

# גלים אור ואופטיקה



## תוכן העניינים

|    |                                      |
|----|--------------------------------------|
| 1  | 1. מודים עצמיים.....                 |
| 2  | 2. אנליזת פורייה.....                |
| 11 | 3. מבוא לגלים.....                   |
| 12 | 4. גלים רוחביים במיתר.....           |
| 37 | 5. קווי תמסורת.....                  |
| 42 | 6. גלים אורכיים-גלי קול.....         |
| 52 | 7. חבורת גלים ונפיצה (דיספרסיה)..... |
| 61 | 8. גלים דו מימדיים ומנחה גלים.....   |
| 64 | 9. גלים אלקטרו-מגנטיים.....          |
| 82 | 10. אופטיקה.....                     |

# גלים אור ואופטיקה

פרק 1 - מודים עצמיים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים.....1

## הרצאות ותרגילים – מערכת של שתי מסות

### שאלות

#### 1) מסה מחוברת למסה שמחוברת לתקרה

מסה  $m$  מחוברת לתקרה באמצעות קפיץ אנכי בעל קבוע  $2k$ . מסה  $m$  נוספת מחוברת למסה הראשונה באמצעות קפיץ אנכי נוסף בעל קבוע  $k$ . המסות זזות רק בציר האנכי.

א. הסבירו מדוע ניתן להתעלם מכוח הכובד בבעיה זאת, כאשר אנו באים למצוא את התדירויות העצמיות ואת אופני התנודה.

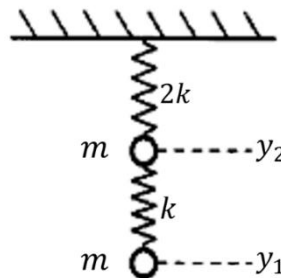
ב. כתבו את מערכת המשוואות בצורה מטריציונית ומצאו את התדירויות העצמיות.

ג. מצאו את אופני התנודה, ותארו אותם.

ד. בזמן  $t = 0$  נותנים מכה קטנה למסה התחתונה, כך שהיא מקבלת מהירות התחלתית  $v_0$ .

מצאו את תנועת המסות כתלות בזמן.

רמז: במקרה זה יהיה יותר פשוט לפרוש את תנאי ההתחלה כאשר הפתרון רשום באמצעות סכום של סינוסים וקוסינוסים.



### תשובות סופיות

1) א. כוח הכובד הוא כוח קבוע. כוחות קבועים מתבטלים על ידי תוספת קבועה של מתיחה לקפיץ. לכן, כוחות קבועים משנים רק את נקודת שיווי המשקל ואינם משפיעים על התדירויות או על אופני התנודה.

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -2.41 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.41 \end{pmatrix}. \quad \text{ג.} \quad w_{1,2} = \pm \sqrt{2 + \sqrt{2}} w_0, \quad w_{3,4} = \pm \sqrt{2 - \sqrt{2}} w_0 \quad \text{ב.}$$

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.63 \\ -1.52 \end{pmatrix} \cdot \frac{v_0}{w_0} \sin(\sqrt{2 + \sqrt{2}} w_0 t) + \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.37 \end{pmatrix} \cdot \frac{v_0}{w_0} \sin(\sqrt{2 - \sqrt{2}} w_0 t) \quad \text{ד.}$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

# גלים אור ואופטיקה

פרק 2 - אנליזת פורייה

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים.....2

## אנליזת פורייה

### טורי פורייה

רקע

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{L}x\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n}{L}x\right) \right]$$

כאשר  $L$  הוא המחזור של הפונקציה (אפשרי גם שהמחזור של הפונקציה יהיה קטן מ  $L$  אבל לא גדול ממנו).

הפונקציה צריכה להיות מחזורית ובמרחב  $L_2$ .

$$A_0 = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) dx$$

$$A_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \cos\left(\frac{2\pi n}{L}x\right) dx$$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{2\pi n}{L}x\right) dx$$

מכפלה פנימית

$$\int_0^L f(x) g(x) dx$$

פונקציות אורתוגונליות

$$\int_0^L \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) dx = 0$$

$$\int_0^L \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) dx = \frac{L}{2} \delta_{nm}$$

$$\int_0^L \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi mx}{L}\right) dx = \frac{L}{2} \delta_{nm}$$

אפשר לתאר באמצעות אותן נוסחאות של טור פורייה גם קטע מתוך פונקציה שאינה מחזורית או פונקציה המוגבלת לתחום מסוים. צריך לזכור שהטור מתאר רק את הקטע המסוים ובשאר המרחב הוא מתאר שכפול של הקטע ולא את הפונקציה המקורית.

טור סינוסים וקוסינוסים לתיאור פונקציה בקטע סופי

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{\pi n}{L} x\right)$$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{\pi n}{L} x\right) dx$$

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{\pi n}{L} x\right)$$

$$A_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \cos\left(\frac{\pi n}{L} x\right) dx$$

טור אקספוננטים :

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{i \frac{2\pi n}{L} x}$$

$$C_0 = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) dx$$

$$C_n = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) e^{-i \frac{2\pi n}{L} x} dx$$

הקשר בין המקדמים בטור אקספוננטים לטור סינוסים וקוסינוסים :

|                                 |                                    |
|---------------------------------|------------------------------------|
| $A_n = C_n + C_{-n}$            | $B_n = i(C_n - C_{-n})$            |
| $C_n = \frac{1}{2}(B_n - iA_n)$ | $C_{-n} = \frac{1}{2}(B_n + iA_n)$ |

$$\frac{A_0}{2} = C_0$$

תופעת גיבס :

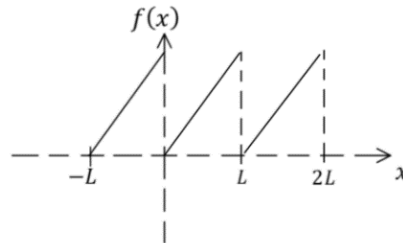
- קרוב לנקודת האי רציפות של הפונקציה המקורית. נראה תנודתיות בפונקציה המתוארת על ידי הטור. תנודתיות זו הולכת וקטנה ככל שמספר האיברים בטור גדל והיא נעלמת לגמרי עבור אינסוף איברים.
- בנקודת אי הרציפות אנחנו נראה סטייה של 0.9% מערך הקפיצה בפונקציה, סטייה זו היא קבועה ואינה קטנה ככל שמגדילים את מספר האיברים (החל ממספר איברים מסוים)

## שאלות

### (1) דוגמה - פונקציית מסור

מצאו את טור פורייה עבור פונקציית מסור:

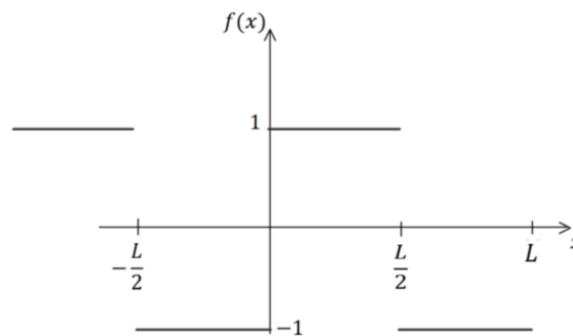
$f(x) = Ax$  כאשר  $0 \leq x < L$  ובעלת מחזור  $L$ . קבוע נתון.



### (2) דוגמה - פונקציית סימן

מצאו את המקדמים של טור פורייה של הפונקציה  $f(x)$  השווה לפונקציית סימן  $sign(x)$ , בתחום  $-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}$  ובעלת מחזור  $L$ . ציירו באמצעות מחשב את המקרה של  $N = 1$ ,  $N = 3$ ,  $N = 10$  ו-  $N = 50$  עבור  $L = 1$

$$sign(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$



### (3) תרגיל - פונקציית משולש

נתונה פונקציית משולש

$$f(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \\ L - x, & \frac{L}{2} \leq x \leq L \end{cases}$$

המוגדרת בתחום  $0 \leq x \leq L$

א. כתבו את הפונקציה כטור פורייה של קוסינוסים וסינוסים.

ב. כתבו את הפונקציה כטור סינוסים.

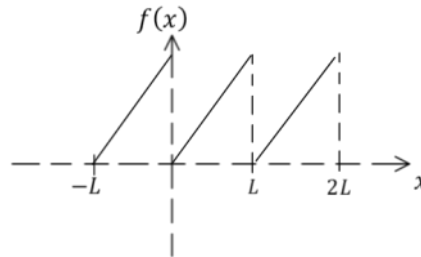
ג. כתבו את הפונקציה כטור קוסינוסים.

ד. הראו כי התוצאה של סעיף ג' מתלכדת עם התוצאה של סעיף א' והסבירו מדוע.



#### 4) תרגיל - פונקציית מסור עם אקספוננטים

א. מצאו את טור אקספוננטים עבור פונקציית המסור מהדוגמה בתחילת הפרק:  $f(x) = Ax$  כאשר  $0 \leq x < L$  ובעלת מחזור  $L$ .  $A$  קבוע נתון.



ב. מצאו את המקדמים של טור סינוסים וקוסינוסים באמצעות המקדמים שמצאתם בסעיף א' והראו שהתשובה זהה לתשובה שקיבלנו בדוגמה של תחילת בפרק.

#### 5) תרגיל - פונקציה לינארית בתחומים שונים

מצאו את טור פורייה של הפונקציה  $f(x) = x$  בתחומים הבאים:

א.  $[0, 2\pi]$

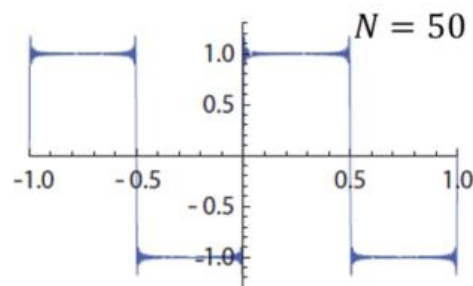
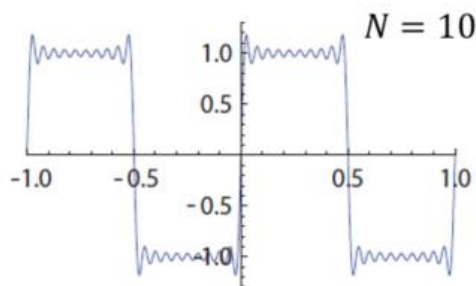
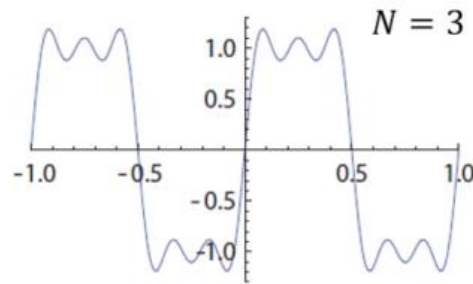
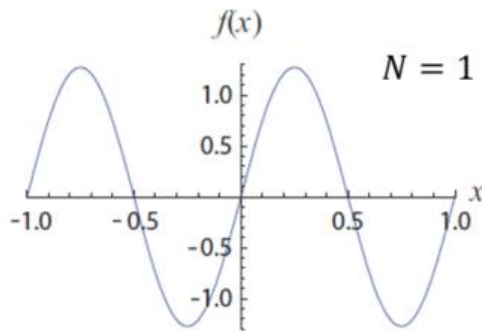
ב.  $[-\pi, \pi]$

ג.  $[0, 4\pi]$

## תשובות סופיות

$$f(x) = \frac{AL}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{AL}{\pi n} \sin\left(\frac{2\pi n}{L}x\right) \quad (1)$$

$$B_n = \begin{cases} \frac{4}{\pi n} & n \text{ odd} \\ 0 & n \text{ even} \end{cases} ; A_n = 0 \text{ לכל } n \quad (2)$$



$$f(x) = \frac{L}{4} - \sum_{n=1, \text{ odd}}^{\infty} \frac{2L}{\pi^2 n^2} \cos\left(\frac{2\pi n}{L}x\right) \quad (3)$$

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4L}{\pi^2 n^2} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{L}x\right) \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{L}{4} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L}{\pi^2 n^2} \left(2 \cos\left(\frac{\pi n}{2}\right) - 1 - (-1)^n\right) \cos\left(\frac{\pi n}{L}x\right) \quad (5)$$

ד. כי שכיפול הפונקציה על מחזור L נותן פונקציה זוגית.

$$f(x) = \frac{AL}{2} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{iLA}{2\pi n} e^{i\frac{2\pi n}{L}x} \quad (6)$$

$$A_0 = AL, A_n = 0, B_n = -\frac{LA}{\pi n} \quad (7)$$

$$f(x) = \pi - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(nx) \quad (8)$$

$$f(x) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} (-1)^n \sin(nx) \quad (9)$$

$$f(x) = 2\pi - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n} \sin\left(\frac{n}{2}x\right) \quad (10)$$

## התמרת (טרנספורם) פורייה

### רקע

התמרה (טרנספורם) פורייה

$$F(k) = FT[f(x)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx$$

התמרה הפוכה

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{ikx} dx$$

### תכונות:

1. לינאריות :  $FT[\alpha f(x) + \beta g(x)] = \alpha FT[f(x)] + \beta FT[g(x)]$

אם  $f(x) \in G$  אז  $\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)| dx \neq \infty$

• אם  $f(x) \in G$  אז  $F(k)$  רציפה

• אם  $f(x) \in G$  אז  $\lim_{k \rightarrow \pm\infty} F(k) = 0$ , רימן - לבג

• אם  $f(x)$  זוגית אז  $F(k) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} f(x) \cos(kx) dx$

• אם  $f(x)$  אי-זוגית אז  $F(k) = -\frac{i}{\pi} \int_0^{\infty} f(x) \sin(kx) dx$

• אם  $f(x)$  ממשית אז  $\overline{F(k)} = F(-k)$

### התמרות של פונקציות מיוחדות:

גאוסיאן

$$FT[Ae^{-\alpha x^2}] = \frac{Ae^{-\frac{k^2}{4\alpha}}}{2\sqrt{\pi\alpha}}$$

אקספוננט



$$FT[Ae^{-\alpha|x|}] = \frac{\alpha A}{\pi(\alpha^2 + k^2)}$$

לורנציאן

$$FT\left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + x^2}\right] = \frac{1}{2}e^{-\alpha|k|}$$

פונקציית דלתא

$$FT[\delta(x)] = \frac{1}{2\pi}$$

קבוע

$$FT[1] = \delta(k)$$

נוסחת הכפל באקספוננט, קוסינוס או סינוס (מודולציה):

$$FT[f(x)e^{iCx}] = F(k - C)$$

$$FT[f(x)\cos(Cx)] = \frac{F(k - C) + F(k + C)}{2}$$

$$FT[f(x)\sin(Cx)] = \frac{F(k - C) - F(k + C)}{2i}$$

נוסחת הכיווץ והזזה:

$$FT[f(ax + b)] = \frac{1}{|a|} e^{i\frac{kb}{a}} F\left(\frac{k}{a}\right)$$

נוסחת הנגזרת:

אם  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = 0$  ו-  $f(x), f'(x) \in G$ :

$$FT[f'(x)] = ikF(k)$$

נוסחת המומנט:

אם  $xf(x) \in G$  אז  $F(k)$  גזירה ברציפות ו-  $i \frac{d}{dk} F(k) = FT[xf(x)]$

## שאלות

### (1) דוגמה - אקספוננט עם פונקציית טטה

חשבו את התמרת פורייה של הפונקציה:

$$f(x) = Ae^{-ax}\theta(x)$$

כאשר  $\theta(x)$  היא פונקציית Heaviside המוגדרת לפי:  $\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$

### (2) דוגמה - פונקציית חלון

חשבו את התמרת פורייה של פונקציית חלון המוגדרת לפי:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & -1 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{אחרת} \end{cases}$$

### (3) דוגמה - חלון מורחב

חשבו את התמרת פורייה של פונקציית חלון מורחב המוגדרת לפי:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & -r \leq x \leq r \\ 0, & \text{אחרת} \end{cases}, \text{ כאשר } r > 0$$

### (4) תרגיל - נגזרת של לורנציאן

השתמשו בנוסחת הנגזרת ומצאו את התמרת פוריה של הפונקציה

$$f(x) = \frac{x}{(x^2 + a^2)^2}$$

### (5) תרגיל - חלון כפול איקס

השתמשו בנוסחת המומנט וחשבו את התמרת פורייה של הפונקציה:

$$f(x) = \begin{cases} x, & -1 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{אחרת} \end{cases}$$

### (6) תרגיל - גאוסיאן כפול איקס בריבוע

מצאו את התמרת פורייה של הפונקציה  $f(x) = x^2 e^{-ax^2}$ .

### (7) תרגיל - משוואה עם נגזרת ראשונה

פתרו את המשוואה הבאה  $\frac{d}{dt}q(t) + bq(t) = f_0 e^{-at}\theta(t)$

כלומר מצאו את  $q(t)$  באופן מפורש עבור  $a, b > 0$ .

רמז: מצאו את הפירוק לשברים חלקיים לפי הדרך הבאה

$$\frac{1}{(x+b)(x+a)} = \frac{A}{x+b} + \frac{B}{x+a}$$

## תשובות סופיות

$$\frac{A}{2\pi(a+ik)} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\pi} \sin c(k) \quad (2)$$

$$\frac{\sin(rk)}{\pi k} \quad (3)$$

$$\frac{-ik}{4\alpha} e^{-\alpha(k)} \quad (4)$$

$$\frac{i}{\pi} \left( \frac{k \cos k - 1 \cdot \sin k}{k^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{e^{\frac{k^2}{4\alpha}}}{4\sqrt{\pi\alpha^3}} \left( 1 - \frac{k^2}{2\alpha} \right) \quad (6)$$

$$q(t) = \frac{1}{b-a} f_0(e^{-at} - e^{-bt}) \theta(t) + Ce^{-bt} \quad (7)$$

# גלים אור ואופטיקה

פרק 3 - מבוא לגלים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 11

## הרצאות ותרגילים – מערכת של שתי מסות

### שאלות

#### 1) מסה מחוברת למסה שמחוברת לתקרה

מסה  $m$  מחוברת לתקרה באמצעות קפיץ אנכי בעל קבוע  $2k$ . מסה  $m$  נוספת מחוברת למסה הראשונה באמצעות קפיץ אנכי נוסף בעל קבוע  $k$ . המסות זזות רק בציר האנכי.

א. הסבירו מדוע ניתן להתעלם מכוח הכובד בבעיה זאת, כאשר אנו באים למצוא את התדירויות העצמיות ואת אופני התנודה.

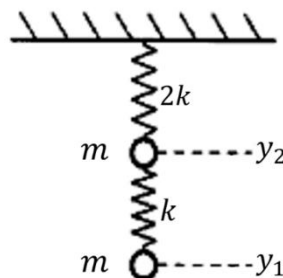
ב. כתבו את מערכת המשוואות בצורה מטריציאלית ומצאו את התדירויות העצמיות.

ג. מצאו את אופני התנודה, ותארו אותם.

ד. בזמן  $t = 0$  נותנים מכה קטנה למסה התחתונה, כך שהיא מקבלת מהירות התחלתית  $v_0$ .

מצאו את תנועת המסות כתלות בזמן.

רמז: במקרה זה יהיה יותר פשוט לפרוש את תנאי ההתחלה כאשר הפתרון רשום באמצעות סכום של סינוסים וקוסינוסים.



### תשובות סופיות

1) א. כוח הכובד הוא כוח קבוע. כוחות קבועים מתבטלים על ידי תוספת קבועה של מתיחה לקפיץ. לכן, כוחות קבועים משנים רק את נקודת שיווי המשקל ואינם משפיעים על התדירויות או על אופני התנודה.

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -2.41 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.41 \end{pmatrix}. \quad \text{ג.} \quad w_{1,2} = \pm \sqrt{2 + \sqrt{2}} w_0, \quad w_{3,4} = \pm \sqrt{2 - \sqrt{2}} w_0. \quad \text{ב.}$$

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.63 \\ -1.52 \end{pmatrix} \cdot \frac{v_0}{w_0} \sin(\sqrt{2 + \sqrt{2}} w_0 t) + \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.37 \end{pmatrix} \cdot \frac{v_0}{w_0} \sin(\sqrt{2 - \sqrt{2}} w_0 t) \quad \text{ד.}$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$



# גלים אור ואופטיקה

פרק 4 - גלים רוחביים במיתר

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגולים ..... 12

## גלים רוחביים במיתר

### משוואת הגלים במיתר

משוואת הגלים היא  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$ , כאשר

$T$  – המתח במיתר

$\rho$  – צפיפות המסה ליחידת אורך

$\psi$  – פונקציית הגל, מתארת את התנועה הרוחבית של כל חתיכה במיתר.

מהירות הגל היא  $v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$ .

פתרון המשוואה:

$$\Psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + B \sin(kx - \omega t) + C \cos(kx + \omega t) + D \sin(kx + \omega t)$$

יחס הדיספרסיה:  $\omega = v \cdot k$ .

אפשרויות נוספות לפתרון (על ידי שימוש בזהויות טריגונומטריות)

$$\begin{aligned} \Psi(x, t) &= A_1 \cos(kx - \omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(kx + \omega t + \varphi_2) = \\ &= B_1 \cos kx \cos \omega t + B_2 \cos kx \sin \omega t + B_3 \sin kx \cos \omega t + B_4 \sin kx \sin \omega t = \\ &= C_1 \cos kx \cos(\omega t + \varphi_1) + C_2 \sin kx \cos(\omega t + \varphi_2) \end{aligned}$$

שתי האפשרויות האחרונות עדיפות לגלים עומדים.

### פתרון במספרים מרוכבים

$$\psi(x, t) = A_1 e^{i(kx + \omega t)} + A_2 e^{i(kx - \omega t)} + A_3 e^{-i(kx + \omega t)} + A_4 e^{-i(kx - \omega t)}$$

אם הפונקציה ממשית, אז  $A_3 = A_1^*$  ו-  $A_4 = A_2^*$ , והפתרון מתכנס לחלק הממשי של

$$\psi(x, t) = A e^{i(kx - \omega t)} + B e^{-i(kx + \omega t)}$$

## שאלות

## (1) תרגיל – סטודנטית מודדת את כוח הכובד

סטודנטית רוצה למדוד את תאוצת כוח הכבידה ( $g$ ) המקומי, הסטודנטית תולה חוט אנכי ומחברת אליו משקולת בעלת מסה  $M = 2\text{kg}$ . נתון שלחבל יש מסה של  $m = 5\text{gr}$  (ניתן להניח התפלגות אחידה) ואורך של  $l = 1.2\text{m}$ . הסטודנטית שולחת מספר פולסים לאורך החבל ומודדת שהזמן הממוצע שלוקח לפולס להגיע מקצה לקצה הוא  $t = 17.5\text{ms}$  (מילי שניות). חשבו את  $g$  (ניתן להזניח את משקל החוט ולהשתמש רק במשקל המשקולת, כאשר מחשבים את המתיחות בו).

## (2) תרגיל - גל קוסינוס מעורר במיתר

צפיפות המסה הקווית במיתר היא  $1.2 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ , במיתר מעורר גל מהצורה:  
 $\psi(x, t) = 0.005 \cos(3x - 90t)$   
 חשבו את מהירות הגלים במיתר, את המתיחות ואת המהירות המקסימלית בכיוון רוחבי של נקודה כלשהיא במיתר. הניחו יחידות סטנדרטיות.

## (3) תרגיל - גל סינוס מתקדם במיתר

נתון גל סינוס המתקדם במיתר.

- א. כתבו פונקציה שתתאר גל סינוס הנע על מיתר בכיוון החיובי של ציר ה- $x$ , בעל זמן מחזור של 5 שניות, מהירות של 20 מטר לשנייה ואמפליטודה של 6 מילימטר.
- ב. רשמו ביטוי לתאוצה של כל אלמנט מסה במיתר.
- ג. איפה נמצאים אלמנטי המסה במיתר בעלי התאוצה הגדולה ביותר (בערך מוחלט) בזמן  $t = 3\text{sec}$ ?
- ד. עבור אילו זמנים התאוצה של אלמנט המסה בנקודה  $x = 2\text{cm}$  היא הנמוכה ביותר (בערך מוחלט)?
- ה. מקטינים את התדירות  $f$  של הגל, תארו כיצד ישתנו מהירות אלמנט מסה במיתר, מהירות הגל ואורך הגל?

**4 תרגיל – פונקציה ריבועית**

נתונה פונקציה  $y(x, t) = 32x^2 + 128t^2$ . הניחו יחידות סטנדרטיות.

א. הראו שפונקציה זו היא פתרון של משוואת הגלים במיתר.  
הדרכה: נסו לרשום את הפונקציה כצירוף של פונקציות, אשר כל אחת מהן מתארת גל במיתר.

ב. מהי מהירות הגלים במיתר זה.

ג. נתון שצפיפות המסה ליחידת אורל של המיתר היא  $0.03 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$  חשבו את מתיחותו.

ד. האם הפונקציה  $\sqrt{32x^2 + 128t^2}$  היא גם פתרון של משוואת הגלים?

**5 תרגיל – מיתר בתווך צמיג \***

מיתר בעל מתיחות  $T$  וצפיפות  $\rho$  נמצא בתוך תווך צמיג, כך שכוח החיכוך

שפועל על אלמנט אורך  $dx$ , הוא  $F = -b dx \frac{\partial \Psi}{\partial t}$  כאשר  $b$  פרמטר נתון.

א. מצאו משוואה המתארת תנודות קטנות של המיתר (משוואת הגלים).

ב. מצאו את אופני התנודה של המערכת, כלומר פתרונות בהם בכל נקודה  $x$  תהיה אותה תלות זמנית. הניחו ריסון חלש.

הדרכה: הציבו פתרון מופרד משתנים  $\Psi(x, t) = X(x)f(t)$  זהו כי המשוואה עבור  $f(t)$  היא משוואה של מתנד הרמוני מרוסן, מהו  $\Gamma$  במקרה הזה?

ג. נתון שבזמן  $t = 0$  צורת המיתר היא  $\Psi(x, t = 0) = a \cos(k_0 x)$  ושהמהירות ההתחלתית היא אפס. מצאו את צורת המיתר בזמן  $t > 0$ .

## תשובות סופיות

$$9.8 \frac{m}{s} \quad (1)$$

$$30 \frac{m}{s}; 0.102N; 0.45 \frac{m}{s} \quad (2)$$

$$a(x, t) = 0.00096\pi^2 \sin\left(\frac{\pi}{50}x - \frac{2\pi}{5}t\right) \quad \text{ב.} \quad y(x, t) = 0.006_m \sin\left(\frac{\pi}{50}x - \frac{2\pi}{5}t\right) \quad \text{א.} \quad (3)$$

ג. כאשר  $x = 85_m + 50n$ , מינוס אינסוף לאינסוף.

$$t = 0.001_s - 2.5_n \quad \text{ד.}$$

ה. מהירות אלמנט מסה במיתר קטנה, מהירות הגל לא משתנה ואורך הגל גדל.

$$y(x, t) = (4x + 8t)^2 + (4x - 8t)^2 \quad \text{א.} \quad (4)$$

ג.  $0.12N$  ד. לא.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{b}{T} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{b}{\rho} \quad \text{כאשר} \quad \psi(x, t) = [A \cos(kx) + B \sin(kx)] e^{-\frac{\Gamma}{2}t} [\cos(\omega t) 2C \sin(\omega t)] \quad \text{ב.}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_0^2 T}{\rho} - \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \quad \text{כאשר} \quad \psi(x, t) = a \cos(k_0 x) e^{-\frac{\Gamma}{2}t} \left[ \cos(\omega t) \frac{\Gamma}{2\omega} \sin(\omega t) \right] \quad \text{ג.}$$

## פתרון באמצעות נוסחת ד'אלמבר

רקע

$$\psi(x, t) = \frac{1}{2} [\psi(x - vt, 0) + \psi(x + vt, 0)] + \frac{1}{2v} \int_{x-vt}^{x+vt} \dot{\psi}(x', 0) dx'$$

## שאלות

## 1) תרגיל – גל נע שמאלה וגל במנוחה

למיתר בעל צפיפות מסה  $\rho_0 = 0.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$  יש מתיחות  $T = 0.8 \text{ N}$ . ברגע  $t = 0$  צורת המיתר היא  $\Psi(x, 0) = 0.4 \sin(20x)$ . במיתר נע גל בכיוון החיובי של ציר ה- $x$ .  
 א. רשמו ביטוי עבור פונקציית הגל בכל רגע,  $\Psi(x, t)$ .  
 ב. מהם האמפליטודה, אורך הגל, מספר הגל, התדירות וזמן המחזור של הגל?  
 ג. כיצד ישתנו התשובות לסעיפים א-ב, אם במקום שיהיה נתון שהגל מתקדם בכיוון החיובי, נתון שבזמן  $t = 0$  המיתר נמצא במנוחה בכל מקום?

## 2) תרגיל – מציאת פונקציית גל מתנאי התחלה

במיתר אינסופי מסוים, מהירות הגלים היא  $15 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , ברגע  $t = 0$  נתון ש-  
 $\Psi(x, 0) = |x| e^{-\frac{|x|}{b}}$  וכן  $\left. \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right|_{t=0} = a \frac{x}{b} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^2}$ , כאשר  $a, b$  קבועים נתונים.  
 מצאו את  $\Psi(x, t)$ .

## 3) תרגיל – בניית פונקציית גל

נתון מיתר ובו מהירות הגלים היא  $v = 120 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ . הגל במיתר הוא  
 $\Psi(x, t) = f(x - vt) + g(x + vt)$ . נתון גם כי  $g(y) = 2f(y) + 0.001 \sin(5y)$ ,  
 וגם שברגע  $t = 0$ ,  $\Psi(x, 0) = 0.002 \sin(5x) - 0.003x$ .  
 הניחו יחידות סטנדרטיות ומצאו את:  
 א. פונקציית הגל בכל מיקום וזמן.  
 ב. מהירות חתיכה של המיתר הנמצאת במיקום  $x = 0.8 \text{ m}$ ,  
 וברגע  $t = 0.2 \text{ sec}$ ?

**נספח: פתרון עם תנאי שפה התלויים בזמן**

אם נתונה הפונקציה של הקצה כתלות בזמן (נסמנה ב  $f(t)$ ) אז הגל שנוצר ממנה יהיה:

$$\Psi(x, t) = f\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

במקרה של כוח התלוי בזמן שפועל על קצה  $F_D(t)$  (ואין גל שנע בכיוון השלילי)

$$f(t) = \frac{v}{T} \int F_0(t) dt$$

**(4) תרגיל – מנוע מייצר גל**

צפיפות המסה של מיתר חצי אינסופי היא  $\rho = 0.012 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$  והמתיחות שלו היא  $520\text{N}$ . בקצה  $x = 0$  ישנו מקור גלים (מנוע) המאלץ את הנקודה הזו לנוע באופן  $b(1 - e^{-\alpha t^2})$  כאשר  $b = 5\text{cm}$  ו-  $\alpha$  קבוע מסוים. ברגע  $t = 0$  המיתר נמצא בשיווי משקל בכל מקום והמקור מתחיל לפעול. המקור יוצר גל, הנע בכיוון החיובי של ציר ה-  $x$ . נתון שברגע  $t = 0.2\text{sec}$  סטיית המיתר משיווי משקל בנקודה  $x = 15\text{m}$  היא  $4\text{cm}$ .

א. קבלו ביטוי לפונקציית הגל בכל רגע ומקום,  $\Psi(x, t)$ .

ב. חשבו את ערכו המספרי של הקבוע  $\alpha$ .

ג. מצאו ביטוי עבור הכוח המפעיל את המנוע.

ד. חשבו את  $\Psi(x, t = 0.1\text{ sec})$  ושרטטו את הפונקציה.

**(5) תרגיל - עוד מנוע**

מיתר חצי אינסופי בעל צפיפות מסה  $\rho = 0.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$  מוחזק במתיחות של  $270\text{N}$ . קצה המיתר נמצא ב  $x=0$ , בו יש מנוע המפעיל את הכוח הבא:

$$F_D(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 2t^2(t-1)(t-4) & 0 \leq t \leq 4\text{s} \\ 0 & t \geq 4\text{s} \end{cases}$$

א. רשמו ביטוי עבור פונקציית הגל בכל מקום ובכל רגע. הניחו שהמיתר

נמצא במנוחה ובשיווי משקל ב  $t = 0$

ב. שרטטו את פונקציית הגל ברגעים  $t = 6, 3\text{ sec}$ .

## תשובות סופיות

$$\psi(x, t) = 0.4 \sin(20(x - 2t)) \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$A = 0.4m, \lambda = \frac{\pi}{10}m, K = 20 \frac{1}{m}, f = \frac{20}{\pi} \text{Hz}, T = \frac{\pi}{20} \text{sec} \quad \text{ב.}$$

$$\psi = (x, t) = 0.4 \sin(20x) \cos(40t) \quad \text{ג. אין שינוי בפרמטרים של סעיף ב.}$$

$$\psi(x, t) = \frac{1}{2} \left[ |x - 15t| e^{-\frac{|x-15t|}{b}} + |x + 15t| e^{-\frac{|x+15t|}{b}} \right] - \frac{ab}{60} \left[ e^{-\left(\frac{x+15t}{b}\right)^2} - e^{-\left(\frac{x-15t}{b}\right)^2} \right] \quad (2)$$

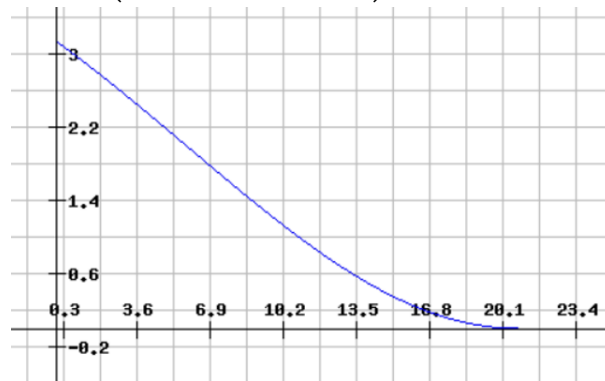
$$\psi(x, t) = 0.001 \sin(5(x - 120t)) + 0.001(x - 120t) + 0.642 \frac{m}{s} \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$+ 0.001 \sin(5(x - 120t)) + 0.002(x - 120t) \quad \text{ב.}$$

$$\psi(x, t) = \begin{cases} 0t & < \frac{x}{v} \\ b \left( 1 - e^{-\alpha \left( t - \frac{x}{v} \right)^2} \right) t & \geq \frac{x}{v} \end{cases} \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$98.4 \frac{1}{\text{sec}^2} \quad \text{ב.}$$

$$\psi(x, 0.1) = 5\text{cm} \left( 1 - e^{-98.4 \left( 0.1 - \frac{x}{208} \right)^2} \right) \quad \text{ג.} \quad F(t) = \frac{2\alpha T b}{v} t e^{-\alpha t^2}$$

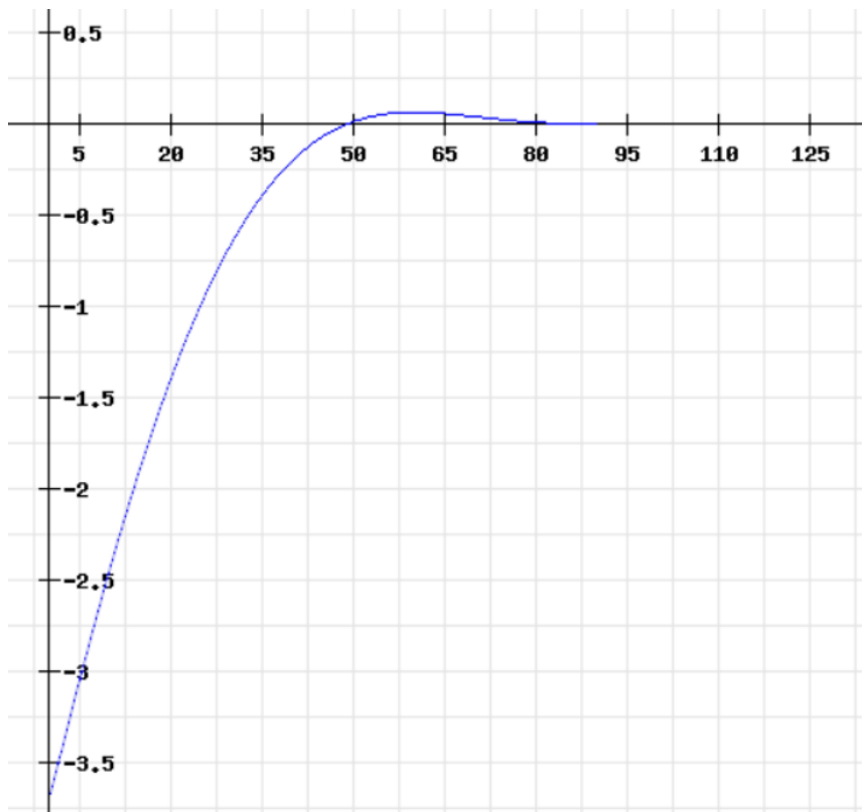


שרטוט:

$$\psi(x, t) = \frac{1}{9} \begin{cases} 0t & -\frac{x}{30} \leq 0 \\ \frac{2}{5} \left( t - \frac{x}{30} \right)^5 - \frac{5}{2} \left( t - \frac{x}{30} \right)^4 + \frac{8}{3} \left( t - \frac{x}{30} \right)^3 & 0 \leq t - \frac{x}{30} < 4 \\ 1220t & -\frac{x}{30} \geq 4 \end{cases} \quad \text{א.} \quad (5)$$

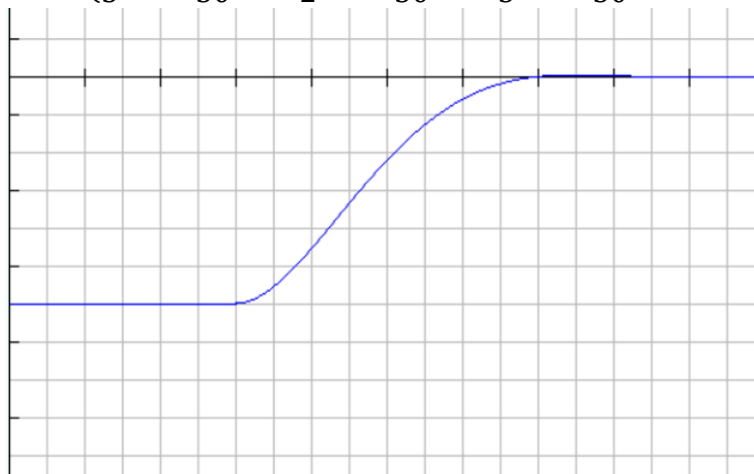
$$\psi(x, 3) = \frac{1}{9} \begin{cases} 09 & 0 \leq x \\ \frac{2}{5} \left( 3 - \frac{x}{30} \right)^5 - \frac{5}{2} \left( 3 - \frac{x}{30} \right)^4 + \frac{8}{3} \left( 3 - \frac{x}{30} \right)^3 & 0 \leq x \leq 90 \end{cases} \quad \text{ב.}$$





שרטוט:

$$\psi(x, 6) = \frac{1}{9} \begin{cases} 0 & 80 \leq x \\ \frac{2}{5} \left(6 - \frac{x}{30}\right)^5 - \frac{5}{2} \left(6 - \frac{x}{30}\right)^4 + \frac{8}{3} \left(6 - \frac{x}{30}\right)^3 & 0 \leq x \leq 180 \end{cases}$$



שרטוט:

## החזרה והעברה

### רקע

תנאי שפה לנקודת אי-רציפות במיתר ב- $x = 0$ .

$$1. \psi_L(0, t) = \psi_R(0, t)$$

$$2. F_L = F_R \quad \text{רציפות הכוח}$$

אם המתיחות אחידה, אז תנאי 2 הופך לרציפות הנגזרת

$$\left. \frac{\partial \psi_L}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \psi_R}{\partial x} \right|_{x=0}$$

$$\psi_r(x, t) = r\psi(-x, t)$$

$$\psi_t(x, t) = t\psi\left(\frac{v_1}{v_2}x, t\right)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{T}{\rho_1}} \quad v_2 = \sqrt{\frac{T}{\rho_2}}$$

### מקדם החזרה

$$r = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} = \frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_2}}{\sqrt{\rho_2} - \sqrt{\rho_1}}$$

### מקדם העברה

$$t = \frac{2v_2}{v_2 + v_1} = \frac{2\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_2}}$$

הערה: את הנוסחאות של מקדם ההעברה וההחזרה נרשום בנושא הבא בצורה יותר כללית עם שימוש בעכבות.

## שאלות

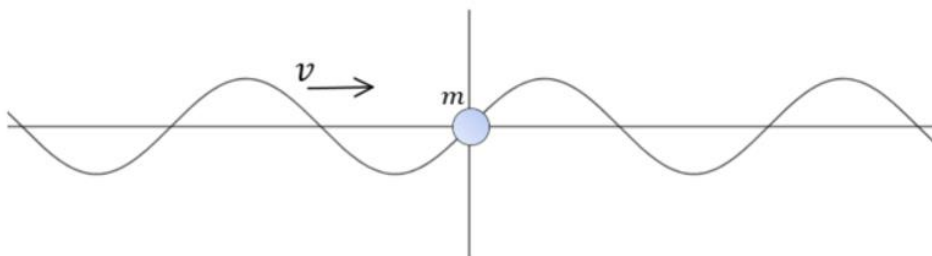
## 1) תרגיל – ביטול של הגל העובר או החוזר

- מיתר מורכב משני חלקים בעלי צפיפויות שונות  $\rho_1$  ו- $\rho_2$  ומתיחות אחידה  $T$ .  
 גל מהצורה  $\Psi_A(x, t) = |A| \cos(k_1 x - \omega t)$  מתקדם בכיוון החיובי ממיתר 1  
 לכיוון מיתר 2. נתונים:  $\rho_2, \rho_1, k_1, T, A, \omega$ .  
 א. מצאו את הביטוי עבור הגל המועבר והגל המוחזר באמצעות נתוני השאלה.  
 ב. נניח עתה, כי בנוסף ל- $\Psi_A$  שולחים גל נוסף ממיתר 2 לכיוון מיתר 1:  
 $\Psi_D(x, t) = |D| \cos(-k'_2 x - \omega' t + \varphi)$ . נתון כי  $\rho_2 < \rho_1$ .  
 מצאו את  $\varphi, \omega', k'_2, D$ , כך שלאחר המעבר של הגלים בין המיתרים, במיתר 2 יהיה רק גל הנוסע שמאלה. מהם התנאים לכך שבמיתר 1 יהיה רק גל הנוסע ימינה?  
 ג. האם ניתן למצוא תנאי, עבורו בו-זמנית במיתר 1 יהיה רק גל הנוסע ימינה ובמיתר 2 רק גל הנוסע שמאלה? נמקו.

## 2) תרגיל - החזרה והעברה ממסה על מיתר

- חרוז קטן בעל מסה  $m$  נמצא על מיתר מתוח בעל מתיחות אחידה.  
 גל המתקדם משמאל במיתר מזיז את החרוז בתנועה אנכית בלבד.  
 צפיפות המסה ליחידת אורך של המיתר היא  $\rho$  ומהירות הגלים במיתר היא  $v$ .  
 א. הגדירו את ראשית הצירים במיקום החרוז ורשמו פונקציית גל כללית עבור המיתר משמאל ומימין לחרוז. השתמשו במספרים מורכבים.  
 מהם תנאי השפה של פונקציית הגל בנקודה בה נמצא החרוז?  
 נסמן ב-A את אמפליטודת הגל הפוגע, ב-B את אמפליטודת הגל המוחזר וב-C את אמפליטודת הגל העובר.

ב. הראו כי:  $\frac{B}{A} = \frac{iQ}{1-iQ}$  ו-  $\frac{C}{A} = \frac{1}{1-iQ}$ , כאשר:  $Q = \frac{m\omega}{2\rho v}$ .



## תשובות סופיות

$$(1) \text{ א. } \psi_r(x, t) = \frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_2}}{\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}} |A| \cos(k_1 x + \omega t)$$

$$\psi_t(x, t) = \frac{2\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}} |A| \cos(k_2 x + \omega t), \quad k_2 = k_1 \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}$$

$$\text{ב. שמאלה: } k_2 = k_1', w = w', \phi = 0$$

$$|D| = \frac{2\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}} |A|$$

$$\text{ימינה: } k_2 = k_1', w = w', \phi = \pi$$

$$|D| = \frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_2}}{2\sqrt{\rho_2}} |A|$$

ג. לא, כי הפאזה בכל אחד צריכה להיות שונה.

$$(2) \text{ א. } T \left( \frac{\partial \psi_R}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{\partial \psi_L}{\partial x} \Big|_{x=0} \right) = m \ddot{\psi}_L(x=0, t), \quad \psi_L(x=0, t) = \psi_R(x=0, t)$$

ב. הוכחה בסרטון.

## עכבה

### רקע

העכבה, נקראת גם אימפדנס (impedance), מסומנת באות  $Z$ , ונוסחתה

$$Z = \sqrt{\rho T} = \frac{T}{V}$$

$T$  – מתיחות

$V$  – מהירות הגל

$$|Z| = \frac{|F_y|}{|V_y(t)|}$$

$F_y$  – הכוח על אלמנט מסה

$V_y(t)$  – מהירות אלמנט מסה (מהירות החומר)

מקדמי העברה והחזרה בפגיעה של גל מתווך 1 ל-2:

$$r = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \text{ מקדם החזרה}$$

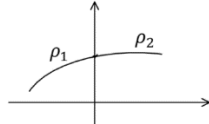
$$t = \frac{2z_1}{z_1 + z_2} \text{ מקדם העברה}$$

תאום עכבות:  $t = 1 \Leftrightarrow z_1 = z_2$  ו-  $r = 0$

## שאלות

## 1) תרגיל – מיתר עם שתי צפיפויות ושני גלים

שני מיתרים מאוד ארוכים בעלי צפיפויות מסה שונות  $\rho_1$  ו-  $\rho_2$  מחוברים בנקודה  $x=0$  ויוצרים מיתר אחד ארוך.



המתיחות במיתר היא אחידה

(כלומר לשני החלקים אותה מתיחות  $T$ )

שני גלים מגיעים לעבר נקודת האי רציפות : גל עם אמפליטודה  $A$  מגיע מצד ימין וגל עם אמפליטודה  $3A$  מגיע מצד שמאל. שני הגלים בעלי אותה תדירות זוויתית ואין ביניהם הפרש פאזה קבוע.

- א. רשמו ביטוי לפונקציית הגל בכל חלק של המיתר באמצעות מספרים מורכבים. הסבירו עבור כל איבר בפונקציה איזה גל הוא מתאר.
- ב. רשמו את תנאי השפה שהפונקציות צריכות לקיים בנקודת אי הרציפות.
- ג. השתמשו בתנאי השפה ובטאו את אמפליטודות כל הגלים במיתר, במונחים של האמפליטודה  $A$  ועכבות המיתר.
- ד. חשבו שוב את האמפליטודות, הפעם באמצעות מקדמי העברה והחזרה.

## תשובות סופיות

(1) א.  $\psi_1(x, t) = 3Ae^{i(k_1x - \omega t)} + Be^{-i(k_1x - \omega t)}$   
 $\psi_2(x, t) = Ce^{i(k_2x - \omega t)} + Ae^{-i(k_2x - \omega t)}$   
 3A – ימינה ; B – שמאלה ; C – ימינה ; A – שמאלה.  
 ב.  $\psi_1(0, t) = \psi_2(0, t) \quad \left. \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \right|_{x=0}$   
 ג.  $B = \frac{3z_1 - z_2}{z_1 + z_2} AC = \frac{5z_1 + z_2}{z_1 + z_2} A$   
 ד. הוכחה בסרטון.

## אנרגיה הספק ותנע

### רקע

אנרגיה ליחידת אורך של גל נע במיתר

$$\varepsilon(x, t) = \rho \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)^2 = \rho v^2 \left( \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)^2$$

אנרגיה ממוצעת בזמן

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 |A|^2$$

הספק רגעי בנקודה - כמה עבודה עושה החלק השמאלי על החלק הימני כל יחידת זמן

$$P^\pm = \pm Z \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)^2 = \pm v \varepsilon(x, t)$$

$P^\pm$  הוא הספק רגעי של גל הנע בכיוון החיובי/שלילי

ההספק הממוצע בזמן

$$\bar{P}^\pm = \pm \frac{1}{2} Z \omega^2 |A|^2$$

מקדם ההחזרה של האנרגיה

$$R = \frac{P_1^-}{P_1^+} = r^2 = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2$$

מקדם ההעברה של האנרגיה

$$T = \frac{P_2^+}{P_1^+} = \frac{z_2}{z_1} t^2 = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}$$

$$R + T = 1$$

התנע הוא אפס



## שאלות

**(1) תרגיל - חישובים בפגיעה בתווך**

- גל סינוס נע ימינה במיתר מסוים בו מהירות הגל היא  $v_1$ .  
 צורת הגל היא  $\Psi_i(x, t) = 1.4\text{mm} \cdot \sin(kx - 200t)$ .  
 הגל מגיע לצומת בו צפיפות המיתר משתנה (המתיחות נשארת קבועה), כך  
 שבחלק הימני מהירות הגל היא  $v_2 = 5v_1$ .  
 בהינתן שההספק הממוצע של הגל הפוגע הוא  $60\text{ W}$ ,  
 א. מהם האימפדנסים של שני חלקי המיתר?  
 ב. מהו ההספק הממוצע של הגל העובר והגל החוזר?  
 ג. מהי האמפליטודה של הגל העובר ושל הגל החוזר?

**(2) שינוי בהספק כתוצאה משינוי פרמטרים**

- נתון מיתר מתוח בעל צפיפות מסה  $\rho = 2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$  ומתיחות  $T = 50\text{ N}$ .  
 א. מהו ההספק הממוצע שצריך לספק למיתר, על מנת לייצר גל סינוס בעל  
 תדירות  $f = 40\text{ Hz}$  ואמפליטודה של  $A = 4\text{ mm}$ ?  
 ב. פי כמה ישתנה ההספק של הגל אם:  
 1. נכפיל את אורך החבל?  
 2. נכפיל את האמפליטודה ונקטין את התדירות פי 2?  
 3. נקפל את החבל לשניים ונשתמש בחבל הכפול כחבל החדש?

**(3) תרגיל - חישוב הספק של אורך גל**

- במיתר אינסופי נע גל הרמוני בכיוון החיובי של ציר  $x$ .  
 למיתר עכבה (אימפדנס):  $z = 15 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$  ומהירות הגל בו היא:  $v = 600 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .  
 אמפליטודת הגל היא:  $A = 3\text{ cm}$ .  
 נתון שבכל נקודה במיתר, ההספק הממוצע על פי זמן מחזור הוא:  $16\text{ W}$ .  
 א. מהי מתיחות המיתר וצפיפות המסה שלו?  
 ב. מהי התדירות הזוויתית של הגל ואורך הגל שלו?  
 ג. מהי כמות האנרגיה בקטע באורך של אורך הגל? הראו שמיקום הקטע  
 אינו משנה את ערך התוצאה.

**(4) תרגיל - אנרגיה של פרבולה עצובה**

נתון מיתר אינסופי בעל מתיחות:  $T = 636N$  וצפיפות ליחידת

אורך:  $\rho = 0.03 \frac{kg}{m}$ .

במיתר נע גל בכיוון החיובי. נתון שברגע  $t = 0.01s$ , צורת הגל היא:

$$\psi(x, t = 0.01) = \begin{cases} Bx(A - x) & 0 \leq x \leq a \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

נתון כי:  $B = 0.02m^{-1}$ ,  $A = 4m$ .

א. חשבו את מהירות הגל.

ב. רשמו את פונקציית הגל בכל רגע ובכל מקום, כלומר את  $\psi(x, t)$ .

ג. שרטטו סכמתית או בעזרת תוכנה גרפית כלשהי את צורת המיתר

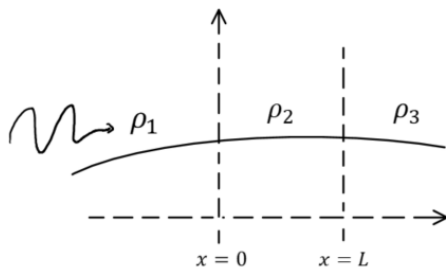
ברגעים הבאים:  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = 0.01s$ ,  $t_2 = 0.04s$ .

ד. מהו הביטוי של צפיפות האנרגיה כפונקציה של  $x$  ברגע:  $t = 0.05s$ ?

ה. מהי האנרגיה הכוללת של המיתר?

**(5) מיתר עם 3 חלקים**

מיתר מורכב משלושה חלקים בעלי צפיפות מסה שונה, כפי שמופיע באיור להלן. גל מגיע מכיוון שמאל  $T$  (המתיחות של המיתר) וזהו בשלושת החלקים.



א. רשמו ביטוי עבור חמשת הגלים הרלוונטיים בשאלה. עבדו בצורה מורכבת.

ב. מהם תנאי השפה בבעיה?

ג. רשמו את היחס בין אמפליטודת הגל העובר לאמפליטודת הגל הפוגע.

ד. רשמו ביטוי ליחס בין ההספק של הגל העובר להספק של הגל הפוגע.

ה. מה משמעות הדרישה  $1 - \frac{P_3}{P_1}$ ? הראו שעל מנת לקיים דרישה זו צריך

להתקיים  $z_2 = \sqrt{z_1 z_3}$  ו-  $L = \frac{\lambda}{4}$ , כאשר  $\lambda$  הוא אורך הגל באזור האמצעי.

**(6) תרגיל - חישוב אמפליטודה בתיאום עכבות**

מיתר בעל צפיפות מסה  $\rho_1$  מחובר למיתר בעל צפיפות מסה  $\rho_2$  באמצעות מיתר נוסף שצפיפות המסה שלו משתנה באופן רציף מ-  $\rho_1$  ל-  $\rho_2$ . במקרה כזה לא תתקיים החזרה אם אורך הגל קטן ביחס לקצב השינוי בצפיפות המסה. חשבו תחת הנחה זו מה היחס בין האמפליטודה של הגל העובר לגל הפוגע? הניחו מתיחות אחידה.

## תשובות סופיות

$$(1) \quad \bar{P}_R = 15.6W, \bar{P}_T = 44.4W \quad \text{ב.} \quad z_1 = 1531 \frac{N \cdot s}{m}, \quad z_2 = 506 \frac{N \cdot s}{m} \quad \text{א.}$$

$$\text{ג.} \quad B = 0.71mm, C = 2.1mm$$

$$(2) \quad \text{א.} \quad 0.5W \quad \text{ב.} \quad \text{לא ישתנה.} \quad \text{2.} \quad \text{לא ישתנה.} \quad \text{3.} \quad \text{יגדל פי } \sqrt{2}.$$

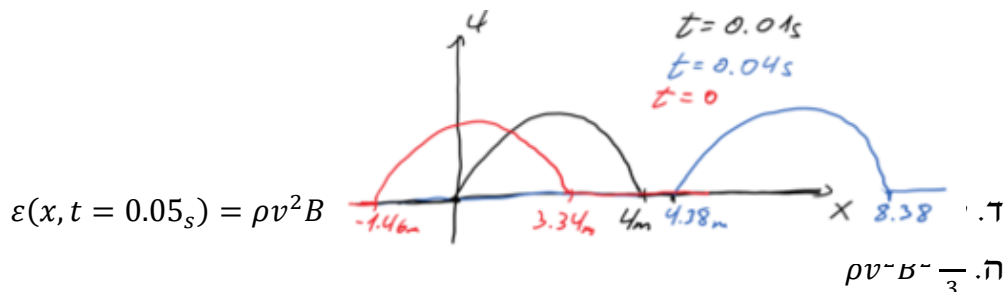
$$(3) \quad \text{א.} \quad T = 9000N, \rho = 0.025 \frac{kg}{m} \quad \text{ב.} \quad \omega = 48.7 \frac{rad}{sec},$$

$$\text{ג.} \quad E = 4.13J$$

$$(4) \quad \text{א.} \quad v = 146 \frac{m}{sec}$$

$$\psi(x, t) = \begin{cases} B(x - v(t - t_0))(A - (x - v)(t - t_0)) & 0 \leq x - v(t - t_0) \leq a \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{ב.}$$

ג. שרטוט:



$$(5) \quad \psi_1(x, t) = Ae^{i(k_1x - \omega t)} + Be^{-i(k_1x + \omega t)} \quad \psi_2(x, t) = Ce^{i(k_2x - \omega t)} + De^{-i(k_2x + \omega t)} \quad \text{א.}$$

$$\psi_3(x, t) = Ee^{i(k_3x - \omega t)}$$

$$\psi_1(0, t) = \psi_2(0, t)T_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = T_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad \text{ב.}$$

$$\psi_2(2, t) = \psi_3(2, t)T_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = T_3 \frac{\partial \psi_3}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad \text{ג.}$$

$$\frac{4z_2z_1e^{i(k_2-k_3)L}}{[(z_1+z_2)(z_2+z_3)-(z_2-z_1)(z_2-z_3)e^{i2k_2L}]}$$

$$\frac{16z_2^2z_1z_3}{|(z_1+z_2)(z_2+z_3)-(z_2-z_1)(z_2-z_3)e^{i2k_2L}|^2} \quad \text{ד.}$$

ה. שכל האנרגיה של הגל הפוגע עוברת לגל העובר.

$$(6) \quad \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{1}{4}}$$

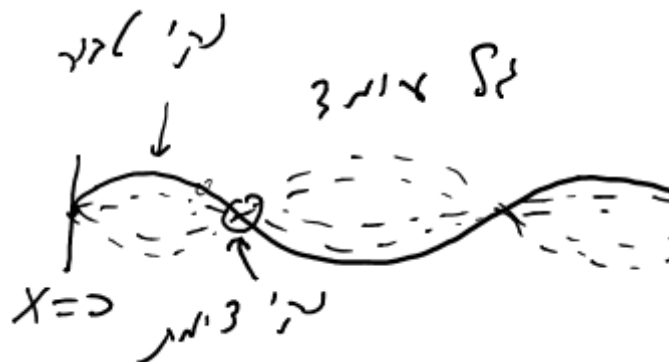
## גלים עומדים

רקע

מיתר חצי אינסופיקצה קשור

$$\Psi(x=0, t) = 0 \Rightarrow$$

$$\Psi(x, t) = C \sin(kx) \sin(\omega t + \varphi)$$

קצה חופשי

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \Rightarrow \Psi(x, t) = C \cos(kx) \cos(\omega t + \varphi)$$

מיתר סופימיתר סופי עם 2 קצוות קשורים

$$\Psi(x=0, t) = \Psi(x=L, t) = 0$$

$$k_n = \frac{\pi n}{L} \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad f_n = \frac{vn}{2L}$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(k_n x) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

מיתר סופי עם קצה קשור וקצה חופשי

$$\Psi(x=0, t) = 0, \quad \left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$$

$$k_n = \frac{\pi}{L} \left( n + \frac{1}{2} \right) \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{\left( n + \frac{1}{2} \right)}$$

$$f_n = \frac{v}{2L} \left( n + \frac{1}{2} \right)$$

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(k_n x) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

מיתר סופי עם 2 קצוות חופשיים

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$$

$$k_n = \frac{\pi n}{L} \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{vn}{2L}$$

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(k_n x) \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

פתרון באמצעות טור פוריה :

$$\Psi(x, t) = \frac{B_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(k_n x) + B_n \cos(k_n x)] [C_n \sin(\omega_n t) + D_n \cos(\omega_n t)]$$

## שאלות

**1) תרגיל – גל פוגע וגל חוזר כביטוי של שני גלים עומדים**

הראו כי הגל  $\Psi(x, t) = A \cos(\omega t - kx) + rA \cos(\omega t + kx)$ , כאשר  $r$  קבוע כלשהו, ניתן לביטוי כסופרפוזיציה של שני גלים עומדים:  $\Psi(x, t) = A(1 + r) \cos(\omega t) \cos(kx) + A(1 - r) \sin(\omega t) \sin(kx)$

**2) תרגיל - מיתר פלדה בפסנתר**

מיתר פסנתר מיוצר מפלדה בעלת צפיפות מסה ליחידת נפח  $\rho = 4800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  רדיוס המיתר הוא  $r$ , היצרן ממליץ להפעיל את המיתר תחת לחץ (כוח ליחידת שטח חתך) של  $1.3 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ .

- א. הראו שמהירות הגלים במיתר אינה תלויה ברדיוס שלו, וחשבו אותה.
- ב. מה צריך להיות אורך המיתר כדי שישמיע את הצליל 'לה', שתדירותו 440Hz? כמנגנים במיתר בד"כ שומעים את התדירות הבסיסית.
- ג. מגדילים את המתיחות פי  $\alpha$  ללא שינוי באורך המיתר, מה צריכה להיות  $\alpha$  כדי להעלות את תדירות המיתר פי 1.2?

**3) תרגיל – קירות בחצי ומינוס חצי L**

- מיתר באורך  $L$  קשור בשני צדדיו לקיר כאשר קצוות המיתר הקשורים לקיר נמצאים ב  $x=L/2$  וב  $x=-L/2$ . נתון כי בזמן  $t = 0$  המיתר כולו בשיווי משקל.
- א. הציבו את תנאי השפה בפתרון של משוואת הגלים ומצאו את הקבועים המתאימים.
  - שימו לב כי אתם אמורים לקבל פתרון שונה ל  $n$  זוגי ול  $n$  אי-זוגי.
  - ב. שרטטו את ארבעת הפתרונות הראשונים, והשוו את התוצאה למה שמתקבל כאשר פותרים את הבעיה עבור קיר שמאלי ב-  $x = 0$  וקיר ימני ב-  $x = L$ .
  - ג. רשמו פתרון כללי לבעיה על ידי שימוש בעקרון הסופרפוזיציה.

**4 תרגיל - מודל של פסנתר**

הצליל בפסנתר נוצר על ידי מכה של פטיש במיתר הקשור בשתי קצותיו. ברגע ההקשה ( $t = 0$ ) המיתר אופקי ומהירותו במיקום הפגיעה היא  $v_0$ . אורך המיתר הוא  $L$ . מרכז הפגיעה של הפטיש היא בנקודה  $x = \frac{L}{2}$  כאשר אורך המגע של הפטיש עם המיתר הוא  $a$ .

א. מהם תנאי השפה בבעיה? הגדירו את ראשית הצירים בקצה אחד של המיתר.

ב. מהי צורת המיתר ברגע הפגיעה ( $\Psi(x, 0)$ )?

ג. רשמו את מהירות כל אלמנט של המיתר ברגע פגיעה.

ד. מצאו את  $\Psi(x, t)$ . ניתן להניח כי המתוחות וצפיפות המסה במיתר נתונות.

**5 תרגיל - מיתר מכופף לפרבולה ומשוחרר ממנוחה**

מיתר בעל אורך  $l$  קשור בשני קצותיו. ברגע  $t = 0$  המיתר נמצא במנוחה, ומכופף כך שצורתו היא  $\Psi(x, 0) = x(l - x)$ .  $x = 0$  הוא הקצה השמאלי של המיתר. מצאו את פונקציית הגל של המיתר כתלות בזמן. הניחו שהמתוחות והצפיפות ידועים.

**6 תרגיל - חישוב אנרגיה של מיתר**

נתון מיתר באורך  $l = 2 \text{ m}$ , שהעכבה שלו היא  $30 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$ , והמתוחות שלו היא .

$$\Psi(x, t) = 2000 N \sum_{n=1}^{\infty} 10^{-3} \frac{2^{-n}}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right) \cos(\omega_n t)$$

א. האם המיתר מקובע בשני קצותיו, פתוח בשני קצותיו או פתוח בקצה

אחד ומקובע בקצה השני? נמקו. הניחו כי הקצה של המיתר ב  $x = 0$

ב. האם מהנתון ניתן לדעת, בלי לחשב, את המהירות החומרית ברגע  $t = 0$ ?

ג. חשבו את האנרגיה הכוללת של המיתר.

**7 תרגיל – מושכים מרכז של מיתר ומשחררים**

נתון מיתר באורך  $l$  ובמתוחות  $T$ , ששני קצותיו קשורים. מזזים את אמצע המיתר מרחק  $a$  משיווי המשקל ומשחררים ממנוחה.

א. הראו כי בזמן  $t = 0$  למיתר אנרגיה  $\frac{2Ta^2}{l}$  בהנחה שהמתוחות לא משתנה.

ב. מצאו את פונקציית הגל של המיתר כתלות במיקום ובזמן.

ג. הראו ששלושת ההרמוניות בעלות התדירות הנמוכה ביותר מכילות

93.3% מהאנרגיה כשהמיתר משוחרר.

ד. מהי האנרגיה של המיתר ב  $t = 3 \text{ sec}$ ?

**8) תרגיל - מיתר מחובר בקצה לקפיץ**

מיתר באורך  $L$  קשור בנקודה  $x = 0$  ובקצה  $x = L$  מחובר לקפיץ אנכי בעל קבוע קפיץ  $\lambda$ . הקפיץ יכול לנוע בכיוון אנכי בלבד והוא רפוי כאשר המיתר אופקי. מתיחות המיתר היא  $T$ .

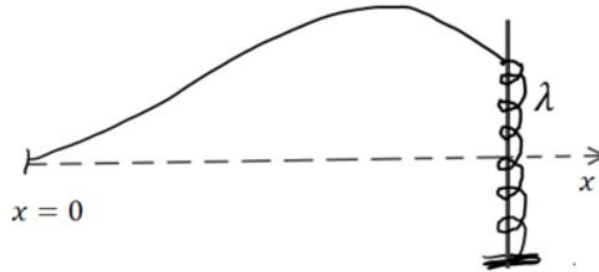
א. רשמו תנאי שפה למיתר והראו כי המשוואה ממנה ניתן למצא את

$$\tan(x) = -\alpha x \quad \text{כאשר} \quad \alpha = \frac{T}{\lambda L}, \quad x = kL$$

ב. מה התוצאה במקרה  $\alpha \gg 1$  ובמקרה  $\alpha \ll 1$ ? מה המשמעות הפיזיקאלית של כל מקרה?

ג. שרטטו פתרון גרפי עבור  $\alpha = 1$  וסמנו את שלושת נקודות הפתרון הראשונות מהן מקבלים את שלושת אופני התנודה הראשונים.

ד. שרטטו את שני אופני התנודה הראשונים שקיבלתם בסעיף ג.





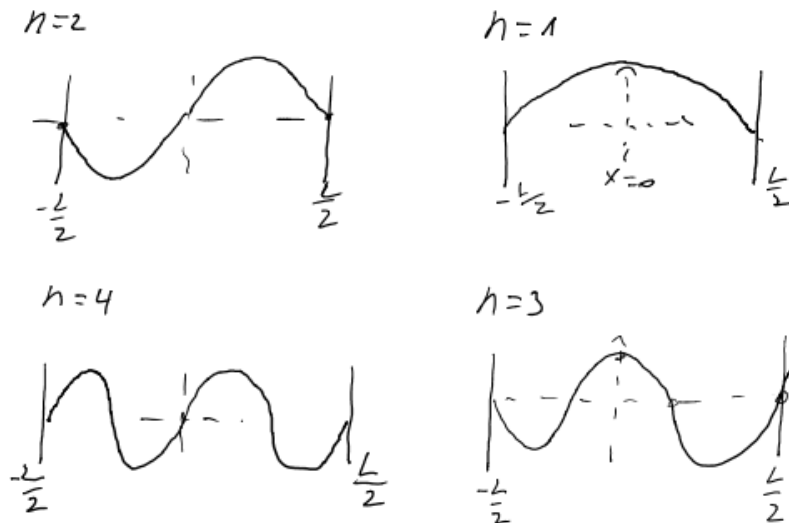
## תשובות סופיות

(1) הוכחה בסרטון.

(2) א.  $520 \frac{m}{s}$  ב.  $59cm$  ג.  $1.44$ 

$$\psi(x, t) = \begin{cases} A_n \sin k_n x \sin \omega_n t & = \text{even} \\ B_n \cos k_n x \sin \omega_n t & = \text{odd} \end{cases}, k_n = \frac{\pi n}{L}, \omega_n = v \cdot k_n \quad \text{א. (3)}$$

ב.



$$\psi(x, t) = \sum_{n=2, \text{even}}^{\infty} A_n \sin(k_n x) \cos(\omega_n t) + \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} B_n \sin(k_n x) \cos(\omega_n t) \quad \text{ג.}$$

כאשר  $k_n = \frac{\pi n}{L}, \omega_n = v k_n$

$$\psi(x, 0) = 0 \quad \text{ב.} \quad \psi(0, t) = \psi(L, t) = 0 \quad \text{א. (4)}$$

$$\psi(x, 0) = \begin{cases} v_0 & \frac{L-a}{2} L x L \frac{L+a}{2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{ג.}$$

$$\psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4v_0 L}{\pi^2 n^2} \sqrt{\frac{e}{T}} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi n a}{2L}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{L} x\right) \sin\left(\sqrt{\frac{T}{\rho}} \frac{\pi n}{L} t\right) \quad \text{ד.}$$

$$, k_n = \frac{\pi n}{\ell} \omega_n = v k_n \quad \text{כאשר } \psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(k_n x) \cos(\omega_n t) \quad \text{ה. (5)}$$

$$D_n = \begin{cases} \frac{8\ell^2}{(\pi n)^3} n & \text{odd} \\ 0 & \text{even} \end{cases} \quad \text{וכן}$$

$$8.25 \cdot 10^{-4} J \quad \text{ג.} \quad \text{א. הקצוות קשורים. ב. כן. (6)}$$

$$\frac{2Ta^2}{l} \quad \text{ד.} \quad \text{א. הוכחה בסרטון. ג. הוכחה בסרטון. (7)}$$

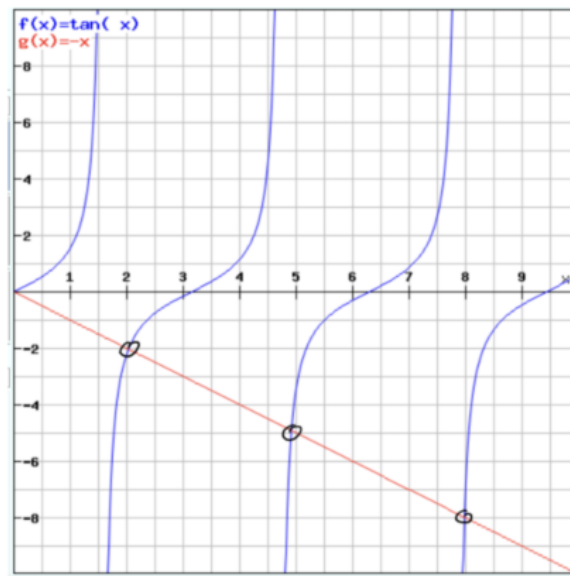
$$\psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(k_n x) \cos(\omega_n t), \omega_n = \sqrt{\frac{T}{\rho}} k_n, A_n = \text{ב.}$$

$$\frac{8a}{\pi^2 n^2} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right), k_2 = \frac{\pi n}{\ell}$$

א. הוכחה בסרטון. (8)

$$\text{ב. במקרה } 1 \gg \alpha, K_n = \frac{\pi}{L} \left(n + \frac{1}{2}\right), \text{ קיבלנו } K_n \text{ של קצה חופשי.}$$

$$\text{במקרה } 1 \ll \alpha, K_n = \frac{\pi n}{L}, \text{ קיבלנו } K_n \text{ של קצה קשור.}$$



ג.

ד.

# גלים אור ואופטיקה

פרק 5 - קווי תמסורת

תוכן העניינים

1. קווי תמסורת ללא הפסדים ..... 37

## קווי תמסורת ללא הפסדים

### רקע

הקשרים בין המתח לזרם (בקו ללא הפסדים):

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial I}{\partial t} \qquad \frac{\partial I}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial V}{\partial t}$$

משוואות הגלים:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \qquad \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 I}{\partial t^2}$$

כאשר  $C_0$  ו- $L_0$  הם הקיבול וההשראות ליחידת אורך.

### עכבה

עכבה כללית מוגדרת לפי:  $Z = \frac{V}{I}$  והיא יכולה להיות תלויה במיקום עכבה אופיינית:

$$\frac{V^+(x, t)}{I^+(x, t)} = -\frac{V^-(x, t)}{I^-(x, t)} = Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

לא תלויה במיקום (בדור"כ כשנתונה העכבה הכוונה לעכבה אופיינית).

### החזרה והעברה

$$V^-(x_0, t) = -rV^+(x_0, t) \qquad I^-(x_0, t) = rI^+(x_0, t)$$

$$r = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_L + Z_0}$$

$$V_L^+(x_0, t) = tV^+(x_0, t) \qquad I_L^+(x_0, t) = tI^+(x_0, t)$$

$$t = \frac{2Z_0}{Z_L + Z_0}$$

הערה: הנוסחאות הן בהנחה שאין גל חוזר בעומס.

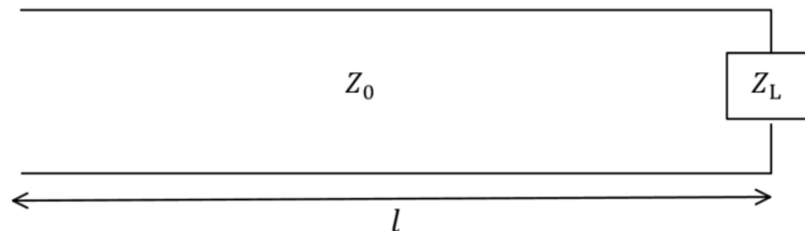
כאשר יש קצר בקצה בקו,  $Z_L = 0$ , מקבלים גל עומד.

## שאלות

## (1) עכבת כניסה

קו תמסורת באורך  $l$  ועכבה אופיינית  $Z_0$  מחובר בקצה לעומס בעל עכבה אופיינית  $Z_L$ . הניחו כי אין גל חוזר בעומס וכי אמפליטודת הגל המתקדם בכיוון החיובי ידועה.

- רשמו את פונקציות המתח והזרם של הגל הפוגע והגל החוזר אם ראשית הצירים נמצאת בנקודת החיבור עם העומס.
- חזרו על סעיף א אם הראשית בתחילת הקו.
- חשבו עבור סעיפים א' ו- ב' את העכבה בתחילת הקו, עכבה זו נקראת עכבת הכניסה  $Z_{in}$ .
- חשבו עבור סעיף ב את העכבה בדיוק באמצע הקו.



## (2) גל בכבל קואקסיאלי פוגע בצומת

נתון קו תמסורת חשמלי המורכב מכבל קואקסיאלי ארוך מאוד שבו צומת כך שהעכבות האופייניות משני צידי הצומת הן  $Z_1$  ו-  $Z_2$ . לצומת מגיע גל הרמוני. נתונים האמפליטודה, התדירות ואורך הגל של גל הזרם המגיע לצומת:  $\omega, \lambda_1 I_0^+$ . על סמך הנתונים הנ"ל:

- האם ניתן לחשב את אמפליטודת גל הזרם העובר והחוזר?
- האם ניתן לחשב את אמפליטודות של שלושת גלי המתח?
- האם ניתן לחשב את אורך הגל של הגל החוזר ואת אורך הגל של הגל העובר?
- האם ניתן לחשב את ההספק של כל אחד מהגלים?

**(3) קו תמסורת פתוח עם תנאי התחלה**

נתון קו תמסורת בעל השראות ליחידת אורך של:  $0.03 \text{ nH/m}$   
 וקיבוליות ליחידת אורך של:  $4 \text{ } \mu\text{F/m}$ . אורך הקו הוא:  $l = 400 \text{ m}$   
 והוא פתוח משני קצותיו.  
 ברגע:  $t = 0$  המתח בקו מתאפס והזרם הוא:

$$I(x) = \begin{cases} I_0 \frac{x}{l} & , 0 \leq x \leq l/2 \\ 0 & , l/2 \leq x \leq l \end{cases}$$

כאשר:  $I_0 = 20 \text{ A}$ .

- מהי מהירות הגלים בקו? האם הקו נמצא בריק?
- בקירוב של שתי הרמוניות ראשונות, חשבו את הזרם ב-  $t = 3 \mu\text{s}$  כתלות ב-  $x$ .
- מהו המתח באותו זמן בקצוות ובמרכז הקו?

**(4) קו תמסורת אינסופי עם תנאי התחלה**

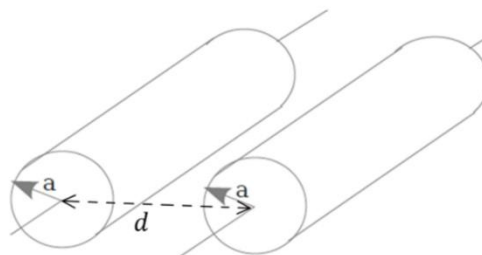
קו תמסורת עשוי מכבל קואקסיאלי אינסופי בעל עכבה אופיינית של  $25 \Omega$   
 וקיבול ליחידת אורך של:  $C_0 = 0.2 \text{ nF/m}$ .

- חשבו את מהירות הגלים והקבוע הדיאלקטרי היחסי  $\epsilon_r$ .  
 ניתן להניח:  $\mu_r = 1$ .
- נתון כי:  $V(x, t = 0) = \frac{aV_0x}{x^2 + a^2}$  וכי:  $I(x, t = 0) = 0$   
 כאשר:  $a, V_0$  נתונים.  
 חשבו את גלי המתח והזרם כתלות במיקום ובזמן.
- מהי האנרגיה הכוללת החולפת ב-  $x = 50 \text{ m}$  מ-  $t = 0$  ועד  $t = 1 \text{ ms}$ .  
 מספיק לרשום את האינטגרל אין צורך לפתור אותו.

**(5) חישוב השראות וקיבול בכבלים מקבילים**

נתון קו תמסורת העשוי משני כבלים ארוכים מאוד בעלי רדיוס  $a$  ומרחק  $d$  בין מרכזיהם. הניחו ש-  $d \gg a$  וכי התפלגות המטען על הכבלים היא אחידה ביחס לסיבוב הכבל.

- מהו הקיבול ליחידת אורך של הכבלים?
- מהי ההשראות ליחידת אורך של הכבלים?



**6) חישוב השראות וקיבול בכבל קואקסיאלי**

כבל קואקסיאלי ארוך מאוד עשוי ממעטפת גלילית ברדיוס  $a$  ומעטפת חיצונית ברדיוס  $b$  וריק ביניהם.

א. מהו הקיבול ליחידת אורך של הכבל?

ב. מהי ההשראות ליחידת אורך של הכבל?

ג. מהי מהירות הגלים בכבל?

## תשובות סופיות

$$(1) \text{ א. } I^-(x) = r \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-ikx}, I^+(x) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{ikx}, V^-(x) = -rV_0^+ e^{-ikx}, V^+(x) = V_0^+ e^{ikx}$$

$$\text{ב. } I^-(x) = r \frac{V_0^+}{Z_0} e^{2ikl} e^{-ikx}, I^+(x) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{ikx}, V^-(x) = -rV_0^+ e^{2ikl} e^{-ikx}, V^+(x) = V_0^+ e^{ikx}$$

$$\text{ג. בשני המקרים: } Z_{in} = Z_0 \frac{1 - re^{2ikl}}{1 + re^{2ikl}}$$

$$\text{ד. } Z_0 \frac{1 - re^{ikl}}{1 + re^{ikl}}$$

$$(2) \text{ א. כן. ב. כן. ג. אורך הגל החוזר זהה לאורך הגל הפוגע, אין מספיק נתונים לחשב את אורך הגל העובר. ד. אין מספיק נתונים לחשב את אורך הגל העובר.}$$

$$(3) \text{ א. } 9.13 \cdot 10^9 \frac{m}{sec} \text{ ב. } 3.39_A \sin\left(\frac{\pi}{400}x\right) - 2.91 \sin\left(\frac{2\pi}{400}x\right) \text{ ג. } V(0, 3\mu s) = -0.13V, V(l, 3\mu s) = 1.73V, V\left(\frac{l}{2}, 3\mu s\right) = 0.798V$$

$$(4) \text{ א. } \epsilon_r = 2.25, V = 2 \cdot 10^8 \frac{m}{sec}$$

$$\text{ב. } V(x, t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{aV_0(x-Vt)}{(x-Vt)^2 + a^2} + \frac{aV_0(x+Vt)}{(x+Vt)^2 + a^2} \right]$$

$$I(x, t) = \frac{aV_0}{2VL_0} \left[ \frac{x-Vt}{(x-Vt)^2 + a^2} - \frac{x+Vt}{(x+Vt)^2 + a^2} \right]$$

$$\text{ג. } \Delta E = \int_0^{0.001} V(50, t) I(50, t) dt$$

$$(5) \text{ א. } \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \left| \frac{d-a}{a} \right|} \text{ ב. } \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left| \frac{d-a}{a} \right|$$

$$(6) \text{ א. } \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{b}{a}} \text{ ב. } \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \text{ ג. מהירות האור.}$$



# גלים אור ואופטיקה

פרק 6 - גלים אורכיים-גלי קול

תוכן העניינים

|    |                   |
|----|-------------------|
| 42 | 1. גלי קול בצינור |
| 49 | 2. אפקט דופלר     |

## גלי קול בצינור

## רקע

גל אורכי - תנועת המולקולות היא בכיוון ההתקדמות של הגל

$\psi(x, t)$  - פונקציית ההעתק של מולקולות הגז משיווי משקל.  $x$  מציין את מיקום המולקולות בשיווי משקל ולא את המיקום שלהן כתלות בזמן.

$\psi_p(x, t)$  - פונקציית הלחץ העודף access pressure

$\Delta\rho(x, t)$  - פונקציית השינוי בצפיפות

נקודת צומת בפונקציית ההעתק היא נקודת טבור בפונקציות הצפיפות והלחץ ולהפך

נוסחה מתרמו לקשר בין לחץ ונפח עבור גז אידיאלי בתהליך אדיאבטי:

$$PV^\gamma = \text{const}$$

הקשר בין פונקציית ההעתק לפונקציית הלחץ:

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{1}{\gamma P_0} \psi_p$$

$P_0$  - הלחץ בשיווי משקל

$\gamma$  - קבוע הקשור לסוג הגז מתוך משוואת הגז בתהליך אדיאבטי

מקדם האלסטיות של הגז

מקדם האלסטיות של הגז

$$B_a = \gamma P_0$$

משוואת הגלים:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}$$

מהירות הגלים - מהירות הקול (לפעמים גם כתובה באות c):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$$

באוויר בתנאים סטנדרטיים:  $v \approx 340 \text{ m/s}$

אותה המשוואה מתקיימת גם עבור  $\psi_p$  ו-  $\Delta\rho$

הקשר בין הצפיפות לפונקציית ההעתק:

$$\Delta\rho = -\rho_0 \frac{\partial\psi}{\partial x}$$

עכבה של גל קול מישורי ליחידת שטח:

$$\frac{Z}{A} = \rho_0 v$$

$\rho_0$  - צפיפות המסה בשיווי משקל

A - שטח החתך של הצינור

v - מהירות הקול בחומר

האנרגיה הכוללת ליחידת אורך:

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{2} A \rho_0 \left[ \left( \frac{\partial\psi}{\partial t} \right)^2 + v^2 \left( \frac{\partial\psi}{\partial x} \right)^2 \right] = A \rho_0 \left( \frac{\partial\psi}{\partial t} \right)^2$$

השוויון האחרון הוא עבור גלים נעים בלבד

אנרגיה פוטנציאלית וקינטית ממוצעת בזמן ליחידת אורך:

$$\bar{U}_{dx} = \bar{E}_{k_{dx}} = \frac{1}{4} \rho_0 A \omega^2 \psi_{max}^2$$

אנרגיה כוללת ממוצעת בזמן ליחידת אורך:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \rho_0 A \omega^2 \psi_{max}^2$$

$\psi_{max}$  - האמפליטודה של פונקציית ההעתק - קבוע

$\omega$  - התדירות הזוויתית

הספק של גל קול נע (כמה אנרגיה עוברת דרך שטח חתך ביחידת זמן):

$$P(x, t) = \pm v \varepsilon(x, t)$$

כאשר הפלוס/מינוס הם עבור גל שנע בכיוון החיובי/שלילי בהתאמה  
(לא לבלבל עם P של לחץ)

עוצמה של הגל (ההספק ליחידת שטח):

$$I(x, t) = \frac{|P(x, t)|}{A} = v \rho_0 \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2$$

$$\bar{I} = \frac{1}{2} v \rho_0 \omega^2 \psi_{max}^2$$

מדידת עוצמה בסולם לוגריתמי:

$$I_a = I_0 \cdot 10^a$$

a - היא העוצמה ב B (בל)

$$I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

$$1B = 10 \text{ dB} \quad (1B \text{ זה דציבל})$$

עוצמה בגל כדורי:

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2}$$

תנאי שפה בצינור:

- קצה סגור  $\psi = 0$  (כמו קצה קשור במיתר)
- קצה פתוח  $\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \Rightarrow \psi_P = 0$  (כמו קצה חופשי במיתר)

## שאלות

## (1) שיעור מעורר בחלל

אסטרונאוט הנמצא במעבורת חלל יצא מהמעברות לבצע תיקון חיצוני.  
האסטרונאוט לקח איתו שיעור מעורר וכיוון אותו לצלצל בשעה שבע בערב כך  
שיספיק לחזור לארוחת הערב בתוך המעבורת. האסטרונאוט הניח את השיעור  
לידו בזמן שהוא מבצע את התיקון. האם האסטרונאוט ישמע את השיעור מצלצל?  
רמז: בחלל אין אוויר.

## (2) מצאו פונקציית גל מנתונים על צפיפות

גל קול הרמוני נע בכיוון החיובי. האמפליטודה של השינוי בצפיפות האוויר של  
הגל היא  $A_{\Delta\rho} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ . התדירות של הגל היא  $500 \text{ Hz}$ . נתון גם כי  
 $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta\rho(0,0) = 0$  ו-  $v = 340 \text{ m/s}$ . מצאו מהי ההסטה משיווי  
משקל של מולקולות האוויר הנמצאות ב  $x = 15 \text{ cm}$  בזמן  $t = 0$ .

## (3) כמה אנרגיה עברה בשעה

העוצמה של גל קול מישורי היא  $I = 1.4 \mu \text{ W/cm}^2$ . חיישן בעל שטח חתך  $A =$   
 $3.6 \text{ cm}^2$  קולט את הגל. כמה אנרגיה קיבל החיישן כל שעה?

## (4) פי כמה גדלה העוצמה עבור שינוי של דציבל אחד

ראינו כי גידול של העוצמה ב 1B הוא גידול של פי 10 ביחידות של  $\text{W/m}^2$ . חשבו  
פי כמה גדלה העוצמה ביחידות של  $\text{W/m}^2$  עבור גידול של 1dB.

## (5) חישוב הפרעה בלחץ מעוצמה ממוצעת

נתון גל קול מישורי בתדירות  $12 \text{ kHz}$ . העוצמה הממוצעת בזמן של הגל היא  $\bar{I} =$   
 $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$ . הגל מתקדם בתווך בעל:  
 $P_0 = 0.7 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ ,  $\gamma = 1.48$ ,  $v = 340 \text{ m/sec}$   
מצאו ביטוי לשינוי בלחץ כתלות במיקום ובזמן אם ידוע שהגל הוא גל סינוס.

**(6) חישוב ירידה של העוצמה**

מקור מייצר גל קול כדורי. חיישן בעל שטח חתך של  $0.2\text{m}^2$  ממוקם במרחק  $r_1 = 0.8\text{m}$  מהמקור ומודד הספק של  $P = 3\text{mW}$ .

א. מהי העוצמה של הגל במרחק  $r_1$  ?

ב. מהו ההספק של המקור?

ג. מה העוצמה של הגל במרחק  $r_2 = 1.2\text{m}$  ?

ד. מה ההספק שימדוד החיישון במרחק  $r_2$  ?

**(7) חליל בצליל לה**

מה צריך להיות אורכו של חליל על מנת שהתנודה הבסיסית שלו תהיה הצליל לה-תדר  $440\text{Hz}$  ? הניחו שמהירות הקול היא  $340\text{m/s}$  ושניתן להתייחס לחליל כצינור הפתוח בשני קצוותיו.

**(8) כמה תדירויות נמצאות בתחום השמיעה**

צינור באורך של  $1\text{m}$  מרעיש כאשר הרוח נושבת. מהירות הקול היא  $340\text{m/s}$ .  
א. אם הצינור פתוח בשני קצוותיו, כמה מתוך ההרמוניות שלו נמצאות בתחום השמיעה? ( $20\text{Hz} - 20\text{kHz}$ )  
ב. ציירו את החלק המרחבי של  $\psi_p$  עבור שלושת ההרמוניות הראשונות במקרה שבו הצינור פתוח רק בצד אחד.

**(9) רזולוציית מדידה של עטלף**

עטלפים משתמשים בגלי קול בשביל למפות את המרחב (בדומה ל"סונר"). נניח כי עטלף שולח גלי קול אל חפץ מסוים ומודד את מיקומו ביחס אליו על ידי מדידת הזמן שלוקח לגלי הקול לחזור אליו מהחפץ.

א. בהנחה שהעטלף והחפץ עומדים במקומם, מה צריכה להיות רזולוציית המדידה של העטלף, כלומר מהו הזמן הכי קצר שהוא צריך למדוד, על מנת לזהות חפץ הנמצא במרחק  $40\text{cm}$  ממנו?

ב. בהנחה שגודל החפץ הכי קטן שהעטלף מסוגל לזהות הוא בסדר גודל של אורך הגל שהעטלף מייצר, מה יהיה התדר אותו צריך העטלף לייצר על מנת לזהות חפץ בגודל של  $1\text{cm}$  ? הניחו כי מהירות הקול היא  $340\text{m/s}$



**(10) ערכי RMS**

ערך RMS של פונקציה מחזורית בזמן בעלת זמן מחזור  $T$  מוגדר כ -

$$f_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\langle f^2 \rangle}$$

ההפרעה בלחץ בגל קול מישורי נתונה ביחידות פסקל לפי :

$$\psi_p(x, t) = 6 \cdot 10^{-6} \cos(kx - \omega t)$$

נתון גם ש :

$$P_0 = 0.8 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2, \gamma = 1.4, v = 340 \text{ m/sec}, \omega = 7000 \text{ rad/sec}$$

א. מהו אורך הגל?

ב. מהו ערך ה RMS של התנודות בלחץ?

ג. מהו ערך ה RMS של המהירות החומרית בגל?

ד. מהו הערך הממוצע בזמן של צפיפות האנרגיה הנפחית  $u = \frac{E}{V} = \frac{\varepsilon}{A}$  ?

ה. מהו ההספק הממוצע בזמן הנקלט בגלאי בעל שטח של  $0.15 \text{ m}^2$  המאונך לכיוון התקדמות הגל?

**(11) גל קול כדורי וערכי RMS**

מקור מייצר גל קול כדורי הרמוני בתדר  $500 \text{ Hz}$ . ערך ה RMS של הלחץ במרחק

$$P_0 = 10^5 \text{ N/m}^2, \gamma = 1.5, v = 330 \text{ m/sec}$$

$r_1 = 30 \text{ cm}$  הוא  $4 \text{ N/m}^2$ . נתון גם ש :

א. מהו ערך ה RMS של הלחץ במרחק  $r_2 = 15 \text{ m}$  ?

ב. מהו ערך ה RMS של פונקציית ההעתק באותו המיקום ?

ג. מהו הערך הממוצע בזמן של צפיפות האנרגיה הנפחית  $u = \frac{E}{V} = \frac{\varepsilon}{A}$  באותו מיקום?

**(12) מוט ברזל מוחזק באמצע**

נתון מוט ברזל באורך  $L = 80 \text{ cm}$  ס"מ. מהירות הקול בברזל היא בערך  $4910 \text{ m/s}$ . מחזיקים את המוט במרכזו ונותנים לו מכה בנקודה הנמצאת באמצע בין נקודת האחיזה לקצה.

א. ציירו את הגל של תדירות הייסוד ושל ההרמוניה הראשונה וחשבו את התדירויות האלו.

ב. חזרו על סעיף א אם נקודת האחיזה הייתה במרחק  $\frac{1}{4}L$  מהקצה.

ג. היכן יש להחזיק את המוט בשביל להשמיע את שני הרזוננסים הבאים?

## תשובות סופיות

(1) לא

(2) 0.3mm

(3) 18,144J

(4) פי 1.26

$$\psi_p(x,t) = 0.123 \sin(222x - 75.4 \times 10^3 t) \quad (5)$$

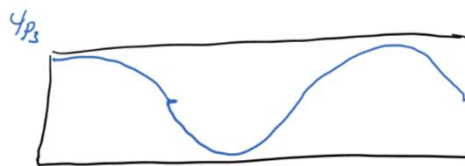
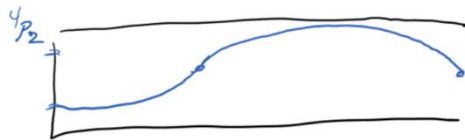
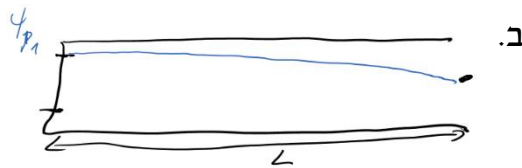
(6) א.  $15 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$  ב. 0.121 W ג.  $6.67 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$  ד. 1.33 mW

(7) 0.39m

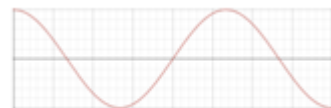
(8) א. 117

(9) א. 2.35mm ב. 34KHz

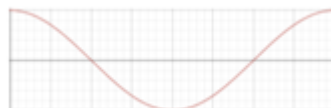
(10) א. 0.31 m

ב.  $4.24 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ ג.  $1.29 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ד.  $1.6 \times 10^{-15} \text{ J/m}^2$ ה.  $8.18 \times 10^{-14} \text{ W}$ (11) א.  $0.08 \text{ N/m}^2$ ב.  $5.6 \times 10^{-8} \text{ m}$ ג.  $4.3 \times 10^{-8} \text{ J/m}$ 

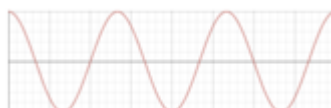
$$f_1 = 3069 \text{ Hz} \quad (12) \text{ א.}$$



$$f_2 = 9206 \text{ Hz}$$



$$f_1 = 6138 \text{ Hz} \quad \text{ב.}$$



$$f_2 = 18,413 \text{ Hz}$$

ג. עבור  $x=10\text{cm}$ ,  $n=4$  ועבור  $x=8\text{cm}$ ,  $n=5$



## אפקט דופלר

### רקע

עבור מקור נע וצופה נייח :

$$f' = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}$$

$f'$  - התדר המוסט.

$v_s$  - מהירות המקור, חיובית עם כיוון התקדמות הגל.

$f_s$  - תדירות המקור (התדירות שהצופה היה קולט אם המקור לא היה זו).

$v$  - מהירות הגל.

עבור מקור וצופה נעים :

$$f_0 = f_s \frac{v + v_0}{v - v_s}$$

$f_0$  - התדר המוסט (התדר שקולט צופה שנע).

$v_0$  - מהירות הצופה, חיובית נגד כיוון התקדמות הגל.

גלי הלם :

$$\sin \theta = \frac{v}{v_s}$$

$\theta$  - חצי מזווית הראש של קונוס גל ההלם.

## שאלות

**(1) מציאת המהירות של גוף בתנועה הרמונית**

גוף קטן בעל מסה  $m$  נע בתנועה הרמונית. הגוף משדר גל קול באופן רציף. מודדים את התדירות המינימלית והמקסימלית של גלי הקול הנקלטים מהגוף. חשבו את האנרגיה הקינטית של הגוף באמצעות התדירויות. הניחו שהבעיה חד מימדית.

**(2) מקור נע בתאוצה\***

מקור נע במהירות  $v_s$  לכיוון צופה נייח הנמצא במרחק  $L$  ופולט גלי קול בתדירות  $f_s$  (תדירות המקור). המקור מתחיל להאיץ בתאוצה קבועה  $a$ . מהי התדירות אותה ימדוד הצופה כתלות בזמן? ניתן להניח כי:  $aT \ll v_s$  וכי הצופה תמיד רחוק מהמקור. שימו לב כי לגל לוקח זמן להגיע לצופה.

**(3) נמלה מטיילת על מיתר**

במיתר אינסופי קיימת הפרעה מהצורה:  $\psi(x,t) = A \cos(kx - \omega t)$

כאשר אורך הגל ומהירות הגל הן:  $\lambda = 0.4\text{m}$ ,  $v = \frac{7\text{m}}{\text{sec}}$ .

נמלה מטיילת על המיתר במהירות  $0.2 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  בכיוון הפוך לכיוון התקדמות הגל. כמה פעמים עולה ויורדת הנמלה כל שניה?

**(4) מדידת מהירות של צוללת**

צוללת נעה במהירות:  $v_1 = \frac{19\text{m}}{\text{sec}}$  מזהה צוללת נוספת הנעה לכיוונה.

בצוללת יש סונר המייצר גלי קול בתדר קבוע:  $f = 1000\text{Hz}$ . גלי הקול פוגעים בצוללת השנייה וחוזרים לסונר. התדר של הגל המוחזר שמודד הסונר הוא:  $f' = 1060\text{Hz}$ .

ידוע שמהירות הגלים במי ים היא:  $v = 1519 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .

חשבו את מהירות הצוללת השנייה (ביחס לקרקע).



**5) פעימות של גל המוחזר מפגיעה בקיר**

אדם העומד הרחק מקיר מחזיק מקור שפולט צלילים בתדירות 280Hz .

האדם מתחיל לנוע לכיוון הקיר, עם המקור בידיו, במהירות  $3 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .

הניחו שמהירות הקול היא:  $330 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .

א. מה תדירות הצליל אותה היה שומע מאזין הנמצא ליד הקיר במנוחה?

ב. אילו האדם שנע היה יכול להאזין רק לגל המוחזר מהקיר,

מה תדירות הצליל שהוא היה שומע?

ג. נניח שעוצמת הגל המוחזר מהקיר זהה לזו של הגל הפוגע.

מה התדר ששומע האדם שנע ומהי תדירות הפעימות של גל זה?

**תשובות סופיות**

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \left( \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \right)^2 \quad (1)$$

$$f_s = \frac{1}{v_s + a \left( t - \frac{L}{v} \right)} \quad (2)$$

$$18 \quad (3)$$

$$34.8 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad (4)$$

$$283\text{Hz} \quad \text{א.} \quad 285\text{Hz} \quad \text{ב.} \quad (5)$$

ג. תדירות הגל היא: 283Hz ותדירות הפעימות היא: 2.6Hz .

# גלים אור ואופטיקה

פרק 7 - חבורת גלים ונפיצה (דיספרסיה)

תוכן העניינים

- 1. יחס נפיצה כללי ומהירות החבורה ..... 52
- 2. התרחבות בזמן של פולס ..... 54
- 3. גלים דועכים ותדירויות סף ..... 56
- 4. מקרים מיוחדים ..... 57
- 5. תרגילים נוספים ..... 59

## יחס נפיצה כללי ומהירות החבורה

### רקע

ייצוג פונקציית הגל באמצעות פורייה:  $\psi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{i(kx - \omega(k)t)} dx$

כאשר:  $A(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x, 0) e^{-ikx} dx$

מהירות הפאזה:  $v_\phi(k) = \frac{\omega}{k}$

מהירות החבורה:  $v_g(k) = \frac{\partial \omega}{\partial k}$

### שאלות

#### 1) מיתר מתכתי

יחס הנפיצה שמתאר תנודות של מיתר מתכתי ממשי הקשור בשני קצוותיו

$$\omega^2 = \left( \frac{T}{\rho} \right) k^2 (1 + \varepsilon L^2 k^2)$$

כאשר  $T$  המתוחות,  $\rho$  צפיפות המסה ליחידת אורך,  $\varepsilon \ll 1$  פרמטר חסר יחידות המייצג את קשיחות המיתר ו- $L$  אורך המיתר.

א. חשבו את מהירות הפאזה ומהירות החבורה.

ב. הסבירו מדוע מספרי הגל ואורכי הגל זהים לאלו המתקבלים אם המיתר היה אידיאלי.

ג. רשמו את התדירויות העצמיות כתלות ב- $n$  ושאר הנתונים בבעיה.

ד. הראו שבגבול  $n \rightarrow \infty$  התדירויות פרופרופציוניות ל- $n^2$  והשוו למיתר אידיאלי.

ה. נגדיר את התחום האידיאלי של מיתר על פי  $\varepsilon L^2 k^2 \ll 1$ .

כמה אופני תנודה נמצאים בתחום האידיאלי במיתר שבו  $L = 1.2m$

ו-  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-5}$ .

**(2) הוכחת נוסחה נוספת למהירות החבורה**

הראו שניתן לרשום את מהירות החבורה בתור:  $v_g(k) = k \frac{\partial v_\phi}{\partial k} + v_\phi$ .

**(3) חילוץ משוואה מתוך יחס נפיצה**

גלים אלקטרו מגנטיים בפלסמה מקיימים את יחס הדיספרסיה הבא:  
 $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$ , כאשר  $\omega_p$  ו- $c$  קבועים.

- א. רשמו את משוואת הגלים המתאימה ליחס הדיספרסיה הנ"ל.  
 ב. מצאו את מהירות הפאזה ומהירות החבורה ובדקו מה קורה בגבול של:  $ck \gg \omega_p$ .

**תשובות סופיות**

$$(1) \text{ א. } v_g = \frac{1}{2\omega} \left( \frac{T}{\rho} (2k + 4\varepsilon L^2 k^3) \right), \quad v_\phi = \sqrt{\left( \frac{T}{\rho} \right) (1 + \varepsilon L^2 k^2)}$$

ב. מספרי הגל ואורכי הגל מגיעים מתנאי השפה ואינם מושפעים מיחס הנפיצה.

$$\text{ג. } f_n = \frac{1}{2\pi} \left( \left( \frac{T}{\rho} \right) \frac{\pi^2 n^2}{L^2} (1 + \varepsilon \pi^2 n^2) \right) \frac{1}{2}$$

ד. הוכחה בסרטון.

ה.  $n \approx 7$

(2) הוכחה בסרטון.

$$(3) \text{ א. } \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -\omega_p^2 \psi + c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$$

$$\text{ב. } v_g \chi v_\rho \chi c \quad \text{בגבול } \omega_p \gg ck, \quad v_g = \frac{c^2 k}{\omega}, \quad v_\phi = \sqrt{\frac{\omega_p^2}{k^2} + c^2}$$

## התרחבות בזמן של פולס

### רקע

הרוחב כתלות בזמן של פונקציית גאוסיאן:  $\sigma^2(t) = \frac{\sigma^4 + 4\beta^2 t^2}{\sigma^2}$

כאשר  $\sigma$  היא הרוחב ההתחלתי ו-  $\beta = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} \Big|_{k_0}$ .

### שאלות

#### 1) פולס בסיבים אופטיים

נתבונן על הדיספרסיה בסיבים אופטיים. משדרים פולס גאוסיאני בעל אורך זמני  $\tau_0$  לסיב באורך  $l$ .

מהירות החבורה בסיב היא:  $v_g(k)$ .

א. ההרחבה הזמנית של הפולס מוגדרת לפי:  $\Delta\tau = \sqrt{\tau^2 - \tau_0^2}$ .

מצאו נוסחה להרחבה הזמנית כתלות בפרמטרים:  $\tau_0, v_g, l, \beta$ .

השווה ל-  $\frac{1}{2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2}$ .

הדרכה: השתמשו בנוסחה של ההרחבה המרחבית:  $\sigma^2(t) = \frac{\sigma^4 + 4\beta^2 t^2}{\sigma^2}$

ועברו לרוחב הזמני על ידי חלוקה במהירות החבורה.

ב. נתון שמהירות הפאזה עבור סיב ספציפי סביב אורך גל:  $\lambda_0 = 1.55 \mu m$

היא:  $v_\varphi(k) \approx \frac{c}{n} \left( 1 + \frac{k}{q} \right)$  כאשר  $c$  היא מהירות האור,  $n$  הוא מקדם

השבירה של הסיב ו-  $q$  פרמטר נוסף.

מהו משך רוחב הפולס שניתן לשדר כך שההרחבה שלו תהיה בגודל

הרוחב המקורי, כלומר:  $\Delta\tau = \tau_0$

ג. חשבו את  $\Delta\tau$  כאשר:

$$n = 1.47, \quad q = 4.35 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{m}, \quad \lambda_0 = 1.55 \mu m, \quad l = 75 km, \quad c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{sec}$$

מהי המגבלה על קצב השידור המירבי אם הדיספרסיה היא הגורם המגביל?

**(2) יחס מדומה בגאוסיאן**

בתווך כלשהו מתקיים יחס הנפיצה הבא:  $\omega(k) = \alpha k - i\beta k^2$  כאשר  $\alpha$  ו- $\beta$  קבועים חיוביים נתונים.

א. מצאו את מהירות הפאזה ומהירות החבורה כתלות ב- $k$ .

ב. רשמו ביטוי אינטגרלי כללי ל- $\psi(x, t)$  עבור פולס שנע בכיוון החיובי

בהינתן:  $\psi(x, 0) = f(x)$ .

ג. מצאו את:  $\psi(x, t)$  עבור פונקציית גאוסיאן:  $\psi(x, 0) = Ae^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$ .

ד. מהו רוחבו ומרכזו של הגאוסיאן כתלות בזמן?

**(3) רוחב חבילה לאחר מרחק 3 סיגמה**

גלים אלקטרו מגנטיים בפלסמה מקיימים את יחס הדיספרסיה

הבא:  $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$ , כאשר  $\omega_p$  ו- $c$  קבועים.

מעוררים בפלסמה חבילת גלים גאוסיאנית ברוחב  $\sigma$  ותדירות מרכזית  $\omega_0 > \omega_p$ .

מצאו את רוחב החבילה לאחר שהתקדמה מרחק  $3\sigma$ .

**תשובות סופיות**

$$(1) \quad \Delta\tau = \frac{2\beta l}{\tau_0 v_g^3} \quad \text{א.} \quad \tau_0 = \sqrt{\frac{2n^2 l}{c^2 q \left(1 + \frac{4\pi}{q\lambda_0}\right)^3}} \quad \text{ב.} \quad \lambda = 2.87 \cdot 10^{11} \text{ sec} \quad \text{ג.}$$

$$(2) \quad v_g(k) = \alpha - 2i\beta k, \quad v_\phi(k) = \alpha - i\beta k \quad \text{א.}$$

$$\text{ב.} \quad F(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx, \quad \psi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{i(kx - (\alpha k - i\beta k^2)t)} dk$$

$$\text{ג.} \quad \psi(x, t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 2\beta t}} Ae^{-\frac{1}{2\sigma^2 + 2\beta t}(x - \alpha t)^2}$$

$$\text{ד.} \quad \mu = \alpha t, \quad \sigma = \sqrt{\sigma^2 + 2\beta t}$$

$$(3) \quad \frac{qc^2 \omega_p^4}{\omega_0^4 (\omega_0^2 - \omega_p^2)} + \sigma^2$$



## גלים דועכים ותדירויות סף

### רקע

במקרים מסוימים יחס הנפיצה יכול לייצר מספר גל מורכב עבור תדירויות מסוימות. במקרים אלו נקבל גל דועך בתווך. קבוע הדעיכה הוא החלק המדומה של מספר הגל.

### שאלות

#### 1) גל דועך בפלסמה

גלים אלקרו מגנטיים בפלסמה מקיימים את יחס הדיספרסיה

הבא:  $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$ , כאשר  $\omega_p$  ו- $c$  קבועים, מעוררים גל

בתדירות:  $\omega_0 = \frac{1}{2} \omega_p$ .

רשמו ביטוי לפונקציית הגל, מהו קבוע הדעיכה?

### תשובות סופיות

$$\psi(x, t) = A e^{-\frac{\sqrt{3}\omega_p}{2c}x} e^{-i\frac{1}{2}\omega_p t} \quad (1)$$

קבוע הדעיכה הוא:  $\frac{\sqrt{3}\omega_p}{2c}$ .

## מקרים מיוחדים

### רקע

#### מכניקת הקוונטים:

פונקציית גל מתארת הסתברות למצוא חלקיק במיקום מסוים.

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} : \text{משוואת שרדינגר}$$

$$\rho = \hbar k : \text{התנע של חלקיק}$$

#### גלי מים:

יחס הדיספרסיה הכללי עבור גלים בנוזל

$$\omega^2 = \left[ gk + \frac{\sigma}{\rho} k^3 \right] \tanh(kH)$$

$\sigma$  – קבוע מתח הפנים, כוח ליחידת אורך או אנרגיה ליחידת שטח

$H$  – עומק הנוזל

$g$  – תאוצת הכובד

$\rho$  – צפיפות המסה ליחידת נפח

עבור גלים קצרים (גלי מתח פנים):  $\lambda \ll \lambda_c \sim 2cm$

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma k^3}{\rho}}$$

עבור גלים ארוכים (גלי כבידה) אבל קצרים מעומק המים (או הנוזל):  $H \gg \lambda \gg \lambda_c$

$$\omega = \sqrt{gk}$$

עבור גלים ארוכים וגדולים מעומק המים (או הנוזל):  $\lambda \gg H \gg \lambda_c$

$$\omega = \sqrt{gHk}$$

## שאלות

## (1) קירובים במים עמוקים

יחס הנפיצה של גלים על השפה של נוזל לא צמיג נתון בקירוב

ע"י:  $\omega^2 = \left[ gk + \frac{\sigma}{\rho} k^3 \right] \tanh(kH)$  כאשר  $g$  היא תאוצת הכובד,  $H$  גובה הנוזל,  $\sigma$  מתח הפנים ו- $\rho$  צפיפות הנוזל.

במקרים בהם המים עמוקים ביחס לאורך הגל אז:  $\tanh(kH) \approx 1$  ויחס הנפיצה

ניתן בקירוב ע"י:  $\omega^2 = gk + \frac{\sigma}{\rho} k^3$ .

א. הראו באופן כללי שבנקודת הקיצון של מהירות הפאזה מתקבל שמהירות החבורה שווה למהירות הפאזה.

ב. מהו אורך הגל  $\lambda_c$  במקרה הנתון שבו מהירות הפאזה שווה למהירות החבורה? ומהן המהירויות באורך גל זה?

ג. הראו כי עבור גלי כבידה שבהן  $\lambda \gg \lambda_c$  מתקבל:  $v_g = \frac{1}{2} v_\phi$ .

ד. הראו כי עבור גלי מתח פנים שבהם  $\lambda \ll \lambda_c$  מתקבל:  $v_g = \frac{3}{2} v_\phi$ .

## (2) צונמי ליד טונגה

בינואר 2022 התפוצץ הר געש תת ימי כ-65 ק"מ מאיי טונגה שבאוקיינוס השקט. קוטר הר הגעש הוא כ-10 ק"מ והוא יצר גל באורך של כ-20 ק"מ. כמה זמן ייקח לגל להגיע לאיים? וכמה זמן ייקח לגל להגיע לחופי קליפורניה שנמצאים בערך 8,500 ק"מ מנקודת היווצרות הגל? הניחו כי עומק האוקיינוס הוא כ-4 ק"מ.

## תשובות סופיות

(1) א. הוכחה בסרטון. ב.  $v_g(\lambda_c) = \sqrt{2} \left( \frac{g\sigma}{\rho} \right)^{1/4}$ ,  $\lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{g\rho}}$ .

ג. הוכחה בסרטון. ד. הוכחה בסרטון.

(2) כ-70 שניות לטונגה וכ-26 שעות לקליפורניה.

## תרגילים נוספים

## שאלות

## (1) גלי רוחב בשרשרת מסות בדידה

נתונה מערכת של שרשרת מסות זהות  $m$  המחוברות בקפיצים זהים בעלי קבוע  $k_0$ . המסות נמצאות במרחקים זהים אחת מהשנייה ומרחקים אלו גדולים בהרבה מהאורך הרפוי של הקפיץ ומתנודות המסות. מצאו את משוואת הגלים עבור גלי רוחב, כלומר תנודות המסות הן בכיוון מאונך לקפיצים, ומצאו את יחס הדיספרסיה.



## (2) מודל לגביש עם שכנים רחוקים

נתונה שרשרת חד ממדית של אטומים זהים בעלי מסה  $m$ . בשיווי משקל המרחק בין זוג אטומים הוא  $l$ . נתון שכל אטום מחובר לשני שכניו הקרובים ביותר באמצעות קפיצים זהים בעלי קבוע קפיץ  $k_0$  ולשני שכניו הבאים בתור באמצעות קפיצים בעלי קבוע קפיץ  $k_1$ .

א. מצאו את יחס הנפיצה של תווך זה.

ב. מהי מהירות החבורה כתלות ב- $k$  (מספר הגל)?

## (3) החזרה והעברה בתווך עם נפיצה

מיתר בעל יחס נפיצה:  $\omega = ck$  משתרע מ- $x = -\infty$  עד  $x = 0$ . ב- $x = 0$  המיתר מחובר למיתר אחר המשתרע עד  $x = \infty$  ובו מתקיימת

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi = 0$$

(זוהי משוואת קליין גורדון לחלקיק קוונטי יחסותי).

א. מצאו את יחס הנפיצה במיתר הימני.

ב. גל הרמוני בתדירות  $\omega$  ואמפליטודה  $A$  מתקדם מ- $-\infty$  למיתר הימני.

מצאו את הביטויים עבור הגל המוחזר ועבור הגל העובר במקרים הבאים:

$$\omega > \frac{mc^2}{\hbar} \quad \text{i.}$$

$$\omega < \frac{mc^2}{\hbar} \quad \text{ii.}$$

ג. חשבו את מקדמי ההחזרה וההעברה של ההספק:  $R_p = \left\langle \frac{P_r}{P_i} \right\rangle$

ו-  $T_p = \left\langle \frac{P_t}{P_i} \right\rangle$  בשני המקרים שבסעיף הקודם.

רמז: העזרו בשימור אנרגיה.

### תשובות סופיות

$$\omega(k) = 2\omega_0 \sin\left(\frac{kl}{2}\right), \quad k(4_{n+1} - 24_n + 4_{n-1}) = m\ddot{\psi}_n \quad (1)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k_0}{m}, \quad \omega_1^2 = \frac{k_1}{m}, \quad \omega^2(k) = 4\omega_1^2 \sin^2(kl) + 4\omega_0^2 \sin^2\left(\frac{kl}{2}\right) \quad (2)$$

$$\frac{1}{\omega} (2\omega_1^2 l \cdot \sin(2kl) + \omega_0^2 l \sin(kl)) \quad (3)$$

$$\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_s^2, \quad \omega_s^2 = \frac{m^2 c^4}{\hbar^2} \quad (3)$$

$$\psi_t(x, t) = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}} Ae^{-i\left(\frac{\sqrt{\omega^2 - \omega_s^2}}{c}x - \omega t\right)}, \quad \psi_r(x, t) = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}} Ae^{-i\frac{\omega}{c}(x+ct)} \quad \text{ב. i.}$$

$$\psi_t(x, t) = \frac{2A}{1 + i\sqrt{\left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2 - 1}} e^{-\frac{\sqrt{\omega_s^2 - \omega^2}}{c}x} e^{-i\omega t}, \quad \psi_r(x, t) = \frac{1 - i\sqrt{\left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2 - 1}}{1 + i\sqrt{\left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2 - 1}} Ae^{-i\frac{\omega}{c}(x+ct)} \quad \text{ii.}$$

$$T_p = 1 - \left( \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}} \right)^2, \quad R_p = \left( \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}} \right)^2 \quad \text{ג. i.}$$

$$T_p = 0, \quad R_p = 1 \quad \text{ii.}$$

# גלים אור ואופטיקה

פרק 8 - גלים דו מימדיים ומנחה גלים

תוכן העניינים

1. גלים דו מימדיים ..... 61

## גלים דו מימדיים

### רקע

משוואת הגלים :

$$\frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

$T$  - מתיחות ליחידת אורך.  
 $\rho$  - צפיפות מסה ליחידת שטח.

פתרון :

$$z(x, y, t) = A e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)}$$

$$\vec{k} = (k_x, k_y)$$

כיוון וקטור הגל  $\vec{k}$  הוא כיוון התקדמות הגל וחזיתות הגל הן במאונך אליו.

אורך הגל :

$$\lambda = \frac{2\pi}{|\vec{k}|}$$

יחס הנפיצה :

$$\omega^2 = \frac{T}{\rho} (k_x^2 + k_y^2) = v^2 \cdot |\vec{k}|^2$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

תנאי שפה מלבנים עבור שפה קשורה :

$$z(x, y, t) = \sum_{m,n} A_{m,n} \sin\left(\frac{\pi n}{L_x} x\right) \sin\left(\frac{\pi m}{L_y} y\right) \cos(\omega_{m,n} t + \varphi_{m,n})$$

## שאלות

## (1) תנאי התחלה משולשים בתוף ריבועי

נתון תוף ריבועי כך ש:  $0 \leq x, y \leq L$ . התוף קשור בקצוותיו ובעל מתיחות ליח' אורך  $T$  וצפיפות  $\rho$ . מותחים את מרכז התוף במרכזו ומשחררים ממנוחה כך שבזמן:  $t = 0$  נוצרת בו הצורה:

$$z(x, y, 0) = Af(x)f(y)$$

$$f(q) = \begin{cases} q & , 0 \leq q \leq \frac{L}{2} \\ L - q & , \frac{L}{2} \leq q \leq L \end{cases}$$

- א. מצאו את מקדמי הפרישה ורשמו את הצורה הכללית של פונקציית הגל.
- ב. מצאו את פונקציית הגל אם ראשית הצירים הייתה במרכז התוף ולא בפינה רמז: אין צורך לפתור מחדש.
- ג. נניח כי כל מקדם פרישה הקטן מ-  $\frac{411}{100}$  הוא זניח. כמה מקדמי פרישה משמעותיים קיימים (ללא מקדמים המאפסים את הפונקציה).

## (2) תוף ריבועי לא איזוטרופי

- נתון תוף ריבועי בגודל  $L_x L_y$ , התפוס בקצותיו. התוף אינו איזוטרופי, המתיחות בציר  $x$  היא  $T_x$  והמתיחות בציר  $y$  היא  $T_y$ .
- א. רשמו את משוואת הגלים עבור התוף.
  - ב. מהו יחס הנפיצה?
  - ג. מהם אופני התנודה?



## תשובות סופיות

$$z(x, y, t) = \sum_{m,n} A_{m,n} \sin\left(\frac{\pi n}{L} x\right) \sin\left(\frac{\pi m}{L} y\right) \cos(w_{m,n} t) \quad \text{א. (1)}$$

$$A_{m,n} = \frac{16L^2}{\pi^2 m^2 n^2} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi m}{2}\right)$$

$$w_{m,n} = \frac{T}{\rho} \cdot \frac{\pi^2}{L^2} (n^2 + m^2)$$

$$z(x, y, t) = \sum_{m,n} A_{m,n} \sin\left(\frac{\pi n}{L} \left(x + \frac{L}{2}\right)\right) \sin\left(\frac{\pi m}{L} \left(y + \frac{L}{2}\right)\right) \cos(w_{m,n} t) \quad \text{ב.}$$

ג. 10

$$\frac{T_x}{\rho} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{T_y}{\rho} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad \text{א. (2)}$$

$$w^2 = \frac{T_x}{\rho} k_x^2 + \frac{T_y}{\rho} k_y^2 \quad \text{ב.}$$

$$z(x, y, t) = \sum_{m,n} A_{m,n} \sin\left(\frac{\pi n}{L_x} x\right) \sin\left(\frac{\pi m}{L_y} y\right) \cos(w_{m,n} t + \varphi_{m,n}) \quad \text{ג.}$$

# גלים אור ואופטיקה

פרק 9 - גלים אלקטרו-מגנטיים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 64

## משוואות הגלים האלקטרומגנטיים

**רקע:**

משוואות מקסוול בהיעדר מטענים וזרמים חופשיים:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{H} &= -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

בחומר איזוטרופי ולינארי מתקיים:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

משוואת הגלים עבור השדה החשמלי והמגנטי:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

כאשר:

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad \text{ובריק:}$$

המשוואה היא עבור כל רכיב בנפרד.

המשוואה זהה לשדה המגנטי.

**אינדקס השבירה** (מהירות האור בריק חלקי מהירות האור בחומר):

$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

תמיד גדול מאחד (מהירות האור בחומר תמיד קטנה מהמהירות בריק):

פתרון למשוואת הגלים במימד אחד:

$$E_x(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

מעבר לייצוג קופלקסי:  $\cos(kx - \omega t) = \text{Re}[e^{i(kx - \omega t)}]$

כשעובדים עם הייצוג הקומפלקסי ניתן לעבוד רק עם החלק התלוי במרחב (או השדה ב- $t=0$ ) ובסוף להכפיל את הפונקציה ב- $e^{-i\omega t}$  בשביל לקבל את התלות בזמן.

**יחס הדיספרסיה** - הקשר בין התדירות למספר הגל:

$$\omega = uk$$

אם היחס לא לינארי אז צריך להבדיל בין מהירות הפאזה למהירות החבורה:

$$u_{ph} = \frac{\omega}{k}, u_g = \frac{d\omega}{dk}$$

## גל אלקטרומגנטי מישורי

**רקע:**

הצורה הכללית של הפתרון ההרמוני:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

כאשר:

$$\vec{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z} \quad \text{וקטור הגל -}$$

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$$

הערות – תמיד אפשר להוסיף גם פאזה.

$$\omega = u|k| = u\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad \text{יחס הדיספרסיה בגל:}$$

הכיוון של  $\vec{k}$  הוא כיוון התקדמות הגל ובגל מישורי תמיד  $\vec{E} \perp \hat{k}$ .

לכיוון של  $\vec{E}$  (המסומן בדו"כ ב- $\hat{n}$ ) קוראים כיוון הקיטוב של הגל.

השדה המגנטי בגל:

כיוון השדה המגנטי מאונך לשדה החשמלי ולכיוון התקדמות הגל. התלות בזמן ובמרחב של השדה המגנטי זהה לזו של השדה החשמלי. (אותו קוסינוס עם אותו ארגומנט).

$$\vec{B} = \frac{1}{u} \hat{k} \times \vec{E} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\omega}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{העכבה של התווך:}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \eta_0 = 120\pi \quad \text{בריק:}$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\eta} \hat{k} \times \vec{E},$$

$$\vec{E} = -\eta \hat{k} \times \vec{H}$$

**וקטור פוינטינג** (האנרגיה שהגל נושא) - כמות אנרגיה ליחידת שטח ליחידת זמן.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

בנוסחה מציבים את הביטוי הממשי של השדות.

הכיוון של  $\vec{S}$  הוא בכיוון של  $\hat{k}$  (כיוון התקדמות הגל).  
הממוצע של הוקטור פוינטינג בזמן (נקרא גם העוצמה של הגל):

$$\vec{S}_{\text{Avg}} = \langle \vec{S} \rangle = \text{Re} \left\{ \frac{\vec{\tilde{E}} \times \vec{\tilde{H}}^*}{2} \right\}$$

$\vec{\tilde{E}}$  ו-  $\vec{\tilde{H}}$  הם הייצוג הקומפלקסי של השדות.

המרה של הנגזרות בזמן ובמרחב:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -i\omega$$

$$\vec{\nabla} \rightarrow i\vec{k}$$

### שאלות:

- (1) **דוגמה - חישוב כל הגדלים הבסיסיים**  
השדה החשמלי של גל א"מ המתקדם בחומר לא מגנטי נתון בביטוי  
הבא:  $\vec{E} = 4\pi \cos(10^9 t - 6x) \hat{y} \frac{mV}{m}$   
א. מהו התדר של הגל ומהו אורך הגל?  
ב. מהו מקדם השבירה והקבוע הדיאלקטרי של החומר?  
ג. מהו  $\vec{H}$  ומהו וקטור פוינטינג הממוצע?

- (2) **דוגמה 2 - חישוב כל הגדלים**  
השדה:  $\vec{H} = H_0 e^{i(2\pi x - 6\pi y - 10^8 \pi t)} \cdot \frac{3\hat{x} + \hat{y}}{\sqrt{10}}$  מתפשט בתווך לא מגנטי.  
מצאו את:  
א. וקטור הגל ואורך הגל.  
ב. תדר הגל.  
ג. מהירות הגל בתווך ומקדם השבירה.  
ד. המקדם הדיאלקטרי והעכבה.  
ה. השדה החשמלי.

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } f = 1.59 \cdot 10^8 \text{ Hz}, \lambda = \frac{\pi}{3} \text{ m} \quad \text{ב. } n = 1.8, \varepsilon_r = 3.24$$

$$\text{ג. } \vec{H} = 6 \cdot 10^{-5} \cos(6x - 10^9 t) z \frac{A}{m}, \vec{S}_{Avg} = 12\pi \cdot 10^{-8} \hat{x}$$

$$(2) \quad \text{א. } \vec{K} = 2\pi(1, -3, 0), \lambda = \frac{1}{\sqrt{10}} \text{ m} \quad \text{ב. } f = 5 \cdot 10^7 \text{ Hz}$$

$$\text{ג. } u = 5 \cdot \sqrt{10} \cdot 10^6 \frac{m}{\text{sec}}, n = 18.97 \quad \text{ד. } \eta = 2\pi \cdot \sqrt{10}, \varepsilon_r = 360$$

$$\text{ה. } \vec{E}(x, y, t) = -2\pi \cdot \sqrt{10} \cdot H_0 e^{i(2\pi x - 6\pi y - 10^8 \pi t)} \hat{z}$$

## קיטוב מעגלי ואליפטי

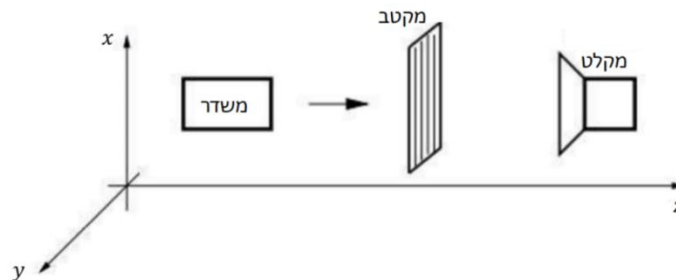
### רקע:

הקיטוב של הגל נקבע על ידי כיוון השדה החשמלי (לא לבלבל עם כיוון הגל).  
**מקטב** - מודד את הקיטוב של הגל.  
**קיטוב לינארי** - כיוון השדה קבוע.  
**קיטוב מעגלי ימני** - רכיב  $y$  מפגר אחרי רכיב  $x$  ב- $90^\circ$ .  
 כלומר הפאזה של רכיב  $y$  פחות הפאזה של רכיב  $x$  שווה  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ .  
 השדה מסתובב נגד השעון או בהתאם לכלל יד ימין ביחס לציר ה- $z$ .  
**קיטוב מעגלי שמאלי** - רכיב  $y$  מקדים את רכיב  $x$  ב- $90^\circ$ .  
 ( $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ) השדה מסתובב עם השעון או הפוך לכלל יד ימין ביחס לציר ה- $z$ ).  
**קיטוב אליפטי** - מתקבל כאשר יש הפרש פאזה של  $90^\circ$  והאמפליטודה של הרכיבים שונה או אם הפרש הפאזה שונה מ- $90^\circ$ .

### שאלות:

#### 1) דוגמה חשובה - שינוי עוצמה ממקטבים

נתונה המערכת הבאה:



במערכת, המשדר יכול לייצר גל הנע בכיוון  $z$  בכל קיטוב שנרצה.  
 והמשדר יכול למדוד גל בכל קיטוב שמגיע אליו.  
 המקטב מורכב מרשת מתכתית כפי שמתואר באיור.  
 כיוון המקטב מוגדר לפי כיוון הרכיב של השדה שעובר, כלומר במאונך לרשת.  
 א. עבור המצב של המקטב בתמונה נתון כי המקלט אינו קולט סיגנל.  
 רשמו את פונקציית הגל שמייצר המשדר.  
 ב. עבור אותו גל מוסיפים לפני המקטב הקיים מקטב זהה נוסף בזווית של  $30^\circ$  מעלות ביחס לציר ה- $x$ .  
 מה היחס בין העוצמה שימדוד הגלאי לעוצמה שיוצאת מהמשדר?



**2) דוגמה - קיטוב לינארי ומעגלי**

מצאו את הקיטוב של השדה במקרים הבאים.

עבור קיטוב לינארי רשמו את כיוון הקיטוב וזווית הקיטוב.

א.  $\vec{E} = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{x} + 3E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{y}$

ב.  $\vec{E} = E_0 \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) \hat{x} + E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{y}$

ג.  $\vec{E} = E_0 \cos(kz + \omega t) \hat{x} + E_0 \cos\left(kz + \omega t + \frac{\pi}{2}\right) \hat{y}$

ד.  $\vec{H} = H_0 \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) \hat{x} + H_0 \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) \hat{y}$

**תשובות סופיות:**

1) א.  $\vec{E}(z, t) = E_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t)$  ב.  $\frac{3}{16}$

2) א. קיטוב ליניארי,  $\theta = 72^\circ$ ,  $\hat{n} = \frac{1}{\sqrt{10}}(1, 3)$

ב. קיטוב מעגלי שמאלי. ג. קיטוב מעגלי ימני.

ד. קיטוב ליניארי,  $\theta = -45^\circ$ ,  $\hat{n} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1)$

## פגיעה ישרה בתווך דיאלקטרי

### רקע:

כאשר גל הנע בתווך אחד פוגע בשפה של תווך אחר נקבל גל עובר וגל מוחזר תדירות כל הגלים זהה ושווה לתדירות המקוראת אמפליטודות הגל העובר והגל המוחזר נקבל מתנאי השפה.

$$D_{2\perp} - D_{1\perp} = \sigma_{free} \quad B_{2\perp} = B_{1\perp}$$

$$E_{2\parallel} = E_{1\parallel} \quad H_{2\parallel} - H_{1\parallel} = k_{free}$$

$\sigma_{free}$  - היא צפיפות המטען המשטחית והחופשית על השפה

$k_{free}$  - צפיפות הזרם המשטחי והחופשי על השפה

בפגיעה ישרה (או פגיעה בניצב) לשני השדות רכיב מקביל לשפה בלבד.

בתווך דיאלקטרי:  $\sigma_{free} = k_{free} = 0$   
הקשר בין האמפליטודות:

$$\frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

$$\frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

השוויון השני נכון רק אם:  $\mu_1 = \mu_2$  (זה המצב ברוב המקרים).  
לא לבלבל בין  $n$  ל- $\eta$ .

**מקדם העברה:**

$$\tau = \frac{E_t}{E_0}$$

**מקדם החזרה:**

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_0}$$

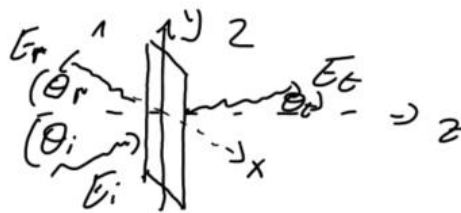
בפגיעה ישרה בתווך דיאלקטרי:

$$1 + \Gamma = \tau$$

## פגיעה בזווית בתווך דיאלקטרי

רקע:

**מישור השפה** בין החומרים (מישור  $xy$  באיור).  
**מישור הפגיעה** הוא המישור של וקטורי הגל (מישור  $yz$  באיור).



משיקולי סימטריה  $k_y$  זהה לכל הגלים.

$$\theta_i = \theta_r$$

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{u_t}{u_i} = \frac{n_i}{n_t} \quad \text{חוק סנל:}$$

אם:  $n_i > n_t$  אז קיימת **זווית קריטית**.  
 אם זווית הפגיעה גדולה מהזווית הקריטית אז לא יהיה גל עובר או תהיה החזרה מלאה:

$$\theta_c = \text{shiftsin} \left( \frac{n_t}{n_i} \right)$$

**משוואות פרנל:**

עבור פגיעה בזווית עם קיטוב אנכי (השדה החשמלי מאונך למישור הפגיעה):

$$\Gamma^\perp = \frac{E_{r0}^\perp}{E_{i0}^\perp} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} = \frac{n_1 \cos \theta_i - \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_1 \cos \theta_i + \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

$$\tau^\perp = \frac{E_{t0}^\perp}{E_{i0}^\perp} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

$$1 + \Gamma^\perp = \tau^\perp$$

עבור פגיעה בזווית עם קיטוב מקבילי (השדה החשמלי מקביל למישור הפגיעה):

$$\Gamma^{\parallel} = \frac{E_{r_0}^{\parallel}}{E_{i_0}^{\parallel}} = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} = \frac{\frac{\mu_1}{\mu_2} n_2^2 \cos \theta_i - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{\frac{\mu_1}{\mu_2} n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

$$\tau^{\parallel} = \frac{E_{t_0}^{\parallel}}{E_{i_0}^{\parallel}} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} = \frac{2n_1 n_2 \cos \theta_i}{\frac{\mu_1}{\mu_2} n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

$$1 + \Gamma^{\parallel} = \tau^{\parallel} \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i}$$

**זווית ברוסטר** היא הזווית שבה יש העברה מלאה (ואין החזרה).

זווית ברוסטר בקיטוב מקבילי:

$$\sin^2 \theta_B^{\parallel} = \frac{1 - \frac{\mu_t \varepsilon_i}{\mu_i \varepsilon_t}}{1 - \left( \varepsilon_t / \varepsilon_i \right)^2}$$

אם:  $\mu_2 \approx \mu_1$  אז:

$$\sin \theta_B^{\parallel} = \frac{1}{1 + \varepsilon_i / \varepsilon_t}$$

$$\tan \theta_B^{\parallel} = \frac{n_t}{n_i}$$

בקיטוב אנכי:

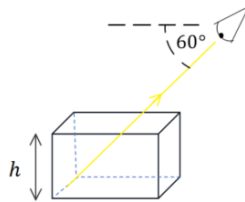
$$\sin^2 \theta_B^{\perp} = \frac{1 - \frac{\mu_i \varepsilon_t}{\mu_t \varepsilon_i}}{1 - \left( \mu_i / \mu_t \right)^2}$$

\* מאוד נדיר למצוא חומרים שקיימת עבורם זווית ברוסטר בקיטוב אנכי.

## שאלות:

## (1) תרגיל - צופה מסתכל על תיבה

לתיבת זכוכית ריקה גובה של:  $h = 6\text{cm}$ . צופה מסתכל על התיבה, כאשר הוא מוריד את ראשו בזווית של 60 מעלות מתחת לאופק הוא רואה בדיוק את קצה הבסיס הרחוק של התיבה. ממלאים את התיבה בשמן  $n = 1.54$ . איזה נקודה בבסיס התיבה יראה הצופה? (מצאו את מרחק הנקודה מהקצה הרחוק של בסיס התיבה).



## (2) תרגיל - שבירה דרך מספר חומרים

בתמונות הבאות מתוארים חומרים בעלי מקדמי שבירה שונים. גל עובר דרך השכבות כמתואר באיורים. הניחו שהתמונות מדויקות. דרגו את מקדמי השבירה של החומרים השונים, בכל תמונה, מהקטן לגדול (אין קשר בין התמונות).



## (3) דוגמה - גל פוגע בזווית במים

- גל אלקטרומגנטי מישורי נע באוויר (ריק) ופוגע בזווית בפני המים. הקבוע הדיאלקטרי של מי ים הוא בערך 80. (הניחו שהמים מתנהגים כמבודד).
- מצאו את זווית ברוסטר עבור גל בקיטוב מקבילי.
  - המקוטב אנכית פוגע בפני המים בזווית שחישבתם בסעיף א.
  - מהי זווית ההעברה של הגל?
  - מה הם מקדמי ההעברה וההחזרה?

**(4) תרגיל - שבירה במעברים עם זווית קריטית וברוסטר**

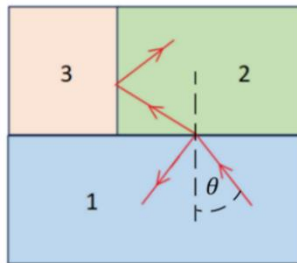
אור נכנס מחומר 1 ועובר שבירה במעבר לחומר 2 כך שחלקו מוחזר וחלקו מועבר, ראו איור. הקרן שהועברה ממשיכה עד לפגיעה בחומר 3 שם היא פוגעת בו בזווית הקריטית ומבצעת החזרה מלאה.

נתון:  $n_1 = 1.5$ ,  $n_2 = 1.3$ ,  $n_3 = 1.1$ .

א. מהי הזווית  $\theta$  שבאיור?

ב. האם צריך להגדיל או להקטין את הזווית  $\theta$  כך שהאור לא יבצע החזרה מלאה וייכנס לחומר 3?

ג. האם האור יעבור לחומר 3 בהינתן ש- $\theta$  היא זווית ברוסטר למעבר בין חומר 1 לחומר 2? (הניחו כי הפרמבילות זהה).


**(5) תרגיל - גלים בין שני מקטבים**

גל בעל קיטוב בכיוון  $x$  ואמפליטודה של השדה החשמלי  $E_0$  נע בכיוון  $z$ . הגל עובר דרך שני מקטבים הראשון בעל קיטוב בזווית 20 מעלות עם ציר  $x$  והשני בזווית 60 מעלות עם ציר  $x$ . בכל הסעיפים ניתן להזניח החזרות מרובות.

א. מהי האמפליטודה והכיוון של הגל העובר את המקטב הראשון?

ב. מהי האמפליטודה והכיוון של הגל העובר את המקטב השני? רשמו ביטוי לגל זה.

ג. בהנחה שהמקטב השני הוא מקטב רשת המחזיר את הרכיב המקביל ללא איבוד אנרגיה לחוס. מהי האמפליטודה והכיוון של הגל המוחזר מהמקטב השני?

**6 תרגיל - מקטב מערימה של משטחי זכוכית**

- דרך פשוטה ויעילה לבנות מקטב היא להשתמש בערימה של משטחי זכוכית מיקרוסקופים עם מרווחים ביניהם. הרעיון הוא לנצל את ההבדל בין מקדמי ההעברה של הרכיב המקביל והמאונך. בזווית ברוסטר ישנה העברה מלאה של הרכיב המקביל בעוד שרק חלק מהרכיב המאונך עובר, כלומר זהו סוג של מקטב. נניח שיש לנו חתיכה אחת של זכוכית והפגיעה בה היא בזווית ברוסטר.
- א. מצאו את זווית ברוסטר עבור הפגיעה בזכוכית (מאוור) בעלת מקדם שבירה  $n = 1.46$  (מקדם השבירה תלוי באורך הגל, הניחו שזה מקדם השבירה עבור אורך הגל שבבעיה וכי הפרמביליות אחידה).
- ב. מצאו את זווית ההעברה, האם היא תלויה בקיטוב?
- ג. הראו כי זווית הפגיעה ביציאה מהזכוכית היא זווית ברוסטר לאותו מעבר.
- ד. מצאו את מקדמי ההעברה לכל רכיב ( $\tau^\parallel$ ,  $\tau^\perp$ ) עבור היציאה מהזכוכית.

מקדמי ההחזרה וההעברה של האנרגיה עבור שני הרכיבים מוגדרים באופן

$$\text{הבא: } T = \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} |\tau|^2$$

מקדם ההעברה הכולל הוא מכפלה של מקדם ההעברה בכניסה של האור לזכויות במקדם ההעברה של היציאה של האור מהזכוכית. ניתן להזניח החזרות מרובות.

ה. מהו מקדם ההעברה הכולל של האנרגיה עבור כל רכיב.

- ו. נגדיר את יעילות המקטב לפי:  $e = \frac{T^\parallel}{T^\perp}$  לכמה שכבות נזדקק על מנת להגיע ליעילות של  $e = 10^4$

**תשובות סופיות:**

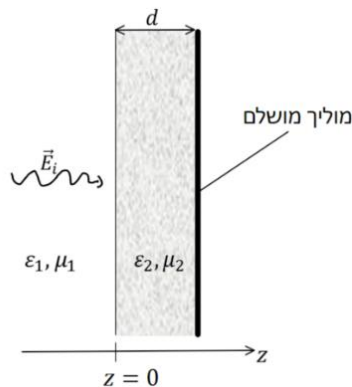
- (1) 1.4cm
- (2) תמונה א:  $n_1 > n_2 > n_3$ , תמונה ב:  $n_5 < n_3 = n_2 < n_1 < n_4$
- (3) א.  $\theta_B = 84^\circ$  ב.  $\theta_t = 6.4^\circ$
- ג.  $\tau^\perp = 0.025$ ,  $\Gamma^\perp = -0.975$
- (4) א.  $\theta \approx 27.5^\circ$  ב. צריך להגדיל את טטה. ג. האור ייכנס.
- (5) א.  $E_0 \cos(20^\circ)$  בכיוון:  $\cos(20^\circ)\hat{x} + \sin(20^\circ)\hat{y}$  ב.  $\vec{E}(z, t) = E_0 \cos(20^\circ) \cos(40^\circ) (\cos(60^\circ)\hat{x} + \sin(60^\circ)\hat{y}) \cos(kz - \omega t)$  ג.  $E_0 \cos(20^\circ) \sin(40^\circ)$  בכיוון:  $\cos(30^\circ)\hat{x} - \sin(30^\circ)\hat{y}$
- (6) א.  $\theta_B \approx 55.6^\circ$  ב.  $\theta_t \approx 34.4^\circ$  לא תלויה בקיטוב.
- ג.  $\tau^\perp = 1.36$   $\tau^\parallel = 0.685$  ד.  $\tau^\perp = 0.754$   $\tau^\parallel = 1$  ה. 33

## מעבר של יותר מתווך אחד

### רקע:

נציב את תנאי השפה עבור כל ממעבר.

### שאלות:



#### 1) שכבת חומר דיאלקטרי ליד מוליך מושלם

גל הנע בתווך דיאלקטרי בעל  $\epsilon_1, \mu_1$  פוגע בניצב לשכבה בעובי  $d$  עם  $\epsilon_2, \mu_2$  ומוחזר ממוליך מושלם הנמצא בקצה השכבה, ראו איור. השדה החשמלי של הגל נתון לפי:  $\vec{E}_i(z, t) = E_{i0} \hat{x} \cos \omega \left( \frac{z}{u} - t \right)$  מצאו את:

א.  $\vec{E}_r(z, t)$

ב.  $\vec{E}_1(z, t)$

ג.  $\langle S_1 \rangle$

ד. העובי  $d$  עבורו לא ניתן יהיה לזהות את השכבה.

#### 2) גל עובר דרך פיסת נחושת

גל אלקטרומגנטי מישורי בתדירות  $10 \text{ MHz}$  עם אמפליטודה  $E_{i0}$

פוגע בניצב לפיסת נחושת (פגוע  $\sigma = 5.80 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ ) דקה

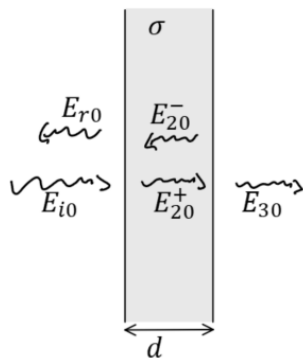
מישורית בעובי  $d$  השווה לעומק החדירה.

הזניחו החזרות מסדר שני ומעלה וחשבו את:

א. האמפליטודות של כל שאר

הגלים:  $E_{r0}, E_{20}^+, E_{20}^-, E_{30}$  כתלות ב- $E_{i0}$ .

ב.  $\frac{\langle S_3 \rangle}{\langle S_{1i} \rangle}$



#### 3) חישוב כל הגדלים

השדה החשמלי של גל מישורי הנע בתווך הומוגני נתון לפי

הביטוי:  $\vec{E} = \cos(z + 2\pi \cdot 10^7 t) \hat{y}$  ביחידות של וולט למטר.

א. מהו תדר הגל (בהרץ)?

ב. מהו כיוון התקדמות הגל?

ג. מהו אורך הגל?

בהנחה כי:  $\mu = \mu_0$  מצאו את המקדם הדיאלקטרי היחסי של החומר.

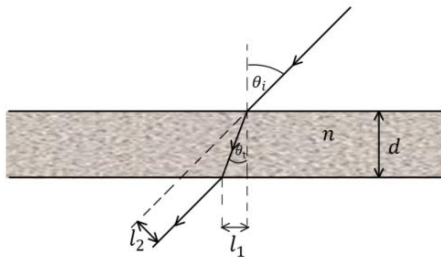
רשמו ביטוי ל- $\vec{H}$ .

ד. רשמו ביטוי לווקטור פוינטינג הממוצע בזמן.



**(4) ציירו קיטוב אליפטי**

ציירו את אליפסת הפולריזציה (האליפסה אותה "מצייר" קצהו של ווקטור השדה החשמלי במישור המאונך לכיוון התקדמות הגל כאשר הצופה מודד אותו לאורך זמן בנקודה קבועה) עבור הגל:  $\vec{E} = (5i\hat{x} - \hat{y})e^{-i(\pi z + \omega t)}$ .

**(5) חישוב ההזזה לטרלית (חוק סנל)**

קרן אור נעה באוויר ופוגעת בזווית  $\theta_i$  בחומר שקוף בעובי  $d$  בעל אינדקס שבירה  $n$ .

א. מצאו את זווית ההעברה.

ב. מצאו את המרחק של נקודת היציאה  $l_1$ .

ג. מצאו את ההזזה הטרלית (המרחק  $l_2$  באיור).

**(6) תרגיל - אלכוהול מזויף**

רועי קנה בקבוק יוקרתי של משקה ג'ין ורוצה לוודא שהאלכוהול אינו מזויף. אלכוהול מזויף מכיל כמות גבוהה של אתנול במקום מתנול. לרועי יש שני מצביעי לייזר באורכי גל של  $532nm$  ו-  $638nm$ . הוא מכוון את הלייזר בזווית  $30^\circ$  מעלות כלפי מעלה ולמרכז הבקבוק ומודד את הגובה  $h$  ממנו יוצאת קרן האור, ראו איור. קוטר הבקבוק הוא  $12cm$ . את מקדמי השבירה של מתנול ואתנול ניתן למצא באינטרנט והקירוב שלהם עבור תחום אורכי גל:  $\lambda \in [0.4\mu m, 0.8\mu m]$  הוא:

$$n(\lambda) \approx -0.8\lambda^3 + 1.8\lambda^2 - 1.4\lambda + 1.7 \quad \text{מתנול}$$

$$n(\lambda) \approx -0.1\lambda^3 + 0.3\lambda^2 - 0.3\lambda + 1.4 \quad \text{אתנול}$$

בנוסחה יש להציב את אורך הגל הנמדד באוויר ב -  $\mu m$ .

לצורך הפשטות נניח כי הבקבוק מכיל 100% אתנול או מתנול.

א. ציירו באמצעות מחשב גרף של  $n(\lambda)$  עבור מתנול ואתנול על אותו גרף.

ב. ציירו באמצעות מחשב את זווית ההעברה כתלות ב-  $\lambda$ .

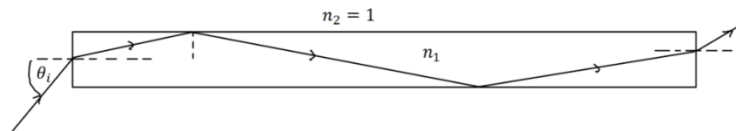
על איזה מהלייזרים תמליצו לרועי להשתמש?

ג. מצאו את הערך של  $h$  עבור כל אחד מסוגי החומרים.

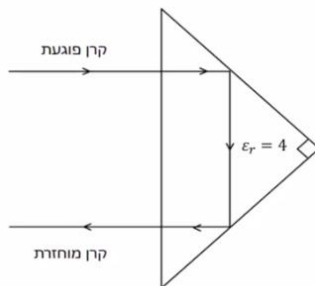


**(7) גל א"מ לא יוצא מסיב אופטי**

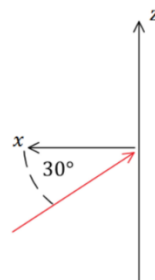
סיב אופטי ישר עשוי מחומר דיאלקטרי שקוף בעל אינדקס שבירה  $n_1$ . גל אלקטרו מגנטי נכנס בצידו האחד של הסיב בזווית  $\theta_i$  ופוגע בדפנות של הסיב במהלך ההתקדמות. מהו  $n_1$  המינימלי כך שהגל לא יצא מהסיב עד אשר יגיע לקצה השני ללא תלות בזווית הפגיעה  $\theta_i$ .

**(8) אור מוחזר מפריזמה משולשת**

אור נכנס ומוחזר מפריזמה משולשת העשויה זכוכית. מסלול קרן האור מתואר באיור. מהו אחוז עוצמת האור של הקרן המוחזרת. הניחו  $\epsilon_r = 4$  עבור זכוכית. הפריזה היא משולש שווה שוקיים וישר זווית.

**(9) תרגיל - גל פוגע במראה בזווית**

גל אלקטרו מגנטי מתקדם במישור  $xz$  עם זווית של  $30^\circ$  מעלות ביחס לציר ה- $x$ . כפי שמתואר באיור. לגל כיתוב בכיוון  $y$ . הגל פוגע במראה מישורית הנמצאת במישור  $zy$  ומוחזר ממנה. א. כתבו את  $\hat{k}$  עבור הגל הפוגע והמוחזר. ב. מהו הכיוון של השדה החשמלי והמגנטי של הגל המוחזר?



## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } \vec{E}_r(z, t) = E_{i0} \cos(K_1 z + \omega t - 2\theta) \hat{x} \quad \text{כאשר } \tan \theta = \frac{\eta_2}{\eta_1}.$$

$$\text{ב. } \vec{E}_1(z, t) = E_{i0} \hat{x} [\cos(K_1 z - \omega t) + \cos(K_1 z + \omega t - 2\theta)] \quad \text{ג. } \langle S_1 \rangle = 0.$$

$$\text{ד. } d = \frac{\pi n}{\omega \sqrt{\mu_2 \epsilon_2}}.$$

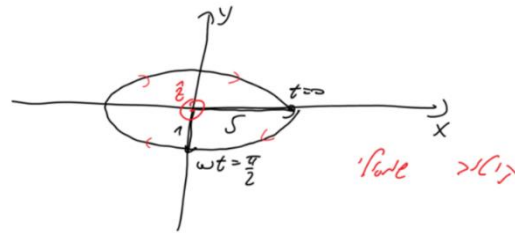
$$(2) \quad \text{א. } \frac{E_{r0}}{E_{i0}} \approx -1 + 4.67 \cdot 10^{-6} i, \quad \frac{E_{20}^+}{E_{i0}} \approx (1.90 + 0.140i) \cdot 10^{-6}, \quad \frac{E_{20}^-}{E_{i0}} \approx (-2.49 + 4.53i) \cdot 10^{-6}.$$

$$\text{ב. } \frac{\langle S_3 \rangle}{\langle S_1 \rangle} = 3.13 \cdot 10^{-11} \quad \text{ג. } \frac{E_{30}}{E_{i0}} \approx (-2.70 + 4.90i) \cdot 10^{-6}.$$

$$(3) \quad \text{א. } f = 10^7 \text{ Hz} \quad \text{ב. בכיוון } -\hat{z} \quad \text{ג. } \lambda = 2\pi m \quad \text{ד. } \epsilon_r = 22.8.$$

$$\text{ה. } \vec{H}(z, t) = \frac{1}{8\pi^2} \cos(z + 2\pi \cdot 10^7 t) \hat{x} \quad \text{ו. } \vec{S}_{Avg} = -\frac{\hat{z}}{16\pi^2}.$$

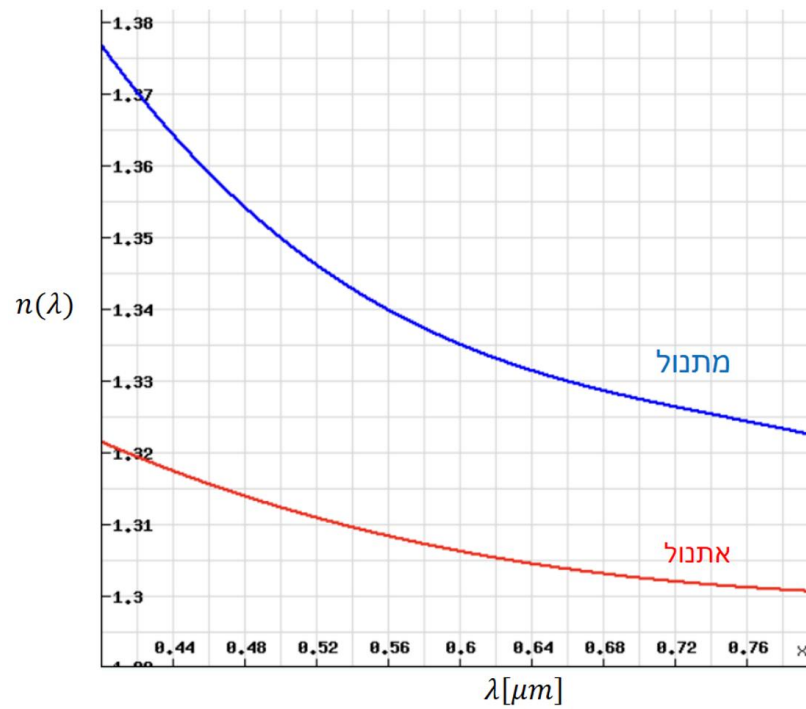
(4) שרטוט:



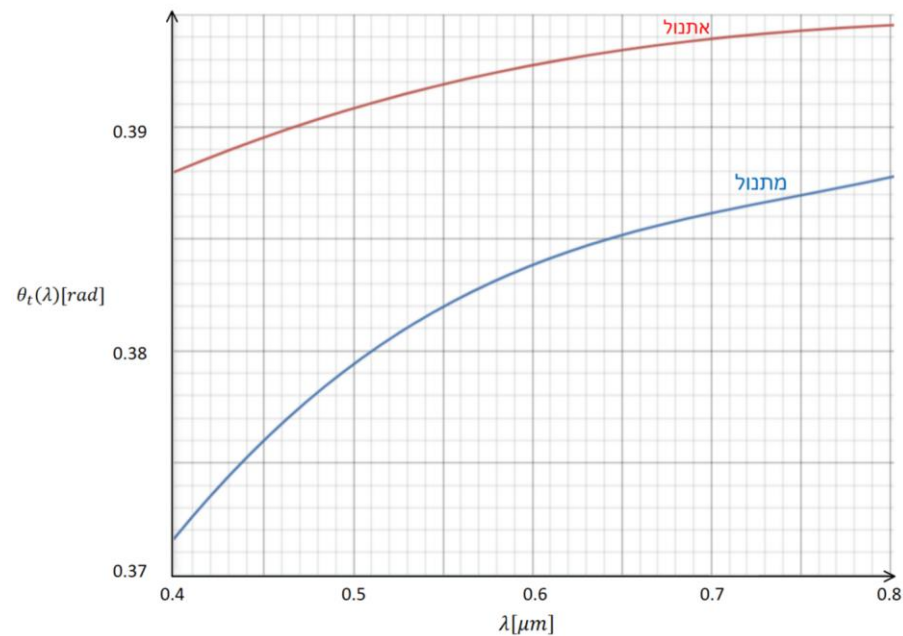
$$(5) \quad \text{א. } \sin \theta_t = \frac{1}{n} \sin \theta_i \quad \text{ב. } l_1 = \frac{d \sin \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}.$$

$$\text{ג. } l_2 = d \sin \theta_i \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \right).$$

(6) א. שרטוט:



ב. בלייזר של ה-532 ננומטר.



ג. אתנול – 4.83cm , מתנול - 4.96cm.

(7)  $\sqrt{2}$ .

(8) 79%.

$$(9) \quad \text{א. } \hat{k}_r = \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{x} + \frac{1}{2} \hat{z} \quad , \quad \hat{k}_i = -\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{x} + \frac{1}{2} \hat{z} \quad \text{ב. } \hat{E} = -\hat{y} \quad \text{ג. } \hat{B}_r = -\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{z} + \frac{1}{2} \hat{x}$$

# גלים אור ואופטיקה

פרק 10 - אופטיקה

תוכן העניינים

1. מבוא לאופטיקה ..... 82

## מבוא לאופטיקה:

רקע:

חוק סנל

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

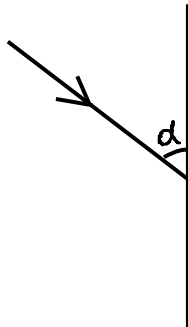
שאלות:

### (1) תרגול אור במרחב

- מציבים מקור אור נקודתי מול מסך במרחק 4m מהמסך.  
במרחק 1m ממקור האור מציבים מחסום בגובה 1.5m.
- שרטט את הבעיה בקנה מידה לבחירתך.
  - מצא את גודלו של הצל על הקיר:
    - בעזרת שרטוט.
    - בעזרת חישוב.
  - היכן היה צריך למקם המחסום, כדי שגודל הצל יהיה 2.5m?
  - מוסיפים מקור אור זהה (בניסוי המקורי), במרחק של 1m מתחת למקור הראשון.  
מצא, בעזרת שרטוט, את אזורי האור והצל השונים שמתקבלים.

### (2) תרגול אור במרחב 2

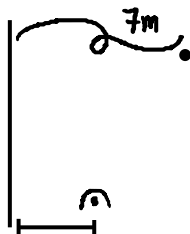
- מהירות האור בריק היא:  $C = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .
- היעזר בדף הנוסחאות, ומצא תוך כמה זמן מגיעה קרן אור שמוחזרת מהירח – אל כדור הארץ.
  - מצא תוך כמה זמן מגיעה קרן היוצאת מהשמש אל כדור הארץ.
  - אם אני מדליק פנס עכשיו, וחבר נמצא במרחק 3m ממני, תוך כמה זמן יגיע אליו האור מהפנס, מרגע שהדלקתי אותו?
  - שנת אור מוגדרת כמרחק שאור עובר בשנה.  
מצאו מהי שנת אור בעזרת הגדרה זו.

**(3) החזרה תרגיל 1**

- נתון מקור אור הפולט אור ומולו מוצבת מראה.  
 הזווית  $\alpha$  בשרטוט שווה  $76^\circ$ .  
 א. מה זווית ההחזרה של הקרן המשורטטת בתרשים?  
 ב. מצא, בעזרת שתי קרניים נוספות לבחירתך, את מיקום הדמות המדומה של העצם הנ"ל.  
 ג. מצא את שדה הראייה של העצם הנ"ל.  
 ד. מכסים בבד סגול את החצי העליון של המראה. האם עדיין תיווצר דמות של העצם?

**(4) החזרה תרגיל 2**

- נתון התרשים הבא, בו נער בגובה 1.7m עומד לפני מראה.  
 א. שרטט קרן אור היוצאת מידו הימנית של הנער, פוגעת במראה וחוזרת לעיניו (הקרן מייצגת את הקרן/ הקרניים, שבזכותן הנער רואה את ידו במראה).  
 ב. שרטט (הכי מדויק שאפשר), את דמות הנער במראה.  
 ג. מציבים מאחורי המראה מסך סגול. האם עדיין יראה הנער את דמותו?  
 ד. מה הגובה המינימאלי של המראה שיש להציב, כדי שדמות הנער תתקבל במלואה?  
 ה. מרחיקים את המראה למרחק כפול מגוף הנער. כיצד תשתנה תשובתך לסעיף ד'?

**(5) החזרה תרגיל 3**

- מציבים מטבע מול מראה, במרחק 7m ממנה, כמתואר בתרשים.  
 אדם שנמצא במורד התרשים רואה את המטבע בזווית  $30^\circ$ , ביחס לקו המקביל למראה, ואת דמותו של המטבע בזווית  $50^\circ$ .  
 חשב את מרחקו של האדם מהמראה.

**(6) תרגול חוק סנל 1**

- קרן לייזר מתקדמת במים ( $n_{\text{water}} = 1.33$ ), ופוגעת במשטח זכוכית ( $n_{\text{glass}} = 1.5$ ).  
 חלק מהקרן נשבר לזכוכית וחלק מוחזר.  
 הזווית בין פני המים והקרן הפוגעת היא  $60^\circ$ .  
 א. חשבו את זווית השבירה.  
 ב. שרטטו את המקרה הנ"ל.

**(7) תרגול חוק סנל 2**

תלמיד שלח קרני אור בזוויות שונות מאוויר לעבר חומר שקוף בעל מקדם שבירה לא ידוע, ומדד את זוויות הפגיעה והשבירה המתאימה לה לזוויות פגיעה שונות. תוצאות המדידות בטבלה שלפניך:

| $\theta_1$ | $\theta_2$ |
|------------|------------|
| 0          | 0          |
| 10         | 7.33       |
| 20         | 14.57      |
| 30         | 21.57      |
| 40         | 28.21      |
| 50         | 34.28      |
| 60         | 39.55      |
| 70         | 43.71      |
| 80         | 46.40      |

- האם גרף  $\theta_2(\theta_1)$  מצופה שיצא לינארי?
- הגדר משתנים עבורם כן תצפה לקבל גרף לינארי.
- שרטט גרף לינארי זה.
- מצא, בעזרת הגרף, את מקדם השבירה של החומר השקוף הלא ידוע.

**(8) החזרה גמורה תרגיל 1**

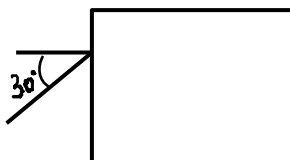
קרן אור מתקדמת בזכוכית ( $n = 1.5$ ), ופוגעת בגבול בין זכוכית זו ובין מים ( $n = 1.33$ ), בזוויות:

א.  $\theta_1 = 0^\circ$

ב.  $\theta_1 = 30^\circ$

ג.  $\theta_2 = 70^\circ$

שרטט את המשך מהלך הקרן, לאחר הפגיעה, בכל אחד משלושת המקרים.

**(9) החזרה גמורה תרגיל 2**


נתון מלבן מפרספקס  $n = 1.5$ , כמתואר בתרשים. קרן אור, המגיעה משמאל, פוגעת בפרספקס בזווית פגיעה של  $30^\circ$ . השלם את מהלך הקרן בתוך הפרספקס.



## תשובות סופיות:

- (1) א. ראה סרטון.  
ד. ראה סרטון.
- (2) א.  $t = 1.28 \text{ sec}$   
ב.  $t \cong 8 \frac{1}{3} \text{ min}$   
ג.  $t = 10^{-9}$   
ד.  $9.47 \cdot 10^{15} \text{ m}$
- (3) ראה סרטון.
- (4) א. ראה סרטון.  
ה. ללא שינוי.
- (5)  $2.43 \text{ m}$
- (6) א.  $26.3^\circ$   
ב. ראה סרטון.
- (7) א. לא.  
ב.  $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta_1$  ג. ראה סרטון.
- ד.  $1.353$
- (8) ראה סרטון.
- (9) ראה סרטון.
- ב.י.  $6 \text{ m}$     ii.  $6 \text{ m}$     ג.  $2.4 \text{ m}$
- ב.  $0.85 \text{ m}$     ג. כן.