

גלים 114086



## תוכן העניינים

|    |                               |    |
|----|-------------------------------|----|
| 1. | תנועה הרמונית - מתוך פיזיקה 1 | 1  |
| 2. | מודים עצמיים                  | 9  |
| 3. | אנליזת פורייה                 | 10 |
| 4. | מבוא לגלים                    | 19 |
| 5. | גלים רוחביים במיתר            | 24 |
| 6. | חבורת גלים ונפיצה (דיספרסיה)  | 49 |
| 7. | גלים אלקטרו-מגנטיים           | 58 |
| 8. | התאבכות בגלים דו ותלת מימדיים | 76 |

# גלים 114086

## פרק 1 - תנועה הרמונית - מתוך פיזיקה 1

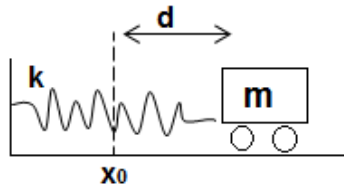
### תוכן העניינים

1. תנועה הרמונית פשוטה..... 1
2. בור פוטנציאל..... 3
3. תנועה הרמונית מרוסנת..... 5
4. תנועה הרמונית מאולצת..... 7

## תנועה הרמונית פשוטה:

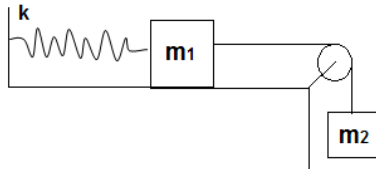
### שאלות:

#### (1) דוגמה - מסה מתנגשת במסה



מסה  $m$  מונחת על שולחן ללא חיכוך ומחוברת לקפיץ המחובר לקיר בעל קבוע קפיץ  $k$ . מותחים את המסה מרחק  $d$  מהמיקום בו הקפיץ רפוי ומשחררים ממנוחה. מצא את  $x(t)$  של המסה.

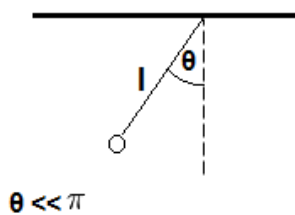
#### (2) דוגמה - מסה על שולחן מחוברת למסה תלויה



מסה  $m_1$  מונחת על שולחן ללא חיכוך ומחוברת לקפיץ בעל קבוע  $k$ . מהמסה יוצא חוט העובר דרך גלגלת אידיאלית וקשור למסה נוספת התלויה באוויר  $M$ .

- מצא את נקודת שיווי המשקל של המערכת (קבע את הראשית בנקודה שבה הקפיץ רפוי).
- מצא את תדירות התנודה של המערכת.
- מהי האמפליטודה המקסימלית האפשרית לתנועה כך שהמתיחות בחוט לא תתאפס במהלך התנועה?

#### (3) דוגמה - מטוטלת מתמטית (עם אנרגיה)



נתונה מטוטלת (מתמטית) התלויה מהתקרה. אורך החוט של המטוטלת הוא  $l$ . מצא את תדירות התנודות הקטנות ואת הזווית כפונקציה של הזמן. הנח כי המטוטלת מתחילה את תנועתה ממנוחה בזווית ידועה  $\theta$  (דרך אנרגיה).

**תשובות סופיות:**

$$x(t) = -\frac{v_0}{2} \sqrt{\frac{2m}{k}} \cos\left(\sqrt{\frac{k}{2m}}t + \frac{\pi}{2}\right) + x_0 \quad (1)$$

$$A_{\max} = \frac{g}{\omega^2} \quad \text{ג.} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m_1 + m_2}} \quad \text{ב.} \quad x = \frac{m_2 g}{k} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad \theta(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

## בור פוטנציאל:

### שאלות:

#### (1) פוטנציאל לנארד-ג'ונס

פונקציית הפוטנציאל של לנארד ג'ונס מתארת את האינטראקציה בין אטומים

$$U(r) = \varepsilon \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 \right] \quad \text{או מולקולות בתוך סריג והיא נתונה לפי הנוסחה:}$$

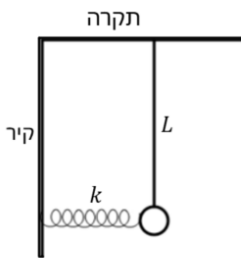
כאשר  $\varepsilon$  ו- $r_0$  קבועים ו- $r$  הוא המרחק בין המולקולות.

מצא את התדירות של תנודות קטנות סביב שיווי משקל של המערכת.

ניתן להניח שמדובר בחלקיק אחד במסה  $m$  המרגיש את הפוטנציאל

מחלקיק שני במסה  $M$  הנשאר נייח ( $m \ll M$ ).

#### (2) מטוטלת מתמטית וקפיץ עם אנרגיות



מטוטלת עם מסה  $m$  תלויה מהתקרה באמצעות חוט באורך  $L$ .

קושרים למסה קפיץ בעל קבוע  $k$  המחובר אופקית לקיר.

הקפיץ במצב רפוי כאשר החוט מאונך לתקרה.

מזיזים את המסה זווית קטנה  $\theta_0$  ימינה ומשחררים ממנוחה.

א. מצאו את הזווית של המסה כתלות בזמן.

ב. מהי המתיחות בחוט כאשר המוט נמצא במצב אנכי תוך

כדי תנועה.

#### (3) עיפרון עם מוטות בשיווי משקל

הגוף שבאיור מורכב מעיפרון בעל מסה זניחה ואורך  $L$ .

לקצה של העיפרון מחוברים שני כדורים בעלי מסה  $m$

באמצעות מקלות דקים חסרי מסה באורך  $l$  ובזווית  $\alpha$ .

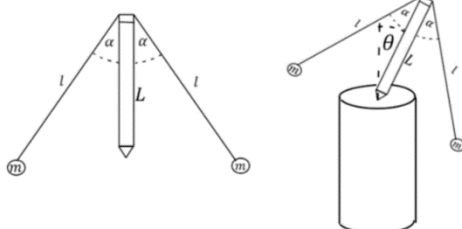
מניחים את הגוף על מעמד ומטים אותו בזווית  $\theta$  במישור הדיף.

א. רשמו את האנרגיה הפוטנציאלית של הגוף כתלות בזווית  $\theta$ .

ב. באיזו זווית  $\theta$  יהיה הגוף בשיווי משקל?

ג. מה התנאי לכך ששיווי המשקל יהיה יציב?

ד. מהו זמן המחזור של התנודות סביב נקודת שיווי המשקל?



## תשובות סופיות:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{72\varepsilon}{mv_0}} \quad (1)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{mg + kL}{mL}} \cdot t\right) \quad \text{א.} \quad (2) \quad \text{ב. } T = mg + (mg + kL)\theta_0^2$$

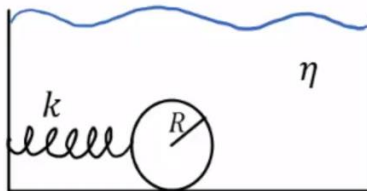
$$U = 2mg(L - l \cos \alpha) \cos \theta \quad \text{א.} \quad (3) \quad \text{ב. } \theta = 0 \quad \text{ג. } L < l \cos \alpha$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{l \cos \alpha - L}{L^2 + l^2 - 2Ll \cos \alpha}}} \quad \text{ד.}$$

## תנועה הרמונית מרוסנת:

### שאלות:

#### (1) כדור במיכל מים



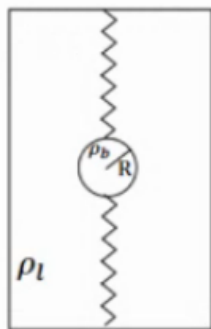
כדור בעל מסה  $m$  ורדיוס  $R$  נמצא בתוך מיכל מים ומחובר באמצעות קפיץ אופקי לדופן המיכל. קבוע הקפיץ הוא  $k$ . בתנועת הגוף במים, מפעילים המים על הכדור כוח התנגדות המתכונתי והפוך למהירותו. כוח זה נקרא כוח סטוקס וגודלו

הוא:  $\vec{F} = -6\pi R\eta\vec{v}$ . כאשר  $\eta$  היא צמיגות המים ו- $R$  הוא רדיוס הכדור.

התייחס ל- $m$ ,  $k$ ,  $\eta$ ,  $R$  כנתונים ומצא את תדירות התנודות של הכדור

בהנחה ש- $R < \frac{\sqrt{mk}}{3\pi\eta}$ . הזנח את החיכוך בין הכדור לתחתית המיכל.

#### (2) שני קפיצים בנוזל



כדור נמצא בתוך תיבה מלאה במים ומחובר עם קפיץ אידיאלי לקצה העליון של התיבה ועם קפיץ אידיאלי נוסף זהה לקצה התחתון של התיבה.

נתון:  $R$  - רדיוס הכדור,  $\rho_b$  - צפיפות המסה של הכדור,

$\rho_l$  - צפיפות המסה של המים,  $K$  - קבוע שני הקפיצים ו- $\eta$  - צמיגות המים.

(תזכורת: כאשר כדור נמצא בתוך נוזל פועלים עליו

כוח ציפה:  $F = \rho_l V g$  וכוח סטוקס:  $F = -6\pi\eta R v$ ).

א. מצא את נקודת שיווי המשקל של המערכת.

ב. מה התנאי שיהיו תנודות הרמוניות?

מצא את התדירות בהנחה שתנודות אלו מתקיימות.

ג. מצא את התנאי בו יחזור הכדור הכי מהר לנקודת שיווי המשקל.

#### (3) איבוד אנרגיה במחזור

בתנועה הרמונית מרוסנת קיים ריסון חלש כך שהאמפליטודה של התנועה יורדת ב-2.5 אחוז כל מחזור.

בכמה אחוז יורדת האנרגיה בכל מחזור?



**(4) משקולת במיכל מים תלויה מהתקרה**

משקולת שמסתה:  $M = 1\text{kg}$  נמצאת במיכל מים ומחוברת לתקרה באמצעות קפיץ בעל קבוע:  $k = 20 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ . כוח ההתנגדות שמפעילים המים הוא מהצורה של:  $\vec{F} = -\lambda \vec{v}$  כאשר:  $\lambda = 4 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$  ו-  $\vec{v}$  היא מהירות המסה. הניחו שהמשקולת אינה יוצאת מהמים ואינה פוגעת ברצפה.

א. תוך כמה זמן תרד האמפליטודה לחמישית מגודלה ההתחלתי? (הניחו שהפאזה היא אפס)

ב. לאחר כמה מחזורים זה יקרה?

**(5) מסה באמבט מים ודבש**

מסה:  $m = 1\text{kg}$  נמצאת באמבט מלא מים, המסה מחוברת באמצעות שני קפיצים זהים בעלי קבוע:  $k = 25 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  לשתי דפנות האמבט ונעה ללא חיכוך עם ריצפת האמבט. מזיזים את המסה  $0.5\text{m}$  מנקודת שיווי המשקל ומשחררים ממנוחה. התנגדות המים מפעילה כוח גרר:  $\vec{F} = -\lambda \vec{v}$  כאשר:  $\lambda = 10 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$ .

א. מהו העתק המסה כתלות בזמן?

ב. מחליפים את המים בדבש מה שמגדיל את  $\lambda$  פי  $\sqrt{2}$ . מזיזים שוב את המסה  $0.5\text{m}$  ומשחררים, מהו העתק המסה כתלות בזמן?

**תשובות סופיות:**

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{3\pi R \eta}{m}\right)^2} \quad (1)$$

$$y_{eq} = \frac{F_b}{2K} \quad \text{א.} \quad \omega^* = \sqrt{\frac{2K}{m} - \left(\frac{6\pi\eta R}{2m}\right)^2} \quad \text{ב.} \quad \frac{2K}{m} = \frac{6\pi\eta R^2}{2m} \quad \text{ג.} \quad (2)$$

$$5\% \quad (3)$$

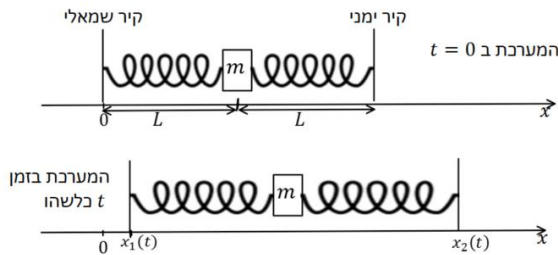
$$1.6\text{sec} \quad \text{א.} \quad \text{ב. בערך מחזור אחד.} \quad (4)$$

$$x(t) = \frac{1}{2} + \frac{5}{\sqrt{2}} t e^{-5\sqrt{2}t} \quad \text{ב.} \quad x(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-5t} \cos\left(5t + \frac{\pi}{4}\right) \quad \text{א.} \quad (5)$$

## תנועה הרמונית מאולצת:

### שאלות:

#### (1) מסה בין קירות זזים



מסה  $m$  מחוברת לשני קפיצים זהים בעלי קבוע  $k$  ואורך רפוי  $L$  משני צידיה. הקפיצים מחוברים לקירות הנמצאים במרחק  $L$  מהמסה משמאלה ומימינה והמערכת כולה מונחת על שולחן חלק (כוח הכובד לתוך הדף).

על המסה פועל כוח גרר:  $F = -bv$ . ב- $t = 0$  הקירות מתחילים לזוז. ראשית הציירים ממוקמת במרכז התנועה של הקיר השמאלי והכיוון החיובי ימינה. מיקום הקירות כתלות בזמן הוא:  $x_1(t) = d \sin(\omega t)$ ,  $x_2(t) = 2L + 2d \sin(\omega t)$ . נתונים:  $d \ll L$ ,  $d, L, \omega, k, b, m$ .

א. מהי תדירות התנועה ומהי האמפליטודה?

ב. מה התנאי לתהודה בהנחה כי הריסון חלש מאוד?

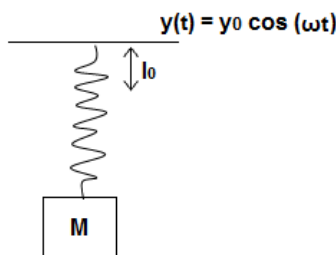
#### (2) מציאת תדירות ברבע אמפליטודה

מסה  $m$  מחוברת לקפיץ אופקי בעל קבוע  $k$ , המסה נעה על מישור חלק ללא חיכוך. על המסה פועל כוח גרר:  $f = -bv$  וכוח מאלץ:  $F(t) = d \cdot \cos(\omega t)$ . מצא את תדירות הכוח בה אמפליטודת התנועה במצב העמיד תהיה רבע מהאמפליטודה המקסימלית. הנח כי:  $d \ll \sqrt{mk}$ ,  $\omega, b, k, m, d$  נתונים וכי:  $b \ll \sqrt{mk}$ .

#### (3) מסה תלויה על קרש נע

מסה  $M$  מחוברת באמצעות קפיץ אנכי לקרש אופקי הנע בציר ה- $y$  לפי:  $y(t) = y_0 \cos(\omega t)$ .

קבוע הקפיץ  $k$  ואורכו הרפוי  $l_0$  נתונים. מצא את מיקום המסה כפונקציה של הזמן.



## תשובות סופיות:

$$\omega \sim \sqrt{\frac{2k}{m}} \quad \text{ב.} \quad A(\omega) = \frac{\frac{3kd}{m}}{\sqrt{\left(\frac{2k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{b}{m}\right)^2} \omega^2} \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4C}}{2}} \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{\frac{F_0}{m}}{\frac{k}{m} - \omega^2} \cos \omega t + y'_0 \quad (3)$$

# גלים 114086

פרק 2 - מודים עצמיים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים.....9

## 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.

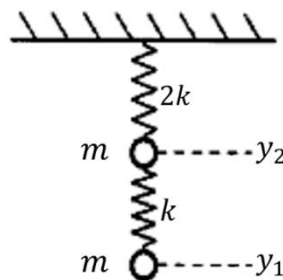
ב. כתבו את מערכת המשוואות בצורה מטריציאלית ומצאו את התדירויות העצמיות.

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 114086

פרק 3 - אנליזת פורייה

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 10

## 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)

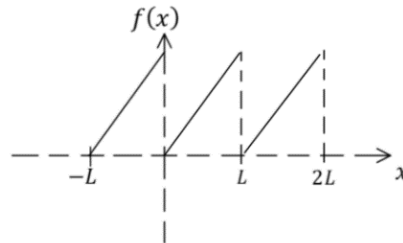


## שאלות

### (1) דוגמה - פונקציית מסור

מצאו את טור פורייה עבור פונקציית מסור:

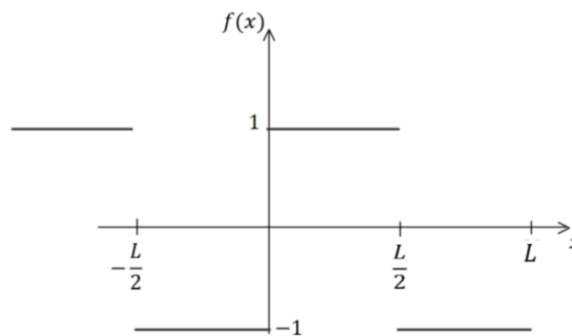
$f(x) = Ax$  כאשר  $0 \leq x < L$  ובעלת מחזור  $L$ . קבוע נתון.



### (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.

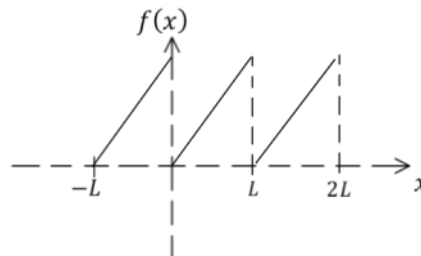
ב. כתבו את הפונקציה כטור סינוסים.

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.  $[0, 2\pi]$

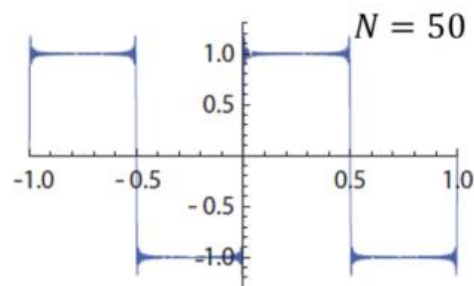
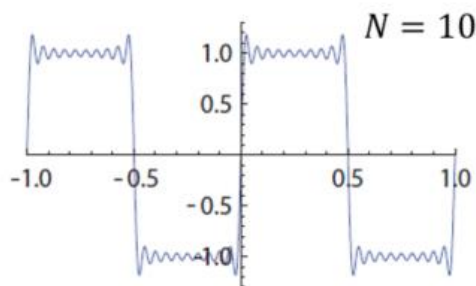
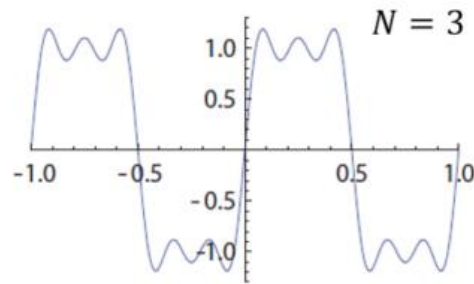
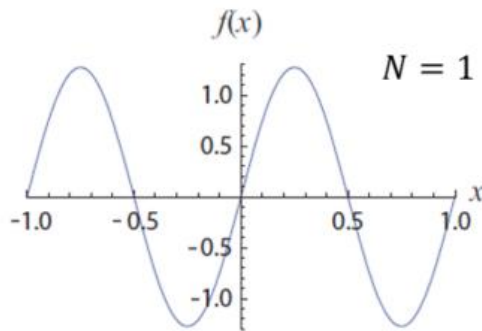
ב.  $[-\pi, \pi]$

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  $f(x) = x^2 e^{-\alpha x^2}$ .

### (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 114086

פרק 4 - מבוא לגלים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 19



## הרצאות ותרגילים – מבוא לגלים

### סוגי גלים ותאור גלים

רקע:

גל - הפרעה שמתקדמת במרחב

גלים רוחביים - גלים שבהם ההפרעה היא בכיוון ניצב להתקדמות הגל (מיתר מים)

גלים אורכיים - גלים שבהם ההפרעה היא בכיוון מקביל להתקדמות הגל (קול)

תווך - החומר שבו מתקדמת ההפרעה

פונקציית הגל - פונקציה שמתארת את ההפרעה כתלות בזמן ובמרחב. פונקציית הגל צריכה להיות פונקציה מהצורה  $f(x \pm vt)$ , כאשר  $v$  היא מהירות הגל.

יש להבחין בין מהירות התקדמות הגל למהירות של החלקיקים בחומר!

אמפליטודה (משרעת) - הערך המרבי של ההפרעה בגל (בדרי"כ מסומנת באות  $A$ ).

אנרגיה של גל -  $E \propto A^2$

### משוואת הגלים

רקע:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} : \text{משוואת הגלים במימד אחד}$$

כל פונקציה מהצורה  $f(x \pm vt)$  היא פתרון של משוואת הגלים. סכום של שני פתרונות מהווה גם פתרון אם לשני הפתרונות אותה מהירות גל.

### שאלות

#### 1) תרגיל - קוסינוס בשלישית

האם הפונקציה  $y(x,t) = A \cos^3(ax + bt)$  מהווה פתרון של משוואת הגלים? במידה וקיים תנאי, פרטו את התנאי, מצאו את מהירות הגל ואת כיוון תנועתו.

#### 2) תרגיל - סכום של שתי פונקציות

האם הפונקציה  $y(x,t) = f(x - at) + g(x + bt)$  מהווה פתרון למשוואת הגלים? במידה וקיים תנאי, פרטו את התנאי, מצאו את מהירות הגל ואת כיוון תנועתו.

(3) האם הפונקציות הבאות הן פתרון של משוואת הגלים?

א.  $y(x, t) = 0.005 \sin(20x - 660t) + 0.009e^{(x+33t)}$

ב.  $y(x, t) = 0.005 \sin(20x - 660t) + 0.005 \cos(x + 32t)$

(4) תרגיל - חקירת פונקציה

נתונה הפונקציה  $f(x) = \frac{4}{3x^2 + 1}$ .

א. שרטטו איכותית את צורת הפונקציה.

ב. רשמו ביטוי לגל בעל פרופיל זה, אשר נע בכיוון השלילי של ציר ה- $x$ ,

במהירות  $v = 4 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , בהנחה שברגע  $t = 0$  מתקיים  $\psi(x, 0) = f(x)$ .

ג. חשבו, ישירות מהביטוי שמצאתם בסעיף הקודם, היכן נמצא

המקסימום של הגל ברגע  $t_1 = 4 \text{ sec}$  וברגע  $t_2 = 5 \text{ sec}$ .

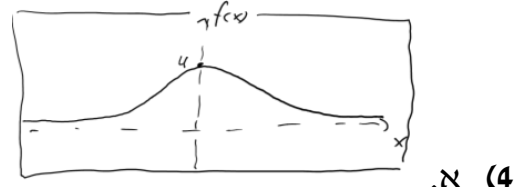
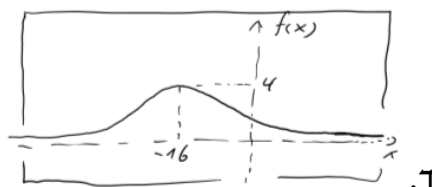
ד. שרטטו איכותית את צורת הגל ברגע  $t = 2$ .

### תשובות סופיות

(1)  $\frac{b}{a}$ , בכיוון השלילי של ציר ה- $x$ .

(2)  $Y(x, t)$  מהווה פתרון רק אם  $a = \pm b$  ואז מהירות הגל היא  $a$ .  
לתנאים ראו בסרטון.

(3) א. כן. ב. לא.



א. (4)  
ב.  $4(x, t) = \frac{4}{3(x+4t)^2 + 1}$  ג. -16, -20

## תכונות ותופעות בגלים

רקע:

**התאבכות** - סכימה של גלים שנפגשים

**חזית גל** - אוסף הנקודות המגיעות לשיא באותו זמן

## גלים הרמוניים

רקע:

**גל מחזורי** - גל שמכיל מקטע שחוזר על עצמו

**אורך הגל** - אורך הקטע שחוזר, מסומן ב- $\lambda$  (בדור"כ נמדד ע"י המרחק בין שיא לשיא)

**זמן המחזור** - הזמן שלוקח לגל לעשות מחזור שלם, מסומן ב- $T$ ,  $\lambda = v \cdot T$

**תדירות** - מספר המחזורים בשנייה, מסומנת ב- $f$ ,  $f = \frac{1}{T}$

**גל הרמוני** - פונקציית קוסינוס או סינוס,  $y(x, t) = A \cos(kx \pm \omega t + \varphi)$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

**מספר הגל** -  $k$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\omega = v \cdot k$$

**גל עומד**

מאפיינים:

1. נקודות צומת- נקודות שלא זזות - node
2. אין מהירות גל
3. נקודת טבור - נקודות שבהן האמפליטודה מקסימאלית - antinode
4. מורכב משני גלים נעים זהים הנעים בכיוונים מנוגדים

משוואת גל עומד היא מהצורה

$$y(x, t) = A \sin(kx) \cos(\omega t + \varphi) = \frac{A}{2} \sin(kx - (\omega t + \varphi)) + \frac{A}{2} \sin(kx + (\omega t + \varphi))$$

## שאלות

**(1) תרגיל - חישוב ערכים בסיסיים בגל במיתר**

במיתר נע גל  $y(x, t) = 2 \cos(500t - 0.2x)$ .

א. חשבו את האמפליטודה, התדר הזוויתי ( $\omega$ ), התדר ( $f$ ), מספר הגל ( $k$ ), אורך הגל ( $\lambda$ ) ומהירות הגלים.

ב. באותו מיתר קיים גל  $y(x, t) = 2 \sin(500t - 0.2x) + 2 \sin(500t - 0.2x + 0.6)$ .  
על ידי שימוש בזהות של סכום סינוסים, קבלו את הגל השקול. מה מתאר גל זה?

**(2) תרגיל - חישוב תדירויות ואורכי גל של גל א"מ**

אורך הגל של אור כתום הוא  $\lambda = 605 \text{ nm}$ .

א. כמה מחזורים של הגל ניתן להכניס לעובי של נייר ( $D = 0.08 \text{ mm}$ )?

ב. איזה מרחק יכסו אותו מספר מחזורים שמצאתם בסעיף א, אם מדובר בגלי מיקרו בעלי תדירות של  $f = 10^{10} \text{ Hz}$ ?

גלי מיקרו נעים במהירות האור,  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .

ג. מהי מהירות הקול בגוש ברזל, אם מתפשט בו גל בתדירות  $f = 5 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ , עם אורך גל של  $\lambda = 9 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ ?

**(3) תרגיל - סכום של  $N$  גלים עם הפרשי פאזה ומספרים מורכבים\*\***

נתבונן ב-  $N$  גלים מהצורה  $A \cos(kx - \omega t)$ , כאשר בין גל לגל הפרש פאזה  $\Delta\phi$ , כלומר הגל ה-  $n$  הינו  $A \cos(kx - \omega t + n\Delta\phi)$ .

א. הראו שסכום הגלים,  $\sum_{n=1}^N A \cos(kx - \omega t + n\Delta\phi)$ , שקול לגל יחיד עם אותם

ערכי  $\omega$  ו-  $k$ , ומצאו את האמפליטודה והפאזה שלו. היעזרו בכתוב מרוכב.

ב. עבור אילו ערכי  $\Delta\phi$  מתקבלת אמפליטודה מקסימלית ומינימלית?

**(4) תרגיל - סכום גלים עם הפרשי תדירויות**

נתונים  $N$  גלים התלויים בזמן כך שקיים הפרש תדירות קבוע בין כל שני גלים  $\delta\omega$ . כלומר הגל ה-  $n$  הוא מהצורה:  $A \cos(\omega_0 t + n\delta\omega t)$ .

א. השתמשו בתוצאה של התרגיל הקודם ומצאו את סכום הגלים מ-  $n = 0$  ועד  $n = N - 1$ .

ב. הראו שעבור  $N = 2$  מתקבלת התוצאה של חיבור שני גלים שראינו בסרטון ההרצאה.

## תשובות סופיות

$$(1) \text{ א. } A = 2m, \omega = 500 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}, f = 79.6 \text{ Hz}, k = 0.2 \frac{1}{m}, \lambda = 10\pi m, v = 2500 \frac{m}{s}$$

ב.  $-3.3 \sin(0.4x - 1000t)$ , גל סינוס עם פאזה של  $\pi$  בתדירות כפולה ואורך גל כפול ואמפליטודה של 3.3.

$$(2) \text{ א. } 130. \text{ ב. } \frac{3}{9} m. \text{ ג. } 4500 \frac{m}{s}$$

$$(3) \text{ א. אמפליטודה } \tilde{A} = A \frac{\sin\left(\frac{N\Delta\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)}; \text{ פאזה } \tilde{\phi} = \frac{N+1}{2} \Delta\phi$$

ב. האמפליטודה המקסימלית היא NA והיא מתקבלת כש-  $l = 0, 1, 2$   $\Delta\ell = 2\pi l$ .

האמפליטודה המינימלית היא אפס והיא מתקבלת עבור  $\Delta\phi = \frac{2\pi k}{N}$ ,

כאשר  $\frac{k}{N}$  לא שלם.

$$(4) \text{ א. } A \frac{\sin\left(N \frac{\delta\omega t}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\delta\omega t}{2}\right)} \cos\left(\omega_0 t + \frac{N-1}{2} \delta\omega t\right) \text{ ב. ראו בסרטון.}$$

# גלים 114086

פרק 5 - גלים רוחביים במיתר

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגולים ..... 24

## 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

$T$  – המתחיות 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)

$$\begin{aligned} \psi(x, t) &= A_1 \cos(kx - \omega t + \phi_1) + A_2 \cos(kx - \omega t + \phi_2) = \\ &= B_1 \cos kx \cos \omega t + B_2 \cos kx \sin \omega t + B_3 \sin kx \cos \omega t + B_4 \sin kx \sin \omega t = \\ &= C_1 \cos kx \cos(\omega t + \phi_1) + C_2 \sin kx \cos(\omega t + \phi_2) \end{aligned}$$

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.
- 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.
  - רשמו ביטוי לתאוצה של כל אלמנט מסה במיתר.
  - איפה נמצאים אלמנטי המסה במיתר בעלי התאוצה הגדולה ביותר (בערך מוחלט) בזמן  $t = 3\text{sec}$ ?
  - עבור אילו זמנים התאוצה של אלמנט המסה בנקודה  $x = 2\text{cm}$  היא הנמוכה ביותר (בערך מוחלט)?
  - 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

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

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

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

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

$$\text{ד. } t = 0.001_s - 2.5_s n$$

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

$$(4) \quad \text{א. } y(x, t) = (4x + 8t)^2 + (4x - 8t)^2 \quad \text{ב. } 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{ג. } 0.12\text{N} \quad \text{ד. לא.}$$

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

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

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



## 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  $\frac{\partial \Psi}{\partial t} \Big|_{t=0} = a \frac{x}{b} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^2}$ , 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

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

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

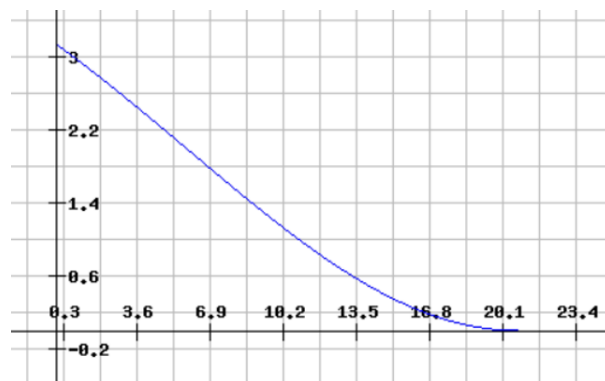
$$\text{ג.} \quad \psi(x, t) = 0.4 \sin(20x) \cos(40t) \quad \text{אין שינוי בפרמטרים של סעיף ב.}$$

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

$$(3) \quad \text{א.} \quad \psi(x, t) = 0.001 \sin(5(x - 120t)) + 0.001(x - 120t) + 0.001 \sin(5(x - 120t)) + 0.002(x - 120t) \quad \text{ב.} \quad 0.642 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$(4) \quad \text{א.} \quad \psi(x, t) = \begin{cases} 0 & t < \frac{x}{v} \\ b \left( 1 - e^{-\alpha \left( t - \frac{x}{v} \right)^2} \right) & t \geq \frac{x}{v} \end{cases} \quad \text{ב.} \quad 98.4 \frac{1}{\text{sec}^2}$$

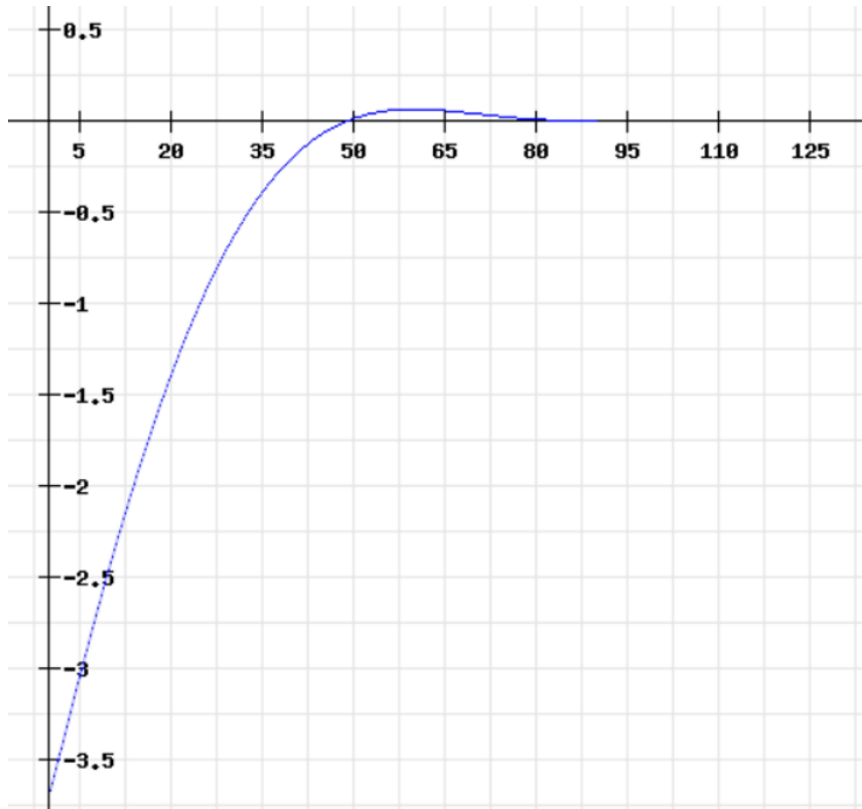
$$\text{ג.} \quad F(t) = \frac{2\alpha Tb}{v} t e^{-\alpha t^2} \quad \text{ד.} \quad \psi(x, 0.1) = 5 \text{ cm} \left( 1 - e^{-98.4 \left( 0.1 - \frac{x}{208} \right)^2} \right)$$



שרטוט:

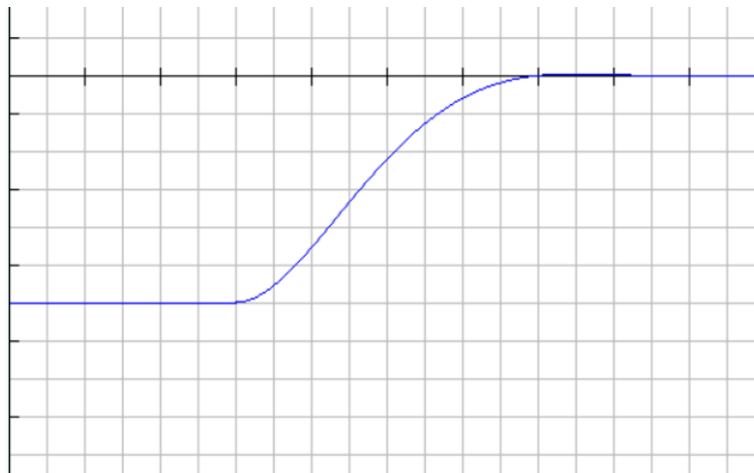
$$(5) \quad \text{א.} \quad \psi(x, t) = \frac{1}{9} \begin{cases} 0 & t - \frac{x}{30} \leq 0 \\ \frac{2}{5} \left( t - \frac{x}{30} \right)^5 - \frac{5}{2} \left( t - \frac{x}{30} \right)^4 + \frac{8}{3} \left( t - \frac{x}{30} \right)^3 & 0 \leq t - \frac{x}{30} < 4 \\ 1220 & t - \frac{x}{30} \geq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

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



שרטוט:

$$\psi(x, 6) = \frac{1}{9} \begin{cases} 0 & 180 \leq x \\ \frac{2}{5} \left(6 - \frac{x}{30}\right)^5 - \frac{5}{2} \left(6 - \frac{x}{30}\right)^4 + \frac{8}{3} \left(6 - \frac{x}{30}\right)^3 & 60 \leq x \leq 180 \end{cases}$$



שרטוט:

## החזרה והעברה

### רקע

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

$$1. \psi_L(0, t) = \psi_R(0, t) \quad \text{רציפות הפונקציה}$$

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

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

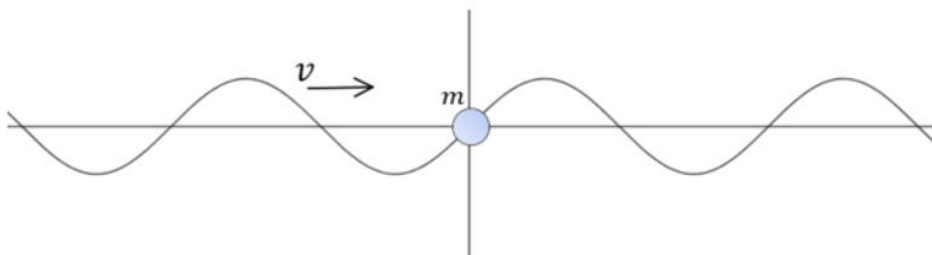
## (1) תרגיל – ביטול של הגל העובר או החוזר

- 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  $D, k'_2, \omega', \varphi$ , 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

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

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

$$k_2 = k_1', \quad w = w', \quad \phi = 0$$

$$|D| = \frac{2\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}} |A| \quad \text{ב. שמאלה:}$$

$$k_2 = k_1', \quad w = w', \quad \phi = \pi$$

$$|D| = \frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_2}}{2\sqrt{\rho_2}} |A| \quad \text{ימינה:}$$

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

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

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:

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

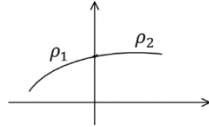
$$t = \frac{2z_1}{z_1 + z_2} \text{ מקדם העברה}$$

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

## 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. המתרחות 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

$$\begin{aligned}\psi_1(x, t) &= 3Ae^{i(k_1x - \omega t)} + Be^{-i(k_1x - \omega t)} \\ \psi_2(x, t) &= Ce^{i(k_2x - \omega t)} + Ae^{-i(k_2x - \omega t)}\end{aligned}\quad \text{א. (1)}$$

$3A$  – ימינה ;  $B$  – שמאלה ;  $C$  – ימינה ;  $A$  – שמאלה.

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

$$B = \frac{3z_1 - z_2}{z_1 + z_2} A \quad C = \frac{5z_1 + z_2}{z_1 + z_2} A \quad \text{ג.}$$

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

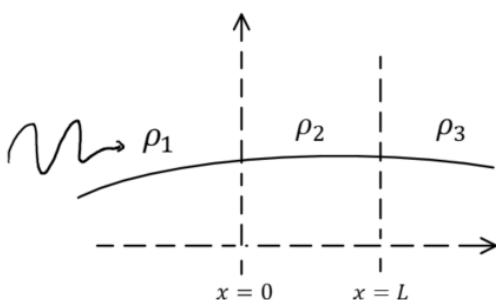
- גל סינוס נע ימינה במיתר מסוים בו מהירות הגל היא  $v_1$ .  
 צורת הגל היא  $\Psi_i(x, t) = 1.4 \text{ mm} \cdot \sin(kx - 200t)$ .  
 הגל מגיע לצומת בו צפיפות המיתר משתנה (המתיחות נשארת קבועה), כך  
 שבחלק הימני מהירות הגל היא  $v_2 = 5v_1$ .  
 בהינתן שההספק הממוצע של הגל הפוגע הוא  $60 \text{ W}$ ,  
 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) מיתר עם 3 חלקים

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

**(4) 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**

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

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

$$(2) \quad \text{א. } 0.5 \text{W} \quad \text{ב.1. לא ישתנה.} \quad \text{ב.2. לא ישתנה.} \quad \text{ב.3. יגדל פי } \sqrt{2}.$$

$$(3) \quad \text{א. } \psi_1(x, t) = Ae^{i(k_1x - \omega t)} + Be^{-i(k_1x + \omega t)} \quad \psi_2(x, t) = Ce^{i(k_2x - \omega t)} + De^{-i(k_2x + \omega t)}$$

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

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

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

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

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

ה. שכל האנרגיה של הגל הפוגע עוברת לגל העובר.

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

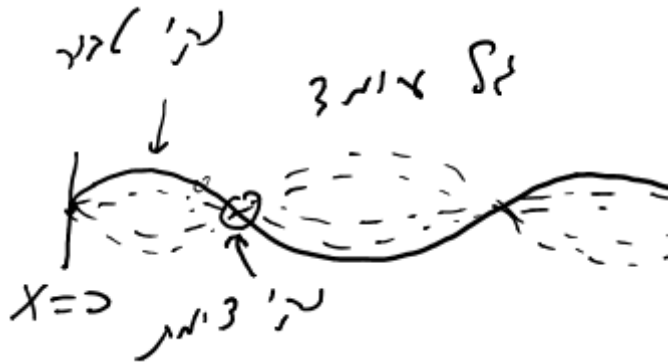
## גלים עומדים

## 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  $\rho = 4800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , היצרן ממליץ להפעיל את המיתר תחת לחץ (כוח ליחידת שטח חתך) של  $1.3 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ .

- הראו שמהירות הגלים במיתר אינה תלויה ברדיוס שלו, וחשבו אותה.
- מה צריך להיות אורך המיתר כדי שישמיע את הצליל 'לה', שתדירותו 440Hz? כמנגנים במיתר בד"כ שומעים את התדירות הבסיסית.
- 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.
- 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.
  - שרטטו את ארבעת הפתרונות הראשונים, והשוו את התוצאה למה שמתקבל כאשר פותרים את הבעיה עבור קיר שמאלי ב-  $x = 0$  וקיר ימני ב-  $x = L$ .
  - 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. מתוחות המיתר היא  $T$ .

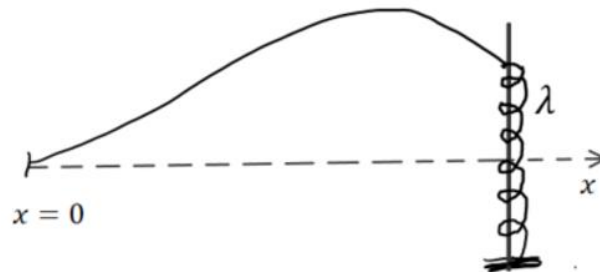
א. רשמו תנאי שפה למיתר והראו כי המשוואה ממנה ניתן למצא את

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

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.

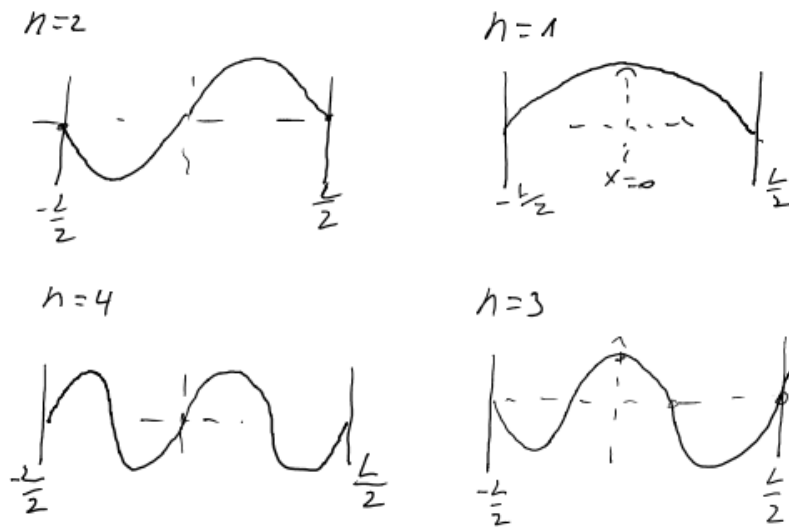


## תשובות סופיות

(1) הוכחה בסרטון.

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

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



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

(4) א.  $\psi(0, t) = \psi(L, t) = 0$  ב.  $\psi(x, 0) = 0$

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

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

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

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

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

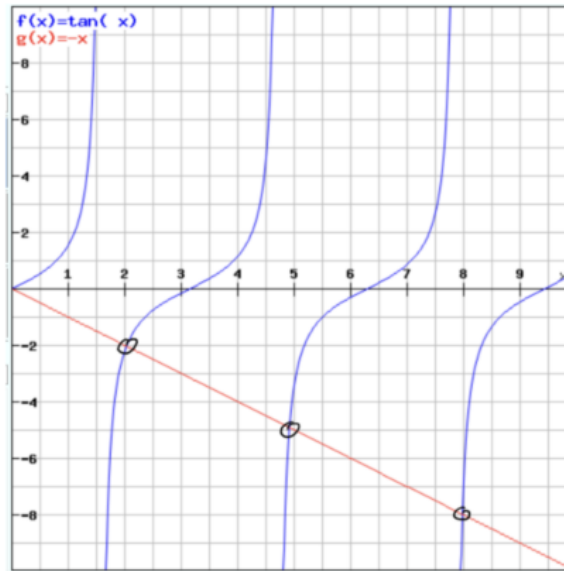
(7) א. הוכחה בסרטון. ג. הוכחה בסרטון. ד.  $\frac{2Ta^2}{l}$

ב.  $\psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(k_n x) \cos(\omega_n t), \omega_n = \sqrt{\frac{T}{\rho}} k_n, A_n = \frac{8a}{\pi^2 n^2} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right), k_2 = \frac{\pi n}{\ell}$

8 א. הוכחה בסרטון.

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

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



ג.

ד.

## פתרון באמצעות התמרת (טרנספורם) פורייה

רקע

$$\psi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{i(k(x+vt))} + B(k) e^{i(k(x-vt))} dk$$

$$A(k) = \frac{1}{2} \left( FT[\psi(x, 0)] + \frac{1}{ivk} FT[\dot{\psi}(x, t=0)] \right)$$

$$B(k) = \frac{1}{2} \left( FT[\psi(x, 0)] - \frac{1}{ivk} FT[\dot{\psi}(x, t=0)] \right)$$

## שאלות

## 1) תרגיל - תנאי התחלה הרמוניים

נתון מיתר אינסופי המקיים את משוואת הגלים. ברגע  $t = 0$  המערכת

מקיימת:  $\psi(x, 0) = a \cos(k_0 x)$  וכן  $\frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t)|_{t=0} = a \omega_0 \cos(k_0 x + \varphi)$  כאשר  $\omega_0 = vk_0$  ו- $a, k_0, v, \varphi$  קבועים נתונים.

א. מצאו את  $\psi(x, t)$  לכל  $t > 0$  באמצעות התמרת פורייה.

ב. כתבו את הפתרון במפורש עבור הערכים  $\varphi = -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}$ , והראו שבאחד

המקרים מתקבל גל שנע ימינה, ועבור המקרה השני מתקבל גל שנע שמאלה.

מה קורה עבור  $\varphi = 0$ ?

## תשובות סופיות

$$1) \text{ א. } \psi(x, t) = a [\cos(k_0 x) \cos(\omega_0 t) + \sin(\omega_0 t) \cos(k_0 x \phi)]$$

ב. עבור  $\phi = \frac{\pi}{2}$ ,  $\psi(x, t) = a \cos(k_0 x + \omega_0 t)$ , גל נע שמאלה,

עבור  $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $\psi(x, t) = a \cos(k_0 x - \omega_0 t)$ , גל נע ימינה,

עבור  $\phi = 0$ ,  $\psi(x, t) = a \cos(k_0 x) [\cos(\omega_0 t) + \sin(\omega_0 t)]$ , גל עומד.

# גלים 114086

פרק 6 - חבורת גלים ונפיצה (דיספרסיה)

תוכן העניינים

|    |                                  |
|----|----------------------------------|
| 49 | 1. יחס נפיצה כללי ומהירות החבורה |
| 51 | 2. התרחבות בזמן של פולס          |
| 53 | 3. גלים דועכים ותדירויות סף      |
| 54 | 4. מקרים מיוחדים                 |
| 56 | 5. תרגילים נוספים                |



## 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:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2, \text{ כאשר } \omega_p \text{ ו- } c \text{ קבועים.}$$

- 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**

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

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

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

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

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

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

## 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.

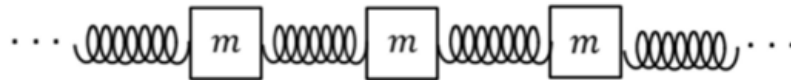
(2) כ-70 שניות לטונגה וכ-26 שעות לקליפורניה.

## 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 משוואת הגלים הבאה:  $\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi = 0$  (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:

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

# גלים 114086

פרק 7 - גלים אלקטרו-מגנטיים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 58

## 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

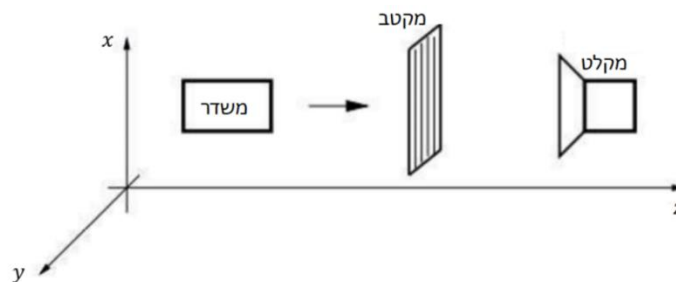
### רקע:

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:**

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

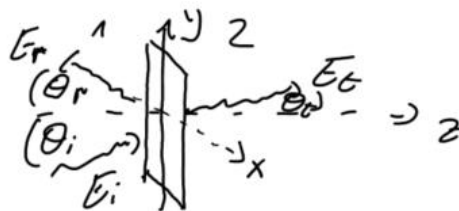
בפגיעה ישרה בתווך דיאלקטרי:

$$1 + \Gamma = \tau$$

## 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:

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

**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:

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

אם:  $\mu_2 \approx \mu_1$  אז:

$$\sin \theta_B^{\parallel} = \frac{1}{1 + \epsilon_i / \epsilon_t}$$

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

בקיטוב אנכי:

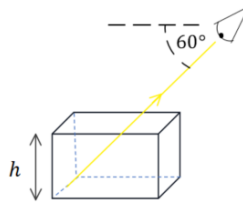
$$\sin^2 \theta_B^{\perp} = \frac{1 - \frac{\mu_i \epsilon_t}{\mu_t \epsilon_i}}{1 - \left( \mu_i / \mu_t \right)^2}$$

\* 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**

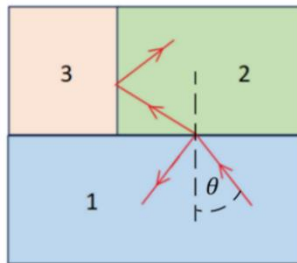
אור נכנס מחומר 1 ועובר שבירה במעבר לחומר 2 כך שחלקו מוחזר וחלקו מועבר, ראו איור. הקרן שהועברה ממשיכה עד לפגיעה בחומר 3 שם היא פוגעת בו בזווית הקריטית ומבצעת החזרה מלאה.

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:**

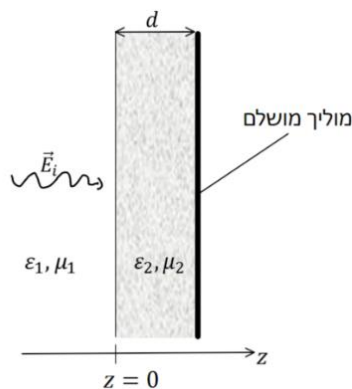
- (1) 1.4cm
- (2) תמונה א:  $n_1 > n_2 > n_3$ , תמונה ב:  $n_5 < n_3 = n_2 < n_1 < n_4$
- (3) א.  $\theta_B = 84^\circ$  ב.  $\theta_t = 6.4^\circ$
- ג.  $\tau^\perp = 0.025, \Gamma^\perp = -0.975$
- (4) א.  $\theta \approx 27.5^\circ$  ב. צריך להגדיל את טטה. ג. האור ייכנס.
- (5) א.  $E_0 \cos(20^\circ)$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

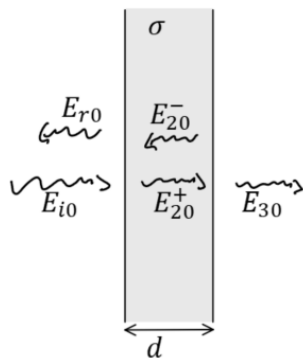
מישורית בעובי  $d$  השווה לעומק החדירה.

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.

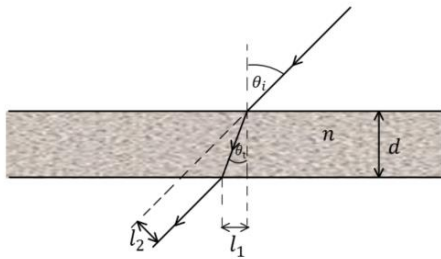
רשמו ביטוי ל-  $\vec{H}$ .

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:

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

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

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-  $\lambda$ .

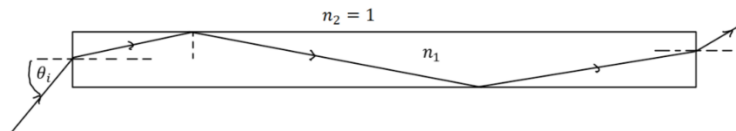
על איזה מהלייזרים תמליצו לרועי להשתמש?

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

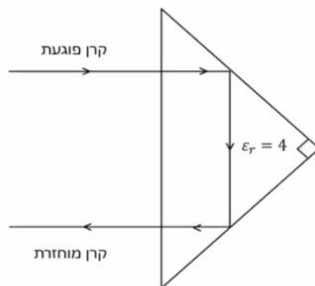


**(7) גל א"מ לא יוצא מסיב אופטי**

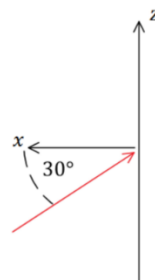
סיב אופטי ישר עשוי מחומר דיאלקטרי שקוף בעל אינדקס שבירה  $n_1$ . גל אלקטרו מגנטי נכנס בצידו האחד של הסיב בזווית  $\theta_i$  ופוגע בדפנות של הסיב במהלך ההתקדמות. מהו  $n_1$  המינימלי כך שהגל לא יצא מהסיב עד אשר יגיע לקצה השני ללא תלות בזווית הפגיעה  $\theta_i$ .

**(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:

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

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

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

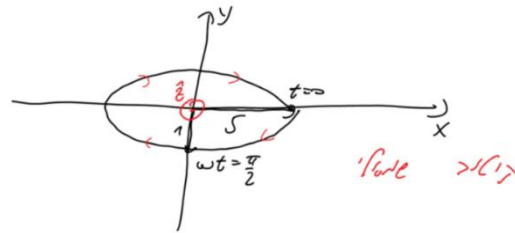
$$(2) \quad \text{א. } \frac{E_{r0}}{E_{i0}} \approx -1 + 4.67 \cdot 10^{-6} i, \quad \frac{E_{20}^+}{E_{i0}} \approx (1.90 + 0.140i) \cdot 10^{-6}, \quad \frac{E_{20}^-}{E_{i0}} \approx (-2.49 + 4.53i) \cdot 10^{-6}.$$

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

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

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

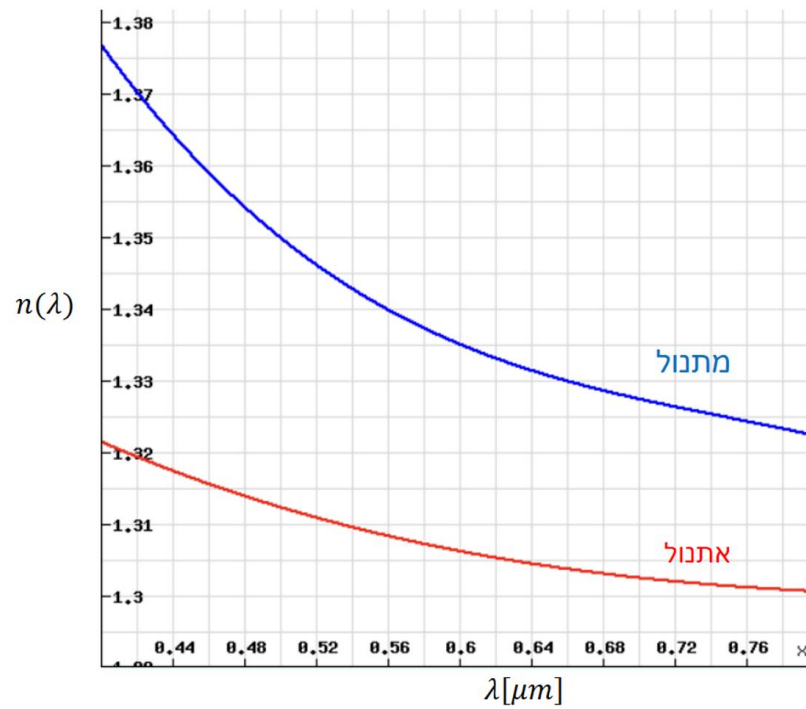
(4) שרטוט:



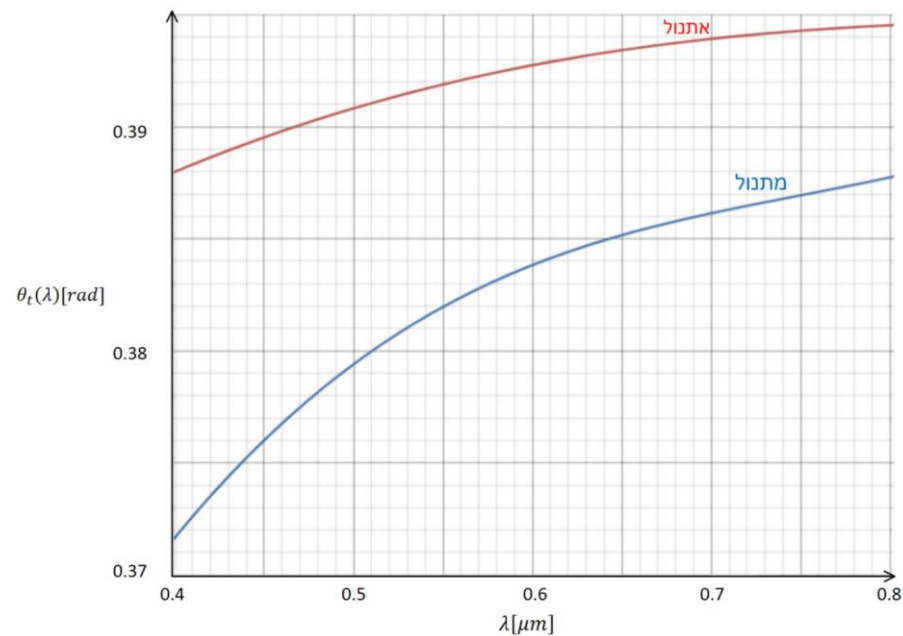
$$(5) \quad \text{א. } \sin \theta_t = \frac{1}{n} \sin \theta_i \quad \text{ב. } l_1 = \frac{d \sin \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}.$$

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

(6) א. שרטוט:



ב. בלייזר של ה-532 ננומטר.



ג. אתנול – 4.83cm , מתנול - 4.96cm.

(7)  $\sqrt{2}$ .

(8) 79%.

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

# גלים 114086

פרק 10 - התאבכות בגלים דו ותלת מימדיים

תוכן העניינים

|    |                        |
|----|------------------------|
| 76 | 1. התאבכות בשני סדקים  |
| 78 | 2. התאבכות ב N סדקים   |
| 82 | 3. עקיפה               |
| 83 | 4. הקשר לפורייה        |
| 85 | 5. התאבכות ועקיפה ביחד |
| 86 | 6. אינטרפרומטריה       |
| 91 | 7. תרגילים נוספים      |

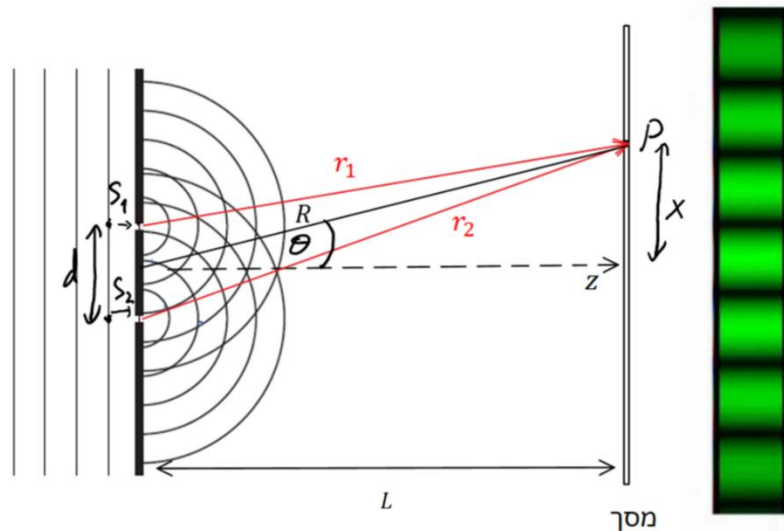
## התאבכות בשני סדקים

### רקע

**עיקרון הווייגנס** - ניתן להתייחס לכל נקודה בחזית הגל כמקור נקודתי של גל חדש.

אמפליטודה בגלים גליליים -  $A \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$  , גלים כדוריים -  $A \propto \frac{1}{r}$ .

**ניסוי שני הסדקים:**



קירוב השדה הרחוק  $L \gg d$  far field limit :

$$1. \quad A_1 \approx A_2 \leftarrow \Delta r \ll r$$

$$2. \quad \Delta r = d \sin \theta \leftarrow r_1 \parallel r_2$$

העוצמה היחסית :

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \cos^2 \left( \frac{k d \sin \theta}{2} \right)$$

קירוב זוויות קטנות :

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \frac{x}{L}$$

בגלל התלות של האמפליטודה במרחק, צריך להכפיל את התוצאה לעוצמה בקוסינוס טטה עבור גלים גליליים ובקוסינוס בריבוע עבור גלים כדוריים. התוספת הזו קשורה למבנה של המסך והיא לא תופיע במסך עגול. בדרכ מניחים קירוב זוויות קטנות ואז היא זניחה.

## שאלות

- (1) חישוב מרחק בין כתמים ואורך גל  
קרן לייזר עוברת דרך שני סדקים. מרכזו של כתם האור הראשון  
(לצד כתם האור המרכזי), התקבל בזווית של 8 מעלות.  
א. באיזו זווית יופיע כתם האור השני?  
ב. מהו אורך הגל של הלייזר אם המרחק בין הסדרים הוא:  $d = 2.4\mu m$ ?

## (2) תחנת רדיו

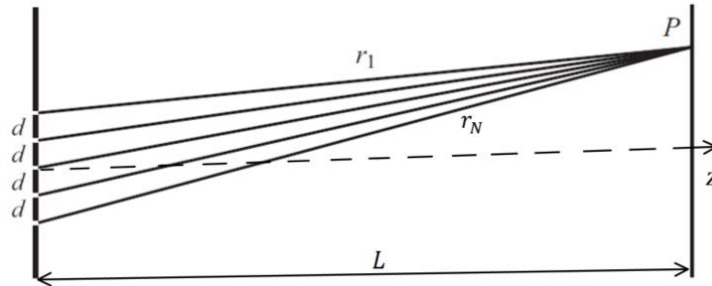
תחנת שידור משדרת אותות רדיו בתדר  $1200Hz$  באמצעות שתי אנטנות  
הנמצאות במרחק של  $300m$  זו מזו. אם נמקם מקלט במרחק רב משתי  
האנטנות, באילו כיוונים תתקבל העוצמה הגבוהה ביותר ובאילו הנמוכה  
ביותר? רשמו את הכיוונים ביחס לישר המחבר בין שתי האנטנות.

## תשובות סופיות

- (1) א.  $16^\circ$  ב.  $0.33\mu m$   
(2)  $\cos \alpha_{\min} = 9.5 \cdot 10^{-4} \left( n + \frac{1}{2} \right)$ ,  $\cos \alpha_{\max} = 9.5 \cdot 10^{-4} n$

## התאבכות ב N סדקים

### רקע



קירוב השדה הרחוק:

$$A_1 \approx A_2 \approx A_3 \approx A_4 \leftarrow \Delta r \ll r$$

$$\Delta r = d \sin \theta \leftarrow r_1 \parallel r_2 \parallel r_3 \parallel r_4$$

$$\frac{I_{tot}(\alpha)}{I_{tot}(0)} \approx \left( \frac{\sin\left(\frac{N\alpha}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)^2$$

$$\alpha = kd \sin \theta$$

פיק גדול - כשהמכנה מתאפס:

$$\alpha_n = 2\pi n$$

נקודות התאפסות - כשהמונה מתאפס והמכנה לא.

$$\alpha_n = \frac{2\pi n}{N} \quad n \neq mN$$

פיק קטן - נגזרת שווה לאפס ומכנה לא מתאפס. עבור  $N \gg 1$ :

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{N} \left( n + \frac{1}{2} \right)$$

מספר הפיקים באחד הצדדים (ללא הפיק המרכזי) הוא:  $\frac{kd}{2\pi}$  (לעגל למטה).

מספר הפיקים (הגדולים) הכולל שווה למספר הפיקים באחד הצדדים כפול 2 ועוד 1.



## שאלות

**(1) פריזמה מתקליטור**

בתמונה רואים תקליטור העשוי מחריצים מעגליים בגודל של מיקרון בערך. האור שפוגע בתקליטור מוחזר למצלמה ומקבלים פריזמה של צבעים. הסבירו את התופעה (ללא חישוב) וציינו אלו פרמטרים משפיעים עליה.

**(2) סטייה בזווית פגיעה**

הראו שבמקרה שהקרן הפוגעת היא בזווית  $\theta_0$  ביחס לאנך עם קיר הסדקים אז תתקבל אותה תבנית התאבכות מוזזת בזווית  $\theta_0$ . הניחו קירוב זוויות קטנות.

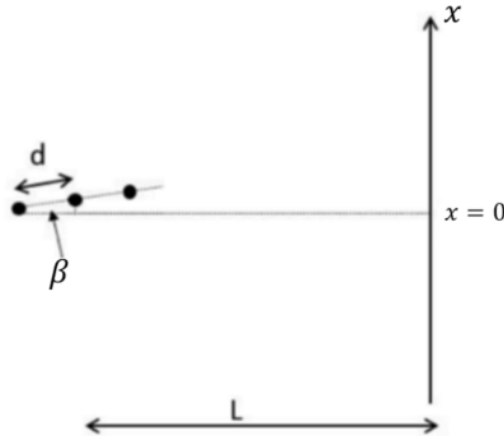
**(3) 3 מינימות ראשונות**

אור מונוכרומטי מלייזר ארגון בעל אורך גל של  $\lambda = 488nm$  עובר דרך סריג בעל 6,000 חריצים בצפיפות של 40,000 חריצים לס"מ ופוגע במסך. מהן הזוויות של שלושת נקודות המינימום הראשונות (בכיוון החיובי). הניחו שהחריצים נקודתיים.

**(4) מרחק בין צבעים**

מקרינים אור לבן על סריג בעל 5,000 סדקים לס"מ.  
א. תארו מה נראה על המסך מול הסריג.  
ב. חשבו את המרחק בין כתם האור האדום השני לכתם האור הכחול השני אם המסך נמצא במרחק 1.5 מטר מהסריג ואורכי הגל של האור האדום והכחול הם  $632nm$  ו- $420nm$  בהתאמה.

- (5) שלושה מקורות קוהרנטיים באוריינטציה שונה  
המערכת המתוארת בסרטוט מכילה שלושה מקורות קוהרנטיים במרחק  $d$   
אחד מהשני הנמצאים בזווית  $\beta$  ביחס לאנך למסך. המרחק למסך הוא  $L$ .



מצאו את העוצמה היחסית כתלות ב-  $x$  בהנחה כי  $\beta$  זווית קטנה וכי  $\theta > \beta$ .

## תשובות סופיות

(1) החריצים בתקליטור יוצרים תבנית התאבכות התלויה באורך הגל, זווית הפגיעה של המקור, בזווית התקליטור ובמיקום הצופה. בכל אזור בתקליטור נוצרת התאבכות בונה עבור אורך גל אחר ולכן רואים את הצבעים השונים בכל אזור. שינוי של הפרמטרים הנ"ל יביא לשינוי התבנית.

(2) ראו סרטון.

$$\theta_1 \approx 0.0186^\circ$$

$$\theta_2 \approx 0.0373^\circ \quad (3)$$

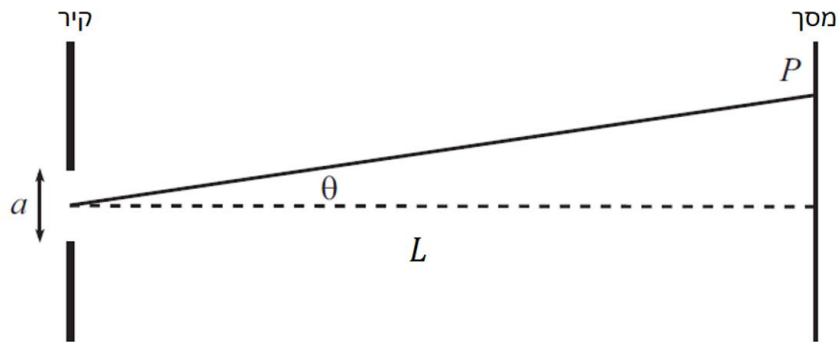
$$\theta_3 \approx 0.0560^\circ$$

(4) א. נקבל תבנית התאבכות של N סדקים שכתם האור המרכזי שלה לבן ובמקום כל כתם אחר נקבל קשת של צבעים כי מיקום הפיק הגדול שאינו במרכז גדל עם אורך הגל.  
ב. 70 ס"מ.

$$\alpha = kd \frac{L}{\sqrt{L^2 + x^2}} \left[ 1 + \beta \frac{x}{L} \right], \quad \frac{I(\alpha)}{I(0)} = \left( \frac{\sin\left(\frac{3}{2}\alpha\right)}{3\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)^2 \quad (5)$$

## עקיפה

## רקע



קירוב השדה הרחוק  $L \gg a$  :

$$\frac{I(\beta)}{I(0)} = \left( \frac{\sin\left(\frac{1}{2}\beta\right)}{\frac{1}{2}\beta} \right)^2$$

$$\beta = ka \sin \theta$$

נק' התאפסות:  $\beta_n = 2\pi n$

- אם  $\lambda > a$  אז רוחב הפיק המרכזי גדול מאינסוף ולא יהיו נק' התאפסות וזה אומר שהסדר מתנהג כמו מקור אור נקודתי.
- אם  $a \gg \lambda$  אז מקבלים עוצמה קבועה ברוחב הסדק, מתאים למקרה הקלאסי בו מניחים שהאור נע בקווים ישרים.

מקסימום מקומי - נגזרת מתאפסת :

$$\beta_n \approx 2\pi \left( n + \frac{1}{2} \right)$$

## הקשר לפורייה

### רקע

האמפליטודה הכוללת על המסך כתלות בזווית:

$$A_{tot}(\theta) = 2\pi FT[B(x)](k')$$

$$k' = k \sin \theta$$

כאשר  $B(x)$  היא האמפליטודה ליחידת אורך בסדק.

### שאלות

#### 1) לאן נעלם שימור האנרגיה?

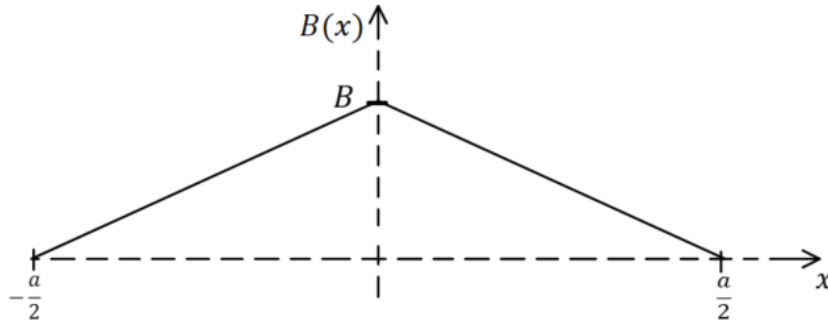
- א. הראו כי בסדק רחב:  $I(0) \propto a^2$  כאשר  $a$  הוא רוחב הסדק.  
 רמז: שימו לב שהאמפליטודה בחלק מהנוסחאות תלויה ברוחב הסדק.  
 ב. העוצמה היא אנרגיה ליחידת שטח ליחידת זמן. אם נרחיב את רוחב הסדק פי 2 אז  $I(0)$  תגדל פי 4. הרחבת הפתח פי 2 מכניסה פי 2 אור ופי 2 אנרגיה איך יתכן שהעוצמה על המסך גדלה פי 4?  
 לאן נעלם שימור האנרגיה?

#### 2) שינוי בעוצמה כתלות בשינוי הפתח

- נניח שיש לנו סדק ברוחב  $a$  ואנחנו מסתכלים על העוצמה הממוצעת בנקודה הנמצאת במרחק כלשהו, לא קטן, מהפיק המרכזי אבל עדיין בתחום הזוויות הקטנות.  
 מה יקרה לעוצמה הממוצעת (ממוצעת בתחום קטן) אם נגדיל את רוחב הפתח?  
 שימו לב שמצד אחד כשמגדילים את רוחב הפתח אז יותר אור נכנס והעוצמה גדלה אבל מצד שני העקומה מתכווצת והעוצמה בנקודה מסוימת קטנה.  
 השאלה היא איזה אפקט יותר חזק?

**(3) אמפליטודה בצורת משולש**

נתון סדק ברוחב  $a$  דרכו עובר גל בעל חזית (פאזה) אחידה אך בעל אמפליטודה לא אחידה. האמפליטודה ליחידת אורך כתלות ב-  $x$  כאשר:  $x = 0$  זה מרכז הסדק היא:



מצאו את תבנית ההתאבכות  $\left( \frac{I(\theta)}{I(0)} \right)$  המתקבלת על מסך הנמצא במרחק רב מהסדק.

**תשובות סופיות**

- 1) א. הוכחה בסרטון.  
ב. אם מגדילים את רוחב הסדק אז העוצמה באפס גדלה אבל התבנית מתכווצת והעוצמה קטנה בזוויות אחרות. האנרגיה שווה לאינטגרל על העוצמה לאורך כל המסך והערך של האנרגיה הכוללת יגדל רק פי 2 ולא פי 4.  
2) העוצמה לא תשתנה.

$$\frac{I(\theta)}{I_{\max}} = \sin^4 c^4 \left( \frac{1}{4} ka \sin \theta \right) \quad (3)$$

## התאבכות ועקיפה ביחד

רקע

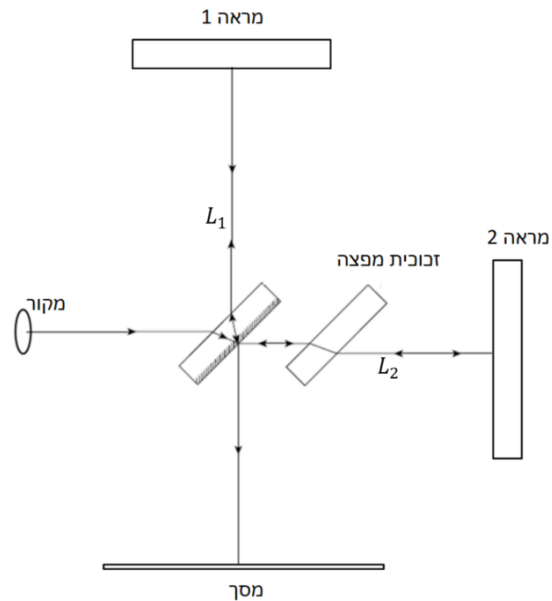
$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \left( \sin c \left( \frac{ka \sin \theta}{2} \right) \frac{\sin \left( \frac{Nkd \sin \theta}{2} \right)}{N \sin \left( \frac{kd \sin \theta}{2} \right)} \right)^2$$

כאשר  $a$  הוא רוחב כל סדק,  $d$  המרחק בין שני סדקים ו-  $N$  מספר הסדקים.

## אינטרפרומטריה

### רקע

#### האינטרפרומטר של מייקלסון:



$$\delta = 2(L_2 - L_1)$$

$$\Delta\varphi = k\delta + \pi$$

התאבכות בונה :

$$\delta = \lambda \left( m + \frac{1}{2} \right)$$

התאבכות הורסת :

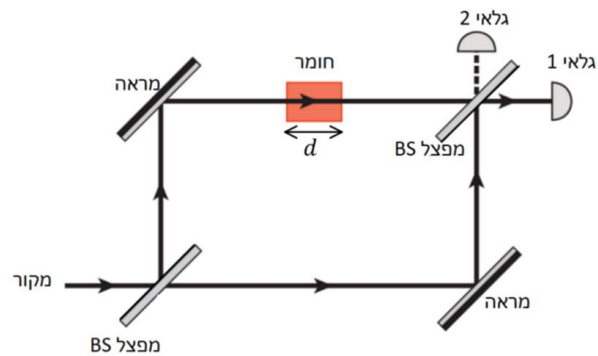
$$\delta = \lambda m$$

עוצמה :

$$\frac{I}{I_{\max}} = \cos^2 \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) = \sin^2 \left( \frac{\pi\delta}{\lambda} \right)$$



## אינטרפרומטר מאך-זנדר:



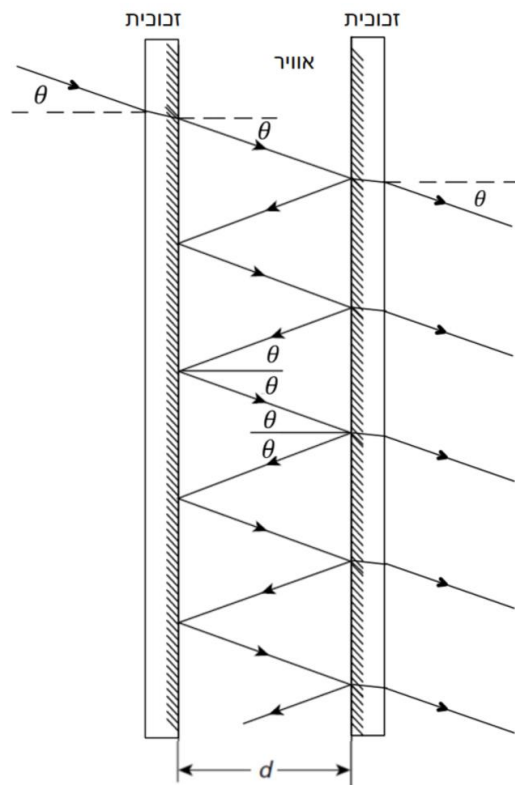
$$\delta = d(n - 1)$$

$$\Delta\varphi = k\delta \quad \text{גלאי 1}$$

$$\Delta\varphi = k\delta + \pi \quad \text{גלאי 2}$$

$$\frac{I}{I_{max}} = \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad \text{עוצמה}$$

## אינטרפרומטר פברי-פרו:



$$\frac{I}{I_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)}$$

$$\Delta\varphi = k\delta = k2d \cos \theta$$

$$R = r^2 = \left(\frac{A_r}{A_i}\right)^2$$

$$\Delta\varphi_{\frac{1}{2}} \approx \frac{1-R}{\sqrt{R}}$$

## שאלות

**(1) ללא פלטה מפצה**

נתון אינטרפרומטר מייקלסון עם מפצל (50:50) העשוי מזכוכית בעובי  $t$  ומקדם שבירה  $n_2$ . זווית המפצל היא 45 מעלות, ציפוי הכסף נמצא בדופן האחורית של הזכוכית (כמו במקרה הרגיל) ובמערכת **אין פלטה מפצה**.

א. מהו הפרש הדרכים האופטיות בין הקרניים?

ומהו הפרש הפאזה עבור אורך גל נתון?

ניתן להניח ששינוי הזווית עקב מעברי התווך במפצל זניח מבחינת

אורך הדרך וכי  $L_1, L_2$  גם נתונים.

ב. הניחו שניתן למדוד את העוצמה על המסך.

הראו כי:

$$\lambda = \frac{2\pi (L_2 - L_1 - \sqrt{2}t(1 - n_2))}{\sin^{-1} \left( \sqrt{\frac{I}{I_{max}}} \right)}$$

ג. כעת הניחו שהופכים את המפצל כך שציפוי הכסף (ופיצול הקרניים)

יהיה בדופן הקדמית של הזכוכית.

מה יהיה כעת הפרש הפאזה?

**(2) גלאי 2**

נתון אינטרפרומטר של מאך-זנדר כפי שנראה בסרטון ההסבר.

א. חשבו את הדרך האופטית והפאזה של כל קרן המגיעה לגלאי 2.

ב. חשבו את העוצמה בגלאי 2 והראו כי מתייחס שימור אנרגיה

(ביחיד עם העוצמה בגלאי 1).

**(3) מפצל לא סימטרי**

נניח כי המפצל באינטרפרומטר מאך זנדר הוא מפצל לא סימטרי כך שמקדם

ההעברה שלו  $\left( \left| \frac{A_t}{A_{in}} \right| \right)$  הוא  $t$  ומקדם ההחזרה  $\left( \left| \frac{A_r}{A_{in}} \right| \right)$  הוא  $r$ .

א. רשמו את האמפליטודות של כל אחד מהמסלולים האפשריים ביחס

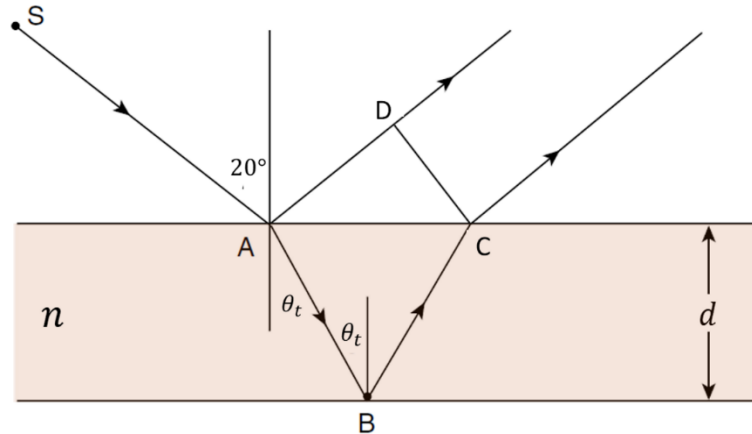
לאמפליטודת הכניסה.

ב. \* רשמו מטריצה כללית המתארת את המפצל. כולל תוספת הפאזה אך

ללא התוספת של הדרכים האופטיות.

**(4) חישוב עובי קרום דק**

גל מישורי לבן פוגע בקרום דק בזווית  $20^\circ$  מעלות. בצפייה של הגל המוחזר רואים אור אדום ( $\lambda = 640\text{nm}$ ). מקדם השבירה של הקרום הוא  $n = 1.3$ . מהו עובי הקרום? הניחו התאבכות בסדר ראשון.

**(5) טווחים של מספר גל**

נתון אינטרפרומטר של פברי-פרו שבו  $R = 0.95$  ו-  $d = 0.2\text{mm}$  וזווית הפגיעה קטנה מאוד.

- א. מה הם אורכי הגל  $\lambda_m$  בהם מתקבלים הפיקים?  
מהם הערכים  $k_m$  המתאימים?  
מה המרחק בין הפיקים במונחי  $k$ , כלומר מהו  $\Delta k$  בין שני פיקים?
- ב. מהו רוחב הפונקציה (FWHM) כתלות ב-  $k$ ?  
ומהו הרוחב כתלות בתדר?
- ג. נתונה דוגמית שערך הרזוננס שלה הוא בטווח של:  
 $k_r \in [10^3\text{cm}^{-1}, 1.15 \cdot 10^3\text{cm}^{-1}]$   
מהו  $N$  עבורו ערך הרזוננס נמצא בטווח של:  $k_r \in [k_N, k_{N+1}]$ ?
- ד. בשביל לסרוק את  $k$  אנחנו צריכים לשנות את  $d$ .  
בכמה צריך לשנות את  $d$  בשביל לסרוק את הטווח של:  $k_r \in [k_N, k_{N+1}]$ ?

## תשובות סופיות

$$(1) \quad \delta = 2(L_2 - L_1 - \sqrt{2}t(1 - n_2)) \quad \text{א.} \quad \Delta\varphi = 2k(L_2 - L_1) \quad \text{ג.} \quad \text{ב. הוכחה.}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta + \pi$$

$$(2) \quad \text{א. מסלול 3: החזרה במפצל 1 והחזרה במפצל 2 (כניסה לגלאי 2).}$$

$$\text{דרך אופטית - } L_1 + d(n-1) + 2c$$

$$\varphi_3 = k(L_1 + d(n-1) + 2c) + \pi$$

כאשר  $c$  הוא הדרך האופטית במפצל.

$$\text{מסלול 4: העברה במפצל 1 והעברה במפצל 2 (כניסה לגלאי 2).}$$

$$\text{דרך אופטית - } L_2 + 2c$$

$$\varphi_4 = k(L_2 + 2c)$$

$$\text{ב.} \quad \frac{I}{I_{\max}} = \sin^2\left(\frac{k\delta}{2}\right)$$

$$\delta = L_1 - L_2 + d(n-1)$$

$$(3) \quad \text{א.} \quad |A_1| = trE_0, |A_2| = rtE_0, |A_3| = r^2E_0, |A_4| = t^2E_0, \quad \text{ב.} \quad \begin{pmatrix} t & -r \\ r & t \end{pmatrix}$$

$$128\text{mm} \quad (4)$$

$$(5) \quad \text{א.} \quad \lambda_m = \frac{2d}{m}, \quad k_m = \frac{\pi m}{d}, \quad \Delta k = \frac{\pi}{d}$$

$$\text{ב.} \quad \text{FWHM}_{[K]} = 512 \cdot \frac{1}{m}, \quad \text{FWHM}_{[F]} = 2.44 \cdot 10^{10\text{Hz}}$$

$$\text{ג.} \quad N = 6$$

$$\text{ד.} \quad \Delta d = 28\mu\text{m}$$

## תרגילים נוספים

## שאלות

## 1) שני סדקים ברוחב לא זניח

נתונים שני סדקים בעלי רוחב  $a$  (שאינו זניח) במרחק  $d$  אחד מהשני ובמרחק  $L$  מהמסך. הניחו קירוב שדה רחוק וזוויות קטנות.

א. כתבו את הנוסחה המתארת את העוצמה כתלות במרחק ממרכז המסך ביחס לעוצמה המקסימלית. ציינו איזה חלק מהעוצמה הוא פונקציית המעטפת וממה הוא נובע, ואיזה חלק הוא הפונקציה הפנימית (פונקציית המודולציה) וממה הוא נובע.

ב. מהו רוחב פונקציית המעטפת (FWHM) אם נתון שרוחב פונקציית

$$\sin^2(x) \text{ הוא } 2.8 \text{ rad?}$$

ג. כמה מחזורים של הפונקציה הפנימית נכנסים ברוחב פונקציית המעטפת?

ד. על מנת שנוכל להבחין בהתאבכות של שני הסדקים צריך שיהיו לפחות שני פיקים של הפונקציה הפנימית בתוך הרוחב של פונקציית המעטפת, אחרת נראה רק את פונקציית המעטפת. מה התנאי על  $a$  ו- $d$  כך שנוכל להבחין בהתאבכות הסדקים.

## 2) שני סדקים עם קיטובים שונים

בניסוי שני הסדקים מסוים הקיטוב של השדה היוצא מכל סדק שונה ונתון

$$\vec{E}_1 = E_0 \hat{x} \text{ ו- } \vec{E}_2 = E_0 (\cos \varphi \hat{x} + \sin \varphi \hat{y})$$

הניחו שהמרחק בין הסדקים הוא  $d$  והמרחק למסך הוא  $L$  ו- $L \gg d$ .

א. מה תהיה האמפליטודה של כל אחד מן השדות בפגיעה במרכז המסך? הניחו שהגלים גלילים.

ב. מצאו את השדה השקול והעוצמה במרכז המסך כתלות ב- $\varphi$ .

הסבירו את התוצאות המתקבלות עבור:  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  ו- $\varphi = \pi$ .

## תשובות סופיות

$$(1) \quad \frac{I(x)}{I(0)} = \sin^2 \left( \frac{kax}{2L} \right) \cos^2 \left( \frac{kd}{2L} x \right) \quad \text{א.}$$

פונקציית המעטפת היא ה- $\sin c$  בריבוע והיא נובעת מרוחב הסדקים. הפונקציה הפנימית היא הקוסינוס בריבוע והיא נובעת מההתאבכות בין הסדקים.

$$\text{ב.} \quad \frac{L}{ka} 5.6 \quad \text{ג.} \quad 0.89 \frac{d}{a} \quad \text{ד.} \quad d \approx 2.24a$$

$$(2) \quad \text{א.} \quad A_1 = A_2 = \frac{E_0}{\sqrt{L}}$$

$$\text{ב.} \quad E_{tot} = ((1 + \cos \varphi) \hat{x} + \sin \varphi \hat{y}) \quad , \quad I \propto \frac{E_0^2}{L} 4 \cos^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right)$$

ב- $\varphi = 0$  התאבכות מלאה כי השדות באותו קיטוב  
 ב- $\varphi = \frac{\pi}{2}$  השדות מאונכים אין התאבכות, העוצמה הכוללת היא סכום העוצמות.  
 ב- $\varphi = \pi$  השדות בפאזה הפוכה, התאבכות הורסת, עוצמה אפס.