כאשר } R \text{ קבוע:}$$

8. מקשרים (1) ו-(2) נובע כי:

$$T \propto R\sqrt{m}$$

חקר 24: וילהלם-טל, בנו והתפוח

שאלת חקר



על-פי מסורת עממית שווצרית, הצייד וילהלם-טל ניצטווה לירות חץ אל תפוח שהונח על ראש בנו. הוא ירה - והחץ ננעץ בתפוח.



נניח, כי מלבד לפגוע בתפוח, וילהלם-טל היה מציב לעצמו מטרה נוספת - שהתפוח (עם החץ הנעוץ בו) ייזרק למרחק מרבי. באשפתו של וילהלם טל היו חצים בעלי מסות שונות. איזה חץ היה עליו לבחור כדי להשיג את מטרתו? הנח, לשם פשטות, כי ללא תלות בחץ שנורה -

- א. הקשת מותח את הקשת באותה מידה.
- ב. באוויר, תנועת החץ היא אופקית, ומהירותו קבועה.
- ג. התפוח נזרק מראש הבן כשהחץ נעוץ בו.

העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקולך.

כלי המחקר

גליון אלקטרוני.

ניתוח הבעיה

1. א. בטא, באמצעות פרמטרים שתבחר, את המהירות u שבה התפוח עם חץ הנעוץ בו נזרקים מראש הילד. השתמש בסימונים: M – מסת התפוח; m – מסת חץ.
- ב. אילו מבין הגדלים המופיעים בביטוי שפיתחת בסעיף ו' לעיל הם קבועים, ואילו משתנים?

פתרון נומרי של הבעיה

2. רשום את הביטוי שמצאת בסעיף ו' במכפלה של שני גורמים: גורם אחד קבוע, וגורם אחר התלוי במסת החץ m . סמן את הגורם שתלוי ב- m באות y . בהמשך תמצא את ערכו של m שעבורו y מרבי. עבור ערך זה של m גם המהירות u היא מרבית.
 3. הגדר יחידת מסה חדשה, שבה מסת התפוח שווה ל-1. יחידה זו שונה מיחידת המסה ק"ג. נוכל לכנות אותה בכל שם שנבחר, למשל בשם "תפ" (מהמילה תפוח). מסת החץ תמדד אף היא ביחידה תפ.
- עתה נפנה לחשב, בעזרת הגליון האלקטרוני, את ערכו של y עבור חץ שמסתו, m_0 , (ביחידה תפ) קטנה מאוד ביחס למסת התפוח. לאחר מכן נחשב את y עבור חץ שמסתו גדולה מעט מ- m_0 בשיעור שיסומן dm . כך נגדיל בכל פעם את מסת החץ בשיעור dm ונחשב את הערך המתאים של y . נבנה גרף של y כפונקציה של m . לבסוף נתבונן בגרף, נבדוק מהי המסה m שעבורה y מרבי.

עיצוב גליון אלקטרוני

2. פתח גליון אלקטרוני, ועצב אותו באופן המתואר בטבלה 1:

- א. פרמטרים בעמודה A:
 מסת התפוח, M - הקלד בתא 1 A6:
 מסה התחלתית של החץ, m_0 - הקלד בתא 0.1 A7:
 קפיצה במסת החץ, dm - הקלד בתא 0.1 A8:

E	D	C	B	A	
	y	m	חקר 23: וילהלם-טל, בנו והתפוח		1
					2
					3
					4
			פרמטרים	רשימת	5
			M	1	6
			m_0	0.1	7
			dm	0.1	8

- ב. סימונים לפרמטרים בעמודה B: למשל, לתא B6 הקלד את האות M.
 סימון זה אינו מהווה הוראה כלשהי למחשב, אלא נועד אך ורק לשם נוחיותו של מי שקורא את הגיליון האלקטרוני.
- ג. שמות לפרמטרים: לשם נוחיות הקלדת נוסחאות וקריאתן, מוצע לכנות בשמות את שלושת הפרמטרים הרשומים בתאים 6A, 7A ו-8A (הנחיות לביצוע רשומות בחקר 1).
- ד. תיעוד: מוצע לרשום במשטח מלל כותרת לגיליון (ראה טבלה 1).
- ה. כותרות לטבלה בשורה 1: לתא C1 הקלד m (מסת חץ ביחידה של מסת תפוח), לתא D1 הקלד y (גורם בביטוי ל-u, הכולל את m).
- ו. כנה בשם m את כל הערכים שיופיעו מתחת לכותרת m שבתא C1 (הנחיות לביצוע - ראה חקר 1).
- ז. נוסחאות בשורה 2: לתא C2 הקלד נוסחה שתעתיק לתא זה את התוכן של תא A7. לתא D2 הקלד נוסחה לחישוב y.
- ח. נוסחאות בשורה 3: לתא C3 הקלד נוסחה שתגדיל את הערך הקודם של m ב-dm. שכפל את תא D2 לתא D3.

- ט. שכפול: שכפל את תאים C3 ו-3D עד לשורה שבה m יהיה שווה בערך ל-3.
3. מה משמעות המשפט: "מסת החץ שווה ל-0.1, ביחידה שבה מסת התפוח שווה ל-1"?
4. א. סרטט גרף של y כפונקציה של m .
 ב. עבור איזה ערך מספרי של m יש ל- y ערך מרבי?
 ג. אילו דברים נוספים, מעבר למה שמצאת בסעיף 4ב, תוכל ללמוד מהגרף?
5. כדי להגדיל את ודאות הזיהוי של ערך m שעבורו ל- y יש ערך מרבי, סרטט את הגרף מ- $(m - 0.2)$ עד $(m + 0.2)$ (באשר m הוא הערך שמצאת בסעיף 4ב). הקטן את dm (תא A8) מ-0.1 ל-0.02.
6. נסח תשובה לשאלת החקר.

פתרון אנליטי של הבעיה

7. א. פתור את הבעיה באופן אנליטי (השתמש בנגזרת).
 ב. השווה את תשובתך לסעיף 7א עם תשובתך לסעיף 5.

תוצאות שהתקבלו בגיליון האלקטרוני, ותשובות לשאלות

1. א. נסמן את האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקשת בשיא

הדריכה באות E. על-פי חוק שימור האנרגיה:

$$(1) \quad E = \frac{mv^2}{2}$$

כאשר v - גודל המהירות שבו החץ נורה מן הקשת.

נניח כי מהירות החץ מרגע שיגורו עד פגיעתו בתפוח אינה משתנה (לא בגודלה ולא בכיוונה). חוק שימור התנע לגבי התנגשות החץ עם התפוח:

$$(2) \quad mv = (m + M)u$$

כאשר: u - מהירות הזריקה המשותפת של התפוח עם החץ.

ממשוואות (1) ו-(2) נקבל:

$$(3) \quad u = \sqrt{2E} \frac{\sqrt{m}}{m+M}$$

ב. הגדלים הקבועים בביטוי (3) הם M (כל עוד מדובר באותו תפוח) ו-E.

m משתנה, כי הקשת יכול לבחור חצים כרצונו.

התפוח עם החץ הנעוץ בו יזרקו למרחק מרבי כאשר המהירות U תהיה

מרבית. מאחר ובביטוי (3) הגודל $\sqrt{2E}$ קבוע חיובי, המהירות תהיה

מרבית כאשר הביטוי $y = \frac{\sqrt{m}}{m+M}$ יהיה מרבי. ביחידת המסה תפ, הביטול

$$\text{הופך ל- } y = \frac{\sqrt{m}}{m+1}.$$

2. ג. לערכים שבתאים 7A, 6A ו-8A נתנו את השמות M, mO ו-dm

בהתאמה.

ז. הנוסחה שהקלדנו לתא C2: mO = (אם לא מכנים את המשתנים בשמות,

יש להקליד לתא זה את הנוסחה: $\sqrt{m}$).

לתא D2 הקלדנו את הנוסחה: $\sqrt{m} / (m + M)$. (אם לא

מכנים את המשתנים בשמות, יש להקליד לתא זה את הנוסחה:

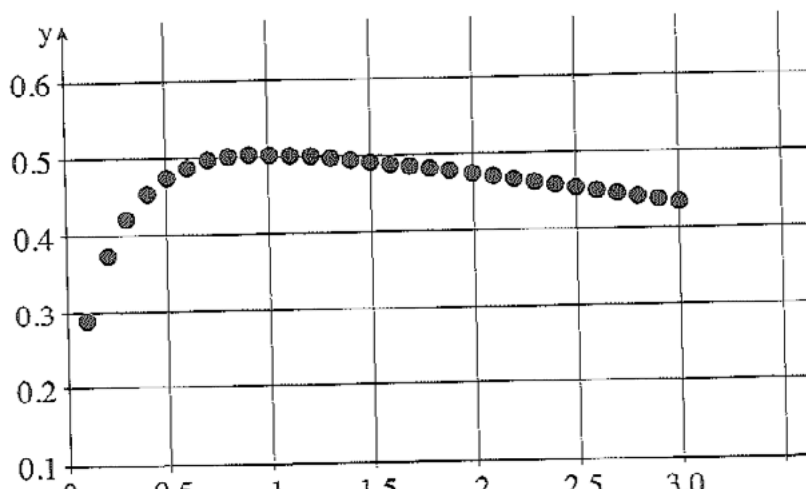
$$\sqrt{C2} / (C2 + M)$$

ח. לתא C3 הקלדנו את הנוסחה $C2 + dm$ (ללא שימוש בשמות

משתנים מקלידים $C2 + \sqrt{m}$).

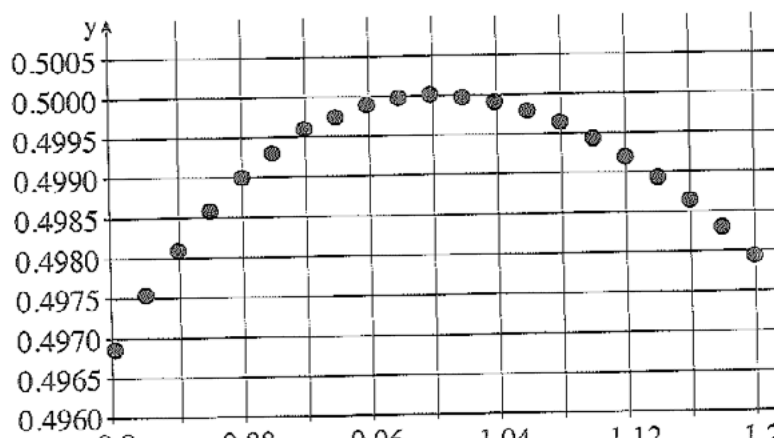
3. משמעות המשפט: מסת החץ שווה לעשירית מסת התפוח.

4. א. הגרף שהתקבל בגליון האלקטרוני מתואר בתרשים 1.



- ב. נראה כי לגרף יש נקודת מקסימום בנקודה שבה $m = 1$ (ביחידה של מסת תפוח) (או בנקודה קרובה לה).
 ג. ניתן לראות מהגרף, כי לכל מהירות (פרט למהירות המרבית), יש שני ערכים של מסת חץ שעבורם התפוח ייזרק במהירות זו.

5. שנה את ערכו של תא A7 ל-0.8, ואת ערכו של תא A8 ל-0.02. הגרף המתאים לערכי מסת חץ מ- $m = 0.8$ עד $m = 1.2$ מתואר בתרשים 2.



(לשם בניית הגרף החלפנו בתא A7 את המספר 0.1 ב-0.8, ובתא A8 את המספר 0.1 ל-0.02).

גם בגרף זה נראה כי הערך המרבי של העקומה מתקבל עבור מסת חץ, m , שערכה 1 תפ. אפשר להמשיך בתהליך, ולסרטט את הגרף עבור ערכי m מ-0.96 תפ עד 1.04 תפ, אך נסתפק במה שעשינו.

6. כדי שהתפוח עם החץ הנעוץ בו יזרקו למרחק מרבי, על מסת החץ להיות שווה למסת התפוח.

7. א. בנוסחה (3) מצאנו כל המהירות המשותפת לתפוח עם החץ היא:

$$u = \sqrt{2E} \frac{\sqrt{m}}{m+M}$$

כאשר מדובר בתפוח בעל מסה מסוימת, וחצים שונים שעשויים לפגוע בו, אזי בקשר האחרון M הוא קבוע, ו- m משתנה. u משתנה כפונקציה של m . נבחן האם לפונקציה זו יש מקסימום, ואם אכן יש לה, נבחן עבור איזה ערך של m הוא מתקיים. לשם כך נגזור את u לפי m :

$$(4) \quad \frac{du}{dm} = \sqrt{2E} \frac{0.5m^{-\frac{1}{2}}(m+M) - \sqrt{m} \cdot 1}{(m+M)^2}$$

תנאי הכרחי לנקודת קיצון הוא שהנגזרת הראשונה תתאפס, לכן:

$$0.5m^{-1/2}(m+M) - \sqrt{m} \cdot 1$$

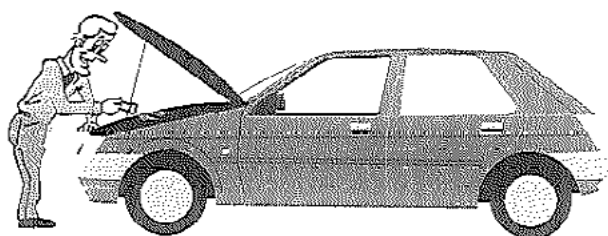
לאחר מספר פעולות אלגבריות מקבלים כל $m = M$. כלומר לפונקציה יש נקודת קיצון עבור חץ שמסתו m שווה למסת התפוח M . אפשר להראות, למשל על-ידי בחינת הנגזרת השנייה, כי הנקודה שמצאנו הלא נקודת מקסימום (ולא נקודת מינימום או נקודת פיתול).
ב. הפתרון האנליטי תואם את הפתרון הנומרי.

חקר 25: הספק מרבי במעגל חשמלי

שאלת חקר



מכוניתו של נהג הפסיקה לפעול בשעות החשכה. כדי לאתר את מקור התקלה, הנהג רצה להאיר את מנוע מכוניתו. לשם כך הוא עמד לבנות מעגל החשמלי הכולל סוללה, ונורה.



לרשותו עמדו סוללה אחת ונורות רבות, השונות זו מזו בהתנגדותן. הערך של בא"מ הסוללה והערך של התנגדותה הפנימית היו ידועים לו. איזו נורה היה עליו לחבר לסוללה, כדי שהספק הסרה יהיה מרבי?

העלאת השערה

מהי השערתך לגבי התשובה לשאלת החקר? ציין את שיקוליך.

כלי המחקר

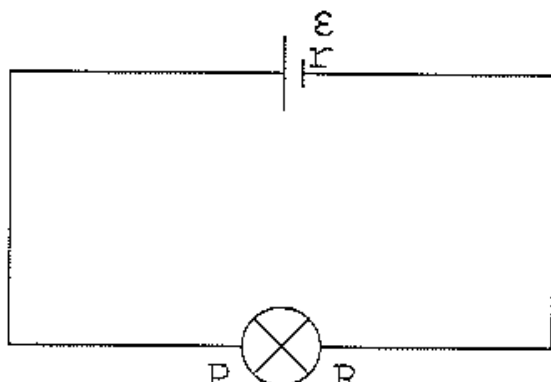
גליון אלקטרוני.

הנחיות לפתרון הבעיה

1. בבעיה זו יש למצוא קשר בין שני משתנים. מי הם המשתנים?
2. פתח נוסחה של הספק נורה, P , כפונקציה של התנגדות הנורה, R .
3. פתור את שאלת החקר באופן נומרי, בדומה לזה שבחקר 24, על פי שלבים א-ד שלהלן.
- א. זהה בנוסחה שפיתחת בסעיף (2) גורם קבוע, וגורם משתנה. הגדר ב- y את הגורם המשתנה.
- ב. הגדר יחידת התנגדות שבה ההתנגדות הפנימית של הסוללה שווה ל-1.
- ג. פתח גליון אלקטרוני ובנה טבלה של ההתנגדות R של הנורה, והספקה P (לצד הטבלה בנה טבלה של פרמטרים).
- ד. סרטט גרף של P כפונקציה של R , ומצא את הערך של R שעבורו הספק הנורה מרבי.
5. פתור את שאלת החקר באופן אנליטי (באמצעות נגזרת).
6. אילו הנחות הנחת לגבי המערכת הפיזיקלית בפתרון שאלת החקר?
7. פתור את הבעיה באמצעות הפתרון לשאלת החקר 24.
- 8.

תוצאות שהתקבלו בגיליון האלקטרוני, ותשובות לשאלות

1. המשתנה הבלתי תלוי הוא ההתנגדות R של הנורה, והמשתנה התלוי הוא הספק הנורה, P .
2. בתרשים 1 מתואר המעגל החשמלי.



- הספק הנורה:
- (1) $P = I^2 R$
- כאשר I – הזרם במעגל החשמלי.

קשר (1) כשלעצמו אינו מתאים לחקירת תלות P ב- R , כיוון שהזרם I תלוי ב- R .

- תלות I ב- R מבוטאת כך:
- (2) $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$

כאשר: ε – הבא"מ של הסוללה;

r – ההתנגדות הפנימית של הסוללה.

- נציב את הביטוי ל- I מקשר (2) בקשר (1) ונקבל:
- (3) $P = \varepsilon^2 \frac{R}{(R+r)^2}$

ביטוי (3) מתאים לחקירת התלות של P ב- R , כי שאר הפרמטרים שבו קבועים.

פתרון נומרי

א. ε^2 המופיע ב-(3) הוא קבוע, לכן כדי למצוא מהל ההתנגדות R שעבורה ההספק P מרבי, די למצוא מהי ההתנגדות R שעבורה יש מקסימום לביטוי:

$$y = \frac{R}{(R+r)^2} \quad (4)$$

ב. אנו רוצים לייצג את קשר (4) בעזרת גרף. אולם, איננו יודעים את ערכה של ההתנגדות r של הסוללה. לכן, נגדיר יחידת התנגדות שבה ההתנגדות הפנימית של הסוללה היא 1. נוכל לכנות יחידת התנגדות זו בכל שם שנבחר.

ג. נפתח גליון אלקטרוני, ונעצב אותו בצורה המתוארת בטבלה 1.

E	D	C	B	A	
	y	x	חקר 24: הספק מרבי במעגל חשמלי		1
					2
					3
					4
					5
			פרמטרים	רשימת	6
			r	1	7
			x0	0	8
			dx	0.2	9

כיוון שלא ניתן לכנות בשם R ערך הנמצא בתא, נציין בגליון האלקטרוני את התנגדות הנורה באות x (במקום באות R).

ערכי פרמטרים וסימונים שלהם: לתא A7 הקלדנו 1 (הערך של ההתנגדות הפנימית), ולתא B7 הקלדנו r (הסימון של ההתנגדות הפנימית). לתא A8 הקלדנו 0 (הערך הראשון (הנמוך) של התנגדות נורה), ולתא B8 הקלדנו את הסימון x_0 .

לתא A9 הקלדנו 0.2 (השיעור שבו נגדיל בכל פעם את התנגדות הנורה), ולתא B9 את הסימון dx .

לאחר הקלדה, כינינו את הפרמטרים שבתאים 8A ו-9A בשמות, שהם הסימונים המופיעים משמאל לתא של כל פרמטר.

לתאים C1 ו-D1 הקלדנו כותרות לטבלה - x ו-y בהתאמה.

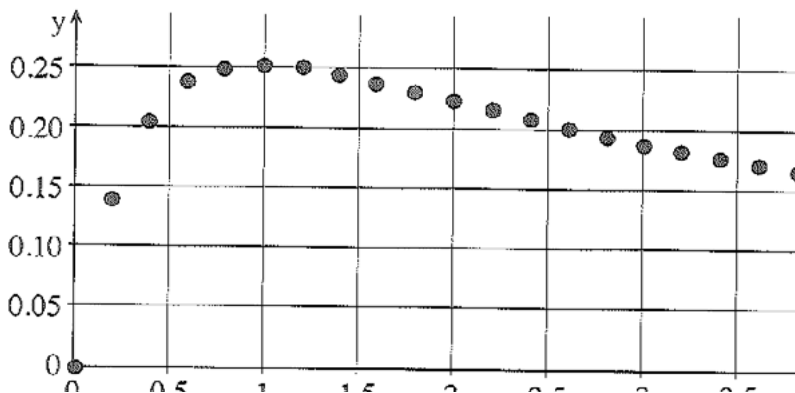
את כל הערכים שיהיו בעמודה C כינינו בשם x (לגבי אופן הביצוע - ראה חקר 1).

לתא C2 הקלדנו את הנוסחה: $= x0$, ולתא D2 הקלדנו $= x / (x + 1)^2$.

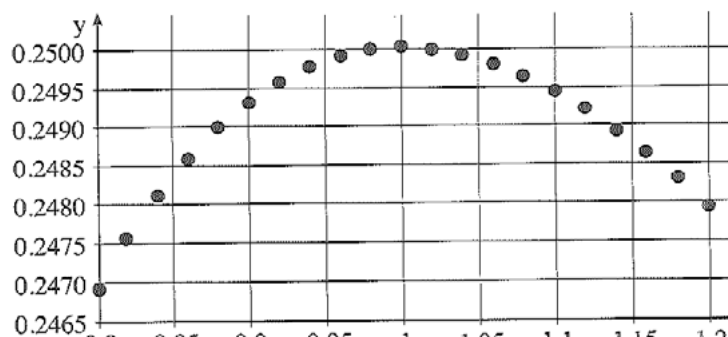
לתא C3 הקלדנו את הנוסחה: $= C2 + dx$, ולתא D3 שבפלנו את הנוסחה שבתא D2.

שבפלנו את תאים C3 ו-D3 עד לשורה שבה $x=4$.

ד. לאחר בניית הגיליון האלקטרוני סרטטנו גרף של y כפונקציה של x. הגרף מתואר בתרשים 2.



מן הגרף נראה כי ההספק המרבי מתקבל כאשר $x = 1$, ביחידה שבה ההתנגדות הפנימית שווה ל-1. ניתן לראות מהגרף כי לכל הספק (פרט להספק המרבי) יש שני ערכי התנגדות של הנורה שעבודם יתקבל הספק זה. כדי להגדיל את הוודאות שההספק המרבי אכן מתקבל עבור $x = 1$ נסרטט קטע של גרף המתואר בתרשים 2 המוגדר בתחום שבו התנגדות הנורה משתנה מ- $x = 0.8$ עד $x = 1.2$. הגרף שהתקבל מוצג בתרשים 3.



גם בגרף 3 נראה כי הערך המרבי של העקומה מתקבל עבור התנגדות נורה
 $x = 1$
 מסקנה:

**כדי שהספק נורה יהיה מרבי, התנגדותה צריכה להיות שווה
 להתנגדות הפנימית של הסוללה.**

4. פתרון אנליטי

נוסחה (3) מתארת את הספק הנורה כפונקציה של התנגדותה:

$$P = \varepsilon^2 \frac{R}{(R+r)^2}$$

בנוסחה זו r ו- ε קבועים, ו- R משתנה.

נגזור את הפונקציה לפי R :

$$\frac{dP}{dR} = \varepsilon^2 \frac{(R+r)^2 - R \cdot 2(R+r) \cdot 1}{(R+r)^4}$$

הנגזרת מתאפסת כאשר: $(R+r)^2 - R \cdot 2(R+r) - 1 = 0$. פתרון
 המשוואה:

$$R = r$$

כלומר הספק הנורה הוא מרבי כאשר התנגדותה שווה להתנגדות הפנימית
 של מקור המתח. מסקנה זו תואמת את הפתרון הנומרי.

5. בפתרון הבעיה הנחנו שהתנגדות הנורה קבועה. במציאות, התנגדות נורה משתנה כפונקציה של הטמפרטורה שלה (ראה חקר 12).

6. בחקר 24 מצאנו כי המקסימום של הפונקציה $y_1 = \frac{\sqrt{m}}{m+M}$ (5)

מתקבל עבור $m = M$.

כאן, בחקר 25, היה עלינו למצוא עבור איזה ערך של R יש לפונקציה

$$(6) \quad y_2 = \frac{R}{(R+r)^2}$$

ערך מרבי.

את פונקציה (6) נרשום כך:

$$y_2 = \left(\frac{\sqrt{R}}{R+r} \right)^2$$

על-פי מה שמצאנו לגבל קשר (5), לפונקציה $\sqrt{R} / (R+r)$ לש ערך מרבי עבור $R = r$. הפונקציה y_2 שווה בכל נקודה ונקודה לריבוע של ערך הפונקציה $\sqrt{R} / (R+r)$ (שהלא חיובית לכל R). לכן לפונקציה y_2 יש מקסימום בנקודה שבה יש לפונקציה $\sqrt{R} / (R+r)$ מקסימום, דהיינו ב- $R = r$.

מסקנה מחקר 25: לפני שאתה יוצא לדרך במכוניתך, הכן מראש פנס טוב, ולא תצטרך לעסוק בחישובים מייגעים.

