

זיהוי פגמים במיתר באמצעות גלים עומדים

מרק גלר, ישיבת בני עקיבא, נתניה
אלכסנדר רובשטיין, מכון דוידסון, רחובות

מה חדש
במעבדה?



מבוא

גלים מכניים תופסים מקום חשוב בלימודי הפיזיקה בבית הספר. הנושא של גלים מכניים עומדים מאפשר התעמקות בלימוד תהליכי התאבכות, עקיפה והחזרה של האור. נושא זה גם מאפשר להסביר את התופעות של קול מוזיקלי ואיכות מוזיקה. היווצרות גלים מכניים בחוט אחיד ידועה לנו היטב. גם תהליכי ההתפשטות של גל מכני מחבל אחיד אחד חבל אחיד אחר שהוא בעל מסה שונה ליחידת אורך, גם הם ידועים לנו. במקרים האלה אנחנו לומדים תהליכי החזרה שבירה של גלים מכניים. תהליך עקיפה של גל מכני מובן פחות לתלמידים למרות שמלמדים את הנושא בבית הספר. הנושא שוב לאופטיקה פיזיקלית העוסקת בהתאבכות ועקיפה של האור.

במאמר זה אנחנו מתארים חקירה שביצענו בעזרת גלים עומדים. בחלק הראשון של העבודה ביצענו סדרת ניסויים בהם אישרנו את הנוסחאות המתארות התלות של מהירות התפשטות הגל בגורמים שונים. בחלק השני חקרנו את מהירות התפשטות של גל בחוט המורכב משני חוטים אחידים השונים זה מזה במסה ליחידת אורך. את התוצאות של הניסוי אישרנו לעקיפה של גל חד-ממדי.

עקיפה של גלים מכניים

עקיפה היא תופעה שבה גלים עוקפים מכשולים או מתפזרים לאחר שעברו דרך סדק (המהווה בעצם פתח בין שני כשולים). העקיפה תלויה ביחס בין אורך הגל ורוחב הסדק או המכשול. אם אורך הגל גדול יותר מרוחב הסדק או מכשול, אז יגיע הגל לכל מקום מעבר להם. אם אורך הגל שווה או קטן יותר מרוחב הסדק או המכשול, אז רואים תמונה אחרת: גל מתפשט מאחורי המכשול בלי לשנות את כיוון התקדמותו. תרשימים 1 ו-2 מייצגים את ההבדלים.



תרשים 1. עקיפה של גל כשאורך הסדק קטן מאורך הגל



תרשים 2. עקיפה של גל כשאורך הסדק גדול מאורך הגל

יש להדגיש שעקיפה היא תכונה של כל גל, בין שהוא מכני ובין שהוא אלקטרומגנטי.

גלים עומדים בחוט אחיד המוחזק בקצוות. כידוע, גלים עומדים מתקבלים במיתר שמוחזק בקצותיו כתוצאה מסופרפוזיציה בין גל הנע לאורך החוט בכיוון אחד לבין גל החוזר מקצה המיתר ומתקדם בכיוון ההפוך. כדי שיווצר במיתר גל עומד, צריך להתקיים התנאי שלפיו אורך המיתר שווה למספר שלם של חצאי אורכי גל:

$$(1) \quad L = n \frac{\lambda}{2}$$

כאשר L - אורך המיתר, n - מספר שלם של חצאי אורכי הגל שנכנסים במיתר. כמו כן, מתקיימים הקשרים הבאים בין הגדלים המאפיינים גלים במיתר:

$$(2) \quad v = \lambda \cdot f$$

כאשר v - מהירות התפשטות הגל, λ - אורך הגל, f - תדירות הגל

$$(3) \quad v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

כאשר T - מתיחות המיתר, μ - מסת המיתר ליחידת אורך,

$$(4) \quad T = \mu \cdot v^2 \quad \text{מנוסחה 3 אפשר לקבל:}$$

המערכת ששימשה למדידת מהירות התפשטות הגל

כדי לחקור את הגל העומד הנוצר במיתר השתמשנו במערכת המוכרת שמוצגת בצילום 16 ובתרשים 4. המערכת מורכבת ממד תדירות, מתנד, מיתר המחובר בקצה אחד למתנד ובקצה השני, דרך גלגלת, למשקולת. המשקולות נועדו לשינוי מתיחות המיתר.



צילום 1. מתקן לחקר גלים מכנים בחוט

מהלך העבודה

- בשלב ראשון ביצענו סדרת ניסויים שבהם מדדנו את מהירות ההתפשטות של גל במיתר כתלות בשני גורמים:
- א. מתיחות המיתר,
 - ב. המסה ליחידת אורך של המיתר (הצפיפות האורכית של המיתר).
- בשלב השני יצרנו מיתר מורכב כמוראה בתרשים 3 וחקרנו את מהירות התפשטות הגל כתלות באורך החלקים שמרכיבים את המיתר.

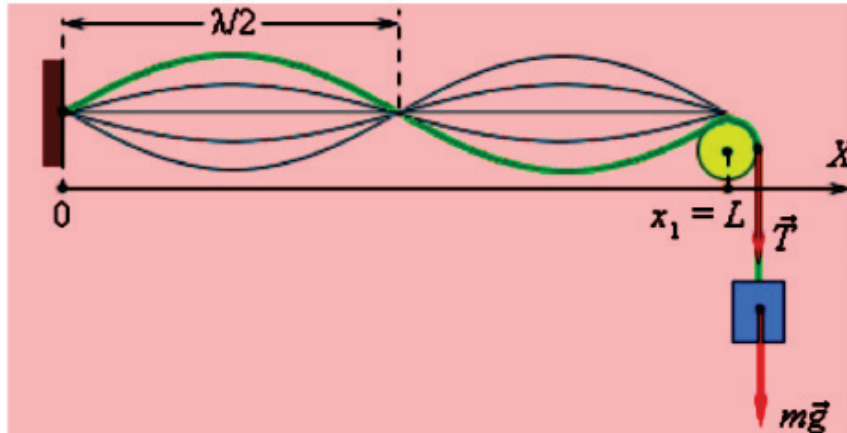


תרשים 3 מיתר המורכב מחוט דק בין שני חוטים עבים

- א. מדידת מהירות התפשטות הגל כפונקציה של מתיחות המיתר. את המתיחות של המיתר קובעים בעזרת המשקולת התלויה (ראו תרשים 4).

כדי למדוד את מהירות ההתפשטות של גל במיתר עבור מתיחות נתונה, מכוונים את התדירות של המתנד עד לקבלת גל עומד. רושמים את התדירות ואת אורך הגל המתאים. משנים את תדירות המתנד עד לקבלת גלים עומדים נוספים בעלי אורכי גל שונים.

את הניסוי ביצענו בשני חוטים: חוט עבה (מסת החוט בעובי ליחידת אורך - 0.00095 ק"ג למטר) וחוט דק (מסת חוט בעובי ליחידת אורך - 0.00032 ק"ג למטר). אורך שני החוטים היה זהה: 1.2 מטר. הניסוי נעשה במתיחויות השוות ל-1, 2 ו-3 ניוטון.



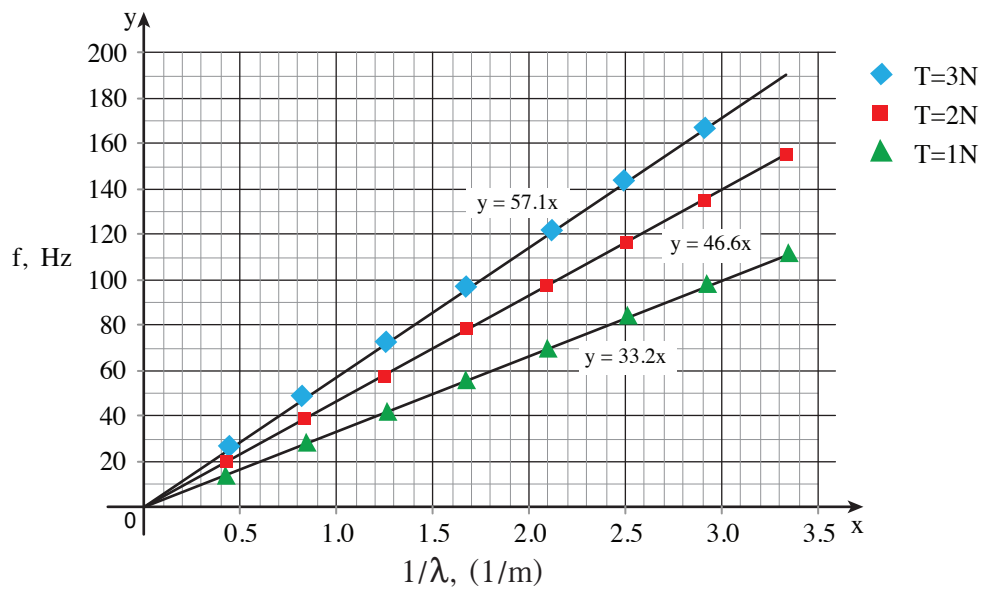
תרשים 4. מדידת מהירות הגל כתלות במתיחות החוט

תוצאות הניסוי מוצגות בטבלה 1

טבלה 1: התדירות f , אורך הגל העומד λ במתיחויות שונות של המיתר עבור מיתר העשוי בד שאורכו 1.2 מטר והמסה ליחידת אורך שלו היא 0.00095 ק"ג/מטר.

מספר חצאי הגל	אורך הגל		T=1N	T=2N	T=3N
n	λ (m)	$1/\lambda$ (1/m)	f, Hz	f, Hz	f, Hz
1	2.40	0.42	25	20	13
2	1.20	0.83	47	39	27
3	0.80	1.25	72	58	41
4	0.60	1.67	97	79	55
5	0.48	2.08	120	98	69
6	0.40	2.50	142	116	83
7	0.34	2.92	165	135	97
8	0.30	3.33		155	111

תוצאות המדידה מוצגות בתרשים 5.



תרשים 5. תלות תדירות ב- $1/\lambda$ במתיחויות שונות (עבור מסה ליחידת אורך של 0.00095 ק"ג/מטר).

ניתן לראות ששיפוע הגרף גדול יותר כשמתיחות החוט גדולה יותר. לפי נוסחה 1 שיפוע הגרף מייצג את מהירות ההתפשטות של הגל בחוט. המהירויות שהתקבלו הן 57.1 , 46.6 , 33.2 מטר בשנייה במתיחויות של 1 , 2 , 3 ניוטון בהתאמה. מכאן שככל שהמתיחות בחוט גדולה יותר, מהירות התפשטות הגל באותו המיתר גדולה יותר. לאחר מכן חישבנו את מהירות הגל בעזרת המתיחות (נוסחה 3). בטבלה 2 מוצגות תוצאות החישוב של מהירות התפשטות הגל בחוט שמסתו ליחידת אורך שווה ל- 0.00095 ק"ג/מטר בשתי הדרכים.

טבלה 2: השוואה בין תוצאות החישוב של המהירות לפי נוסחה 1 ולפי נוסחה 3

T, N	$v, m/sec$ (חישוב לפי מתיחות)	$v, m/sec$ (חישוב לפי תדירות)	הבדל
1	32.4	33.2	2.3%
2	45.9	46.6	-1.6%
3	56.2	57.1	-1.6%

ניתן לראות שהפער בין תוצאות שני החישובים קטן מאוד. מדובר בדיוק גבוה במדידות מהירות הגל.

ב. מדידת מהירות התפשטות הגל כתלות במסת החוט ליחידת אורך

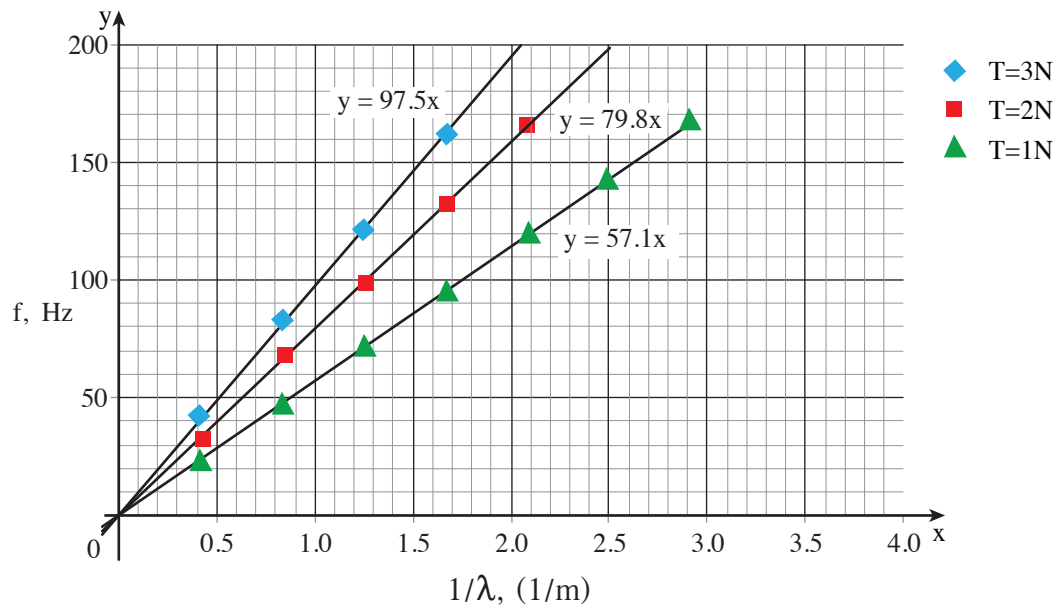
חוזרים על סדרת המדידות המתוארות בניסוי ב' עבור המיתר הדק שהמסה ליחידת אורך שלו היא 0.00032 ק"ג/מטר. גם במקרה זה אורך החוט - 1.2 מ'.

תוצאות הניסוי מוצגות בטבלה 3.

טבלה 3: תדירות f , אורך הגל העומד λ במתיחויות שונות של המיתר עבור מיתר העשוי בד שאורכו 1.2 מטר והמסה ליחידת אורך שלו היא 0.00032 ק"ג/מטר.

מספר חצאי הגל	אורך הגל		T=1N	T=2N	T=3N
n	λ (m)	$1/\lambda$ (1/m)	f, Hz	f, Hz	f, Hz
1	2.4	0.42	23	33	42
2	1.2	0.83	47	68	83
3	0.8	1.25	71	99	121
4	0.6	1.67	95	133	162
5	0.5	2.1	119	166	
6	0.4	2.5	143		
7	0.3	2.9	167		

תוצאות המדידה מוצגות בתרשים 6.

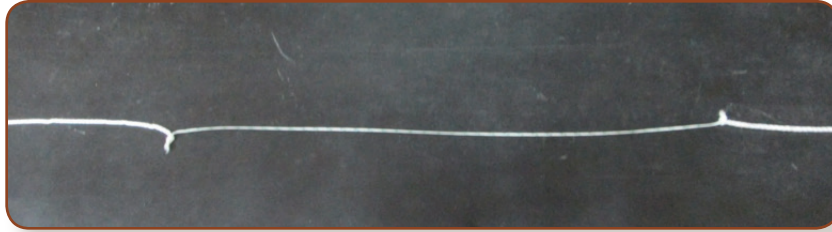


תרשים 6. תלות תדירות ב $1/\lambda$ במתיחויות שונות (עבור מסה ליחידת אורך 0.00032 ק"ג למטר)

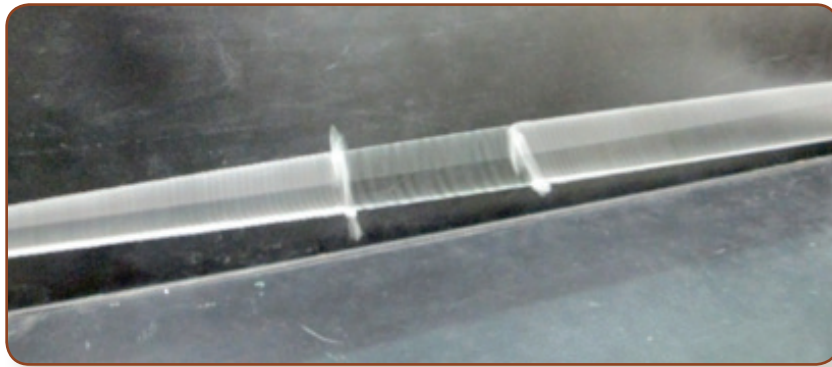
גם במקרה הזה המהירות גדלה כשהמתיחות גדלה. כמו כן ניתן לראות שעבור אותה מתיחות מהירות התפשטות הגל גדולה יותר בחוט שמסתו ליחידת אורך קטנה יותר (תרשים 3). בתרשים 7 ניתן לראות את הקשר בין המסה ליחידת אורך של החוט לבין מהירות התפשטות הגל עבור אותה מתיחות של החוט.

חקר התפשטות של גל בחוט מורכב – "עקיפה" של גל חד-ממדי

על מנת לחקור גלים מכניים בחוט המורכב משני חוטים, בנינו את הדגם הבא:
לקחנו שני חוטים עבים באורך של 32 ס"מ ו-80 ס"מ וחברנו ביניהם חוט דק, פעם באורך של 8 ס"מ ופעם באורך של 30 ס"מ. אורכו של החוט המורכב 120 ס"מ*. את מבנה החוט המורכב ניתן לראות בתרשים 3 ובצילום 2.



צילום 2. חוט דק (8 cm) בין שני חוטים עבים



צילום 3. גל עומד בחוט מורכב. אורך החוט הפנימי 8 ס"מ; אורך הגל 0.8 מ' מתיחות 1 ניוטון



צילום 4. גל עומד בחוט מורכב. אורך החוט הפנימי 8 ס"מ; אורך הגל 0.34 מ' מתיחות החוט 1 ניוטון

משתי התמונות האחרונות רואים שכאשר האורך של הגל גדול מאורך החוט הפנימי, צורת הגל אינה משתנה. תוצאות המדידה נמצאות בטבלה 5 ובתרשים 9.

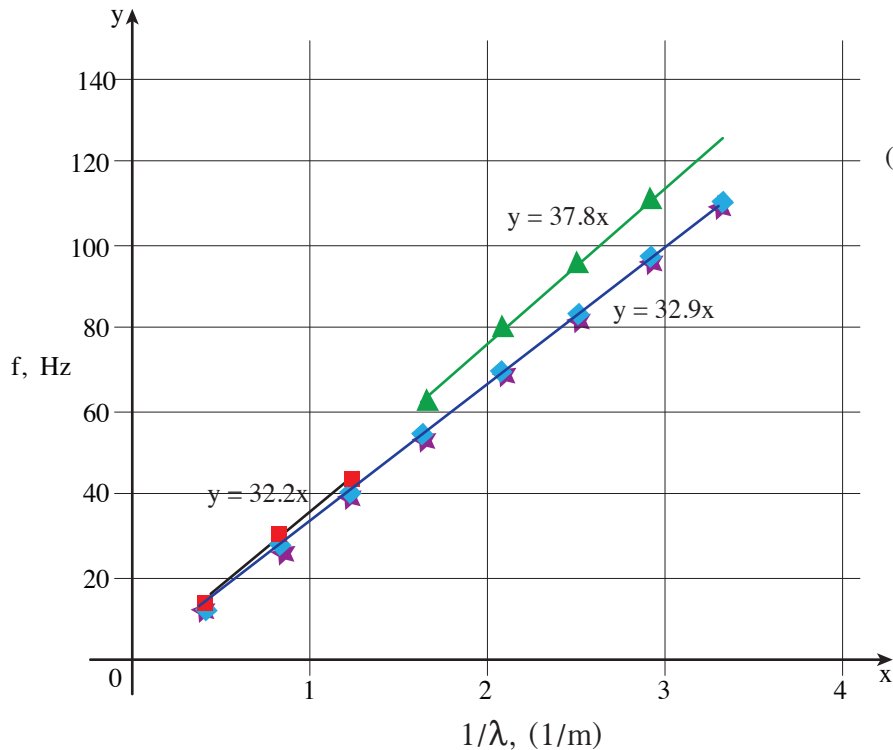
* כאשר החוט הדק קצר יותר, אורכי החוט העבה שונו כדי שיתקבל מיתר שאורכו הכולל הוא 120 ס"מ.

טבלה 5: מדידת תדירות ואורך הגל בחוט אחיד ובשני חוטים מורכבים (בכל החוטים $T=1N$)

מספר חצאי גל (n)	אורך הגל (λ)	$1/\lambda$	f, Hz חוט אחיד	f, Hz חוט מורכב I 30 cm	f, Hz חוט מורכב II 8 cm
1	2.40	0.42	13	15	13
2	1.20	0.83	27	31	27
3	0.80	1.25	41	43	42
4	0.60	1.67	55	60	54
5	0.48	2.08	69	81	67
6	0.40	2.50	83	95	83
7	0.34	2.92	97	110	96
8	0.30	3.33	111		110

מהטבלה ניתן לראות שעבור חוט מורכב שבו אורך החוט האמצעי שווה ל-8 ס"מ, בכל אורכי הגל שנמדדו, מהירות ההתפשטות של הגל שווה בקירוב למהירות ההתפשטות בחוט העבה האחיד. לעומת זאת עבור חוט מורכב שבו אורך החוט האמצעי שווה ל-30 ס"מ, באורכי גל קטנים מ-0.8 מ' מהירות הגל גדולה ממהירות הגל בחוט האחיד.

ממצאים אלה באים לידי ביטוי גם בגרף תרשים 9: בחוט המורכב שבו אורך החוט האמצעי שווה ל-8 ס"מ, קו המגמה שהשיפוע שלו מייצג את מהירות הגל, מתלכד עם קו המגמה של החוט העבה. לעומת זאת עבור חוט המורכב השני, קו המגמה נשבר בערך גל 0.5 מ', כך שעבור אורכי גל קטנים יותר, מהירות ההתפשטות גדולה יותר.



תרשים 9. תלות תדירות ב $1/\lambda$ בחוט מורכב

ניתן להסביר את התוצאות שקיבלנו על סמך מנגנון העקיפה של גלים מכניים כאשר החוט האמצעי מהווה מעין "סדק". במקרה של גל עומד, עקיפה קיימת בתנאי שאורך הגל גדול יותר מאורך הקטע של החוט הדק. כאשר אורך החוט הדק היה 8 ס"מ והאורך של הגל גדול מ-8 ס"מ, הגל "עוקף" את החוט הדק. במקרה השני אורך הגל קצת פחות מ-30 ס"מ, ואנחנו רואים שינוי במהירות הגל (הגל "רואה" את החוט הדק). חשוב לציין שבעזרת שיטה זו ניתן למצוא פגם בחוט האחיד. בטכניקה של עקיפה משתמשים כדי לגלות פגמים בתוך החומר ובתנאי שהפגם הוא מסדר הגודל של אורך הגל.

סיכום

מדדנו את מהירות הגל בעת שנוצר גל עומד בחוט אחיד כתלות במתיחות ובצפיפות האורכית שלו. בכל הניסויים קיבלנו כי מהירות הגל עולה עם העלייה במתיחות ויורדת עם העלייה בצפיפות. כך איששנו את הנוסחה המקשרת בין מהירות של גל היוצר גל עומד לבין המתיחות והצפיפות האורכית של החוט. מדדנו את המהירות של גל היוצר גל עומד בחוט לא אחיד. מצאנו שמהירות הגל אינה משתנה אם אורך החוט הדק המחובר בין שני חוטים עבים קצר ביחס לאורך הגל; אבל היא כן משתנה אם אורכו היחסי קטן. את התופעה קישרנו לעקיפה של גל דרך סדק שרוחבו קטן ביחס לאורך הגל. מתוך כך למדנו שאפשר להשתמש בתופעה זו למציאת פגם שהמידה שלו היא מסדר הגודל של אורך הגל העומד. בתוצאות המחקר ניתן להשתמש בעבודות גמר ובפרויקטים בנושא גלים מכניים. אפשר להשתמש בקטע זה כמבוא לדפקטוסקופיה (איתור פגמים) וכניסיון ראשון להסביר בשיטה פשוטה איך למצוא פגם בתוך החומר.

מקורות

עידו מרבר, קרינה וחומר - כרך א אור וגלים, בונס הוצאות בע"מ, 2010

משה גבלמן, קרינה וחומר, חלק ראשון: הפיזיקה של הגלים, רכס, 2006

יורם אשל, גלים ואופטיקה, הוצאת אשל, רמת השרון, 1993

http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%92%D7%9C_%D7%A2%D7%95%D7%9E%D7%93

<http://davidson.weizmann.ac.il/online/askexpert/physics/%D7%9E%D7%94-%D7%96%D7%94-%D7%92%D7%9C-%D7%A2%D7%95%D7%9E%D7%93-%D7%A8%D7%95%D7%A0%D7%94>

נספח 1: חוטים וחומרים שהשתמשנו בהם בניסויים



צילום 5. חוטים שחקרנו בעבודה

1. חוט עבה (קוטר 1.6 מ"מ, מסה סגולית 0.95 גרם למטר),

2. חוט דק (קוטר 0.6 מ"מ, מסה סגולית 0.32 גרם למטר).