

גלים



תוכן העניינים

1	1. גלים
18	2. גלים אלקטרו-מגנטיים

גלים

פרק 1 - גלים

תוכן העניינים

1. גלים והתאבכות גלים.....1

גלים והתאבכות גלים:

שאלות:

(1) תרגול גל 1

פולס נע ימינה בחבל.



מתוארת צורתו בשני זמנים שונים: $t = 0$, $t = 2 \text{ sec}$.

א. מה משרעת הפולס?

ב. מה מהירות התקדמותו?

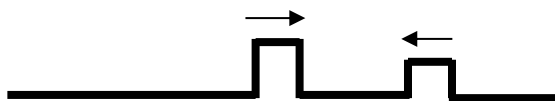
ג. מה כיוון תנועת החלקיק בחבל שנמצא בנקודה A ברגע $t = 0$?

ד. מה כיוון תנועת החלקיק בחבל שנמצא בנקודה B ברגע זה?

(2) תרגול גל 2

מציירים בחבל שתי הפרעות כמתואר בתרשים: $v = 10 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$.

שרטט את החבל בזמנים הבאים:



א. $t = 8 \text{ sec}$

ב. $t = 16 \text{ sec}$

ג. $t = 18 \text{ sec}$

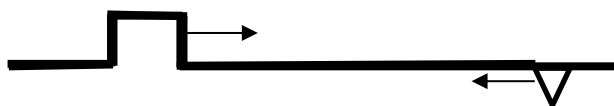
ד. $t = 22 \text{ sec}$

(3) תרגול גל 3

בחבל מייצרים שתי הפרעות שונות בשני קצותיו שמתקדמות אחת לקראת

השנייה, כמתואר בתרשים: $v = 0.5 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$.

שרטט את צורת החבל בזמנים הבאים:



א. $t = 8 \text{ sec}$

ב. $t = 12 \text{ sec}$

ג. $t = 13 \text{ sec}$

ד. $t = 16 \text{ sec}$

(4) תרגול גל 4

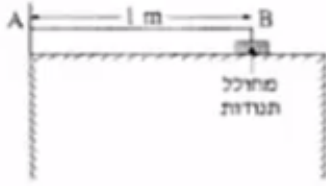
פולס משולש נע בחבל ומגיע לקצהו. שרטט את החבל + הפולס במקרים הבאים:

א. קצה החבל קשור לקיר.

ב. קצה החבל מולבש על טבעת חופשיה למנוע על פני ציר שעובר דרכה.

ג. קצה החבל קשור לחבל כבד יותר.

ד. קצה החבל קשור לחבל קל יותר.

5) תרגול גל עומד


חוט AB, שאורכו 1m, קשור בקצהו B למחולל תנודות, ובקצהו A למוט קבוע (ראה תרשים).
 כאשר תלמיד מפעיל את מחולל התנודות, נוצר בחוט AB גל, שמוחזר מהקצה A.
 התלמיד מגדיל ברציפות את תדירות מחולל התנודות ורושם את התדירויות בכל פעם שנוצר בחוט AB גל עומד. תוצאות הניסוי רשומות בטבלה שלפניך:

$\frac{1}{\lambda} (\text{m}^{-1})$	$\lambda (\text{m})$	צורת הגל העומד	f - תדירות התנודות (Hz)
			24
			45
			67
			88

התייחס לנקודה B כנקודת צומת.

א. העתק את הטבלה למחברתך, ורשום בעמודה את אורך הגל λ , לכל אחד מארבעת הגלים העומדים שנוצרו בחוט?

ב. רשום בעמודה המתאימה בטבלה את הערך $\frac{1}{\lambda}$ לכל אחד מארבעת הגלים,

וסרטט גרף של התדירות f כפונקציה של $\frac{1}{\lambda}$.

ג. מצא בעזרת הגרף את מהירות התפשטותו של גל בחוט AB.

ד. התלמיד ממשיך להגדיל את תדירות מחולל התנודות.

מהי התדירות הראשונה (הגבוהה מ-88Hz) שייווצר בה גל עומד בחוט AB? נמק.

6) תרגול גל מחזורי 1

מופיעים לפניכם גרפי העתק זמן והעתק מקום של חבל מסוים.

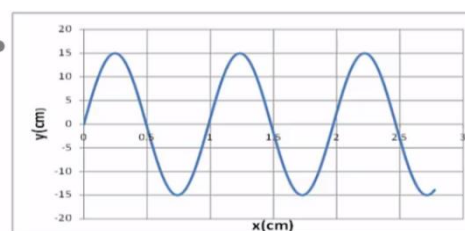
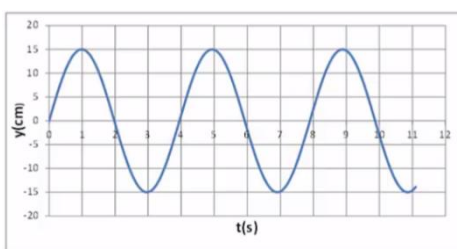
א. מהי משרעת הגל?

ב. מהו אורך הגל המתקדם בחבל?

ג. מה זמן המחזור של הגל?

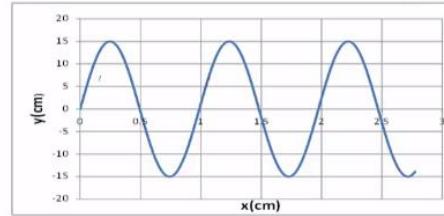
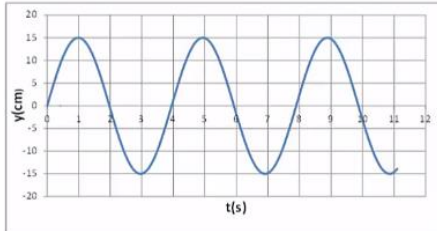
ד. מה מהירות הגל?

ה. לאיזה נקודה/נקודות בחבל יכול להתאים גרף ההעתק זמן (השמאלי)?



7) תרגול גל מחזורי 2

לפניכם גרף העתק-מקום והעתק-זמן של הגוף מהשאלה הקודמת.
מכפילים את תדירות מחולל הגלים (מקור).
שרטטו את גרף העתק-זמן והעתק-מקום החדשים.

**8) תרגול גל מחזורי 3**

- לפניך שני תצלומים (נראים זהים). הימני : גל מתקדם, השמאלי : גל עומד בקהל.
- קבע את אורך הגל של כל אחד מהגלים בחבל.
 - שרטט את החבל $\frac{1}{4}$ זמן מחזור לאחר תצלום זה.
 - שרטט את החבל $\frac{1}{2}$ זמן מחזור לאחר תצלום זה.
 - בחר בכל תצלום נקודה מימין ומשמאל למשרעת, וצייר את כיוון תנועתה מיד לאחר צילום זה.

**9) תרגיל 1**

מהירות גל במיתר מתוח 25 מטר בשנייה. קושרים את היתר בין שני כנים שהמרחק ביניהם 3 מטר.
מניעים את המיתר בעזרת מתנד.
באיזו תדירות יש לנדנד אותו כך שייווצר בו גל עומד עם 12 נקודות צומת (כולל הקצוות)?

- 45.8 הרץ.
- 70 הרץ.
- 8.3 הרץ.
- 75 הרץ.
- 80.7 הרץ.

(10) תרגיל 2

מיתר בעל אורך 90 ס"מ קשור בשני קצותיו. כשמנדנדים אותו בתדירות 150 הרץ, נוצר בו גל עומד עם 8 נקודות צומת (כולל הקצוות). מהירות גל במיתר הנ"ל:

א. $15.3 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ב. $38.6 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ג. $17 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ד. $34.3 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

(11) תרגיל 3

מנדנדים מיתר מתוח הקשור בשני קצותיו בתדירות 100 הרץ. אורך המיתר 3 מטר. במיתר נוצר גל עומד עם 5 נקודות צומת (כולל הקצוות). מהי מהירות הגל במיתר?

א. $150 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ב. $100 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ג. $330 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ד. $20 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ה. $340 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

(12) תרגיל 4

מיתר של גיטרה משמיע עם הפריטה עליו צליל בתדירות של 300 הרץ. אם רוצים להפיק מהמיתר צליל בעל תדירות של 900 הרץ:

א. אין כל דרך להפיק את התדירות הנ"ל מהמיתר.

ב. יש להקטין את המתיחות במיתר פי 3.

ג. יש לקצר את המיתר פי 3.

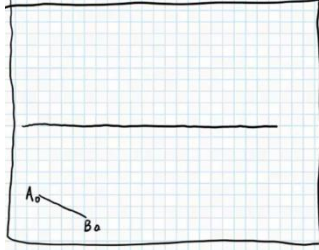
ד. יש להאריך את המיתר פי 3.

ה. יש להגדיל את המתיחות פי 2.

(13) תרגיל החזרה גלים דו ממדיים

נתון אמבט גלים הבא בו מתקדם גל ישר A_0B_0 . באמבט קיים גם מחסום.

- א. הוסף לתרשים חץ המתאר את כיוון התקדמות הגל A_0B_0 .
 ב. הוסף לתרשים את חזית הגל לאחר שהחזרה מהמחסום.



- ג. הוסף לתרשים חיצים המתארים את זוויות פגיעת והחזרת הגל כפי שהן מוחזרות לאור.
 ד. הוסף לתרשים חיצים המתארים את זוויות פגיעת והחזרת הגל כפי שהן מוחזרות לגלי מים.
 ה. הוסיפו לתרשים את חזית הגל, ברגע שבו אמצע חזית הגל נוגעת במחסום.

(14) תרגול מעבר תווך גלי מים

נתון אמבט גלים בו נע גל לפי התרשים הבא.

במרכז האמבט מוקם מחסום כך שגובה המים בחלק הימני נמוך יותר.

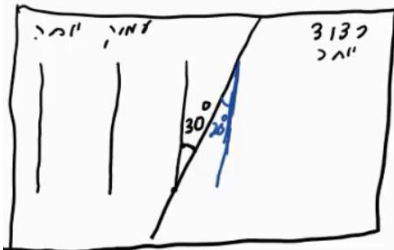
מקור גלים בקצה השמאלי של האמבט מייצר גל ישר מחזורי בתדירות 4 הרץ.

מהירות הגל במים בחלק העמוק היא 20 ס"מ לשנייה. הגל מתקדם ועובר לתווך הימני כמתואר בתרשים.

- א. מה מהירות גל המים בתווך הרדוד יותר?
 ב. מהו אורך הגל λ_1 בחלק העמוק?

ג. מהו אורך הגל λ_2 בחלק הרדוד?

- ד. הוסיפו לתרשים (איכותית) עוד 2 אורכי גלים לאחר מעבר גל המים לתווך הרדוד.

**(15) תרגול אנרגיה ומשרעת של גל**

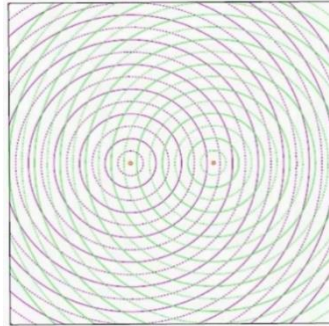
גל מעגלי מתפשט באמבט גלים. משרעתו, כשהיה מעגל ברדיוס 3cm, הייתה 1cm.

א. פי כמה תהיה קטנה האנרגיה שלו כשיתפשט לרדיוס של 15cm?

ב. מה תהיה משרעתו במצב זה?

16) התאבכות גלי מים – תרגיל 1

נתון תרשים של אמבט גלים ובו 2 מקורות בעלי אורך גל זהה ושווי מופע.
 קווים רציפים מייצגים שיא בגל וקווים מקווקוים – שפל.
 זהו את קווי המקסימום והמינימום בתרשים.

**17) התאבכות גלי מים – תרגיל 2**

נתון אמבט גלים בו 2 מקורות שהמרחק ביניהם 7 ס"מ.
 המקורות מכים במים במופע זהה בתדירות 20 הרץ.
 מהירות התקדמות הגלים באמבט היא 25 ס"מ לשנייה.

- א. מה אורך הגל של הגלים שיוצרים המקורות?
 ב. קבע, לגבי כל אחת מהנקודות הבאות: A, B, C, D בתרשים,
 האם היא על קו מקסימום, על קו מינימום או נקי ביניים:
- A - מרחקה מהמקור הראשון - 4 ס"מ ומהמקור השני - 2.8 ס"מ.
 - B - מרחקה מהמקור הראשון - 5 ס"מ ומהמקור השני - 3.2 ס"מ.
 - C - מרחקה מהמקור הראשון - 7 ס"מ ומהמקור השני - 3.4 ס"מ.
 - D - מרחקה מהמקור הראשון - 8 ס"מ ומהמקור השני - 6.5 ס"מ.
- ג. כמה קווי מקסימום וכמה קווי מינימום יופיעו באמבט?

18) שאלה 1 בהתאבכות גלי מים

שני מקורות גל זהים A ו-B נמצאים בנקודות (0,0) ו-(6,0). המקורות משדרים
 באורך גל של 1cm לכל הכיוונים. על ציר y מתקבלת התאבכות בונה בנקודות
 הבאות (המספרים בס"מ):

- (0,1.1) (0,2.5) (0,4.5) (0,8) (0,17.5).
- (0,1) (0,2) (0,4) (0,8) (0,16) (0,32).
- (0,6) (0,12) (0,18) (0,24) (0,30).
- (4,4.5) (4,8) (4,17.5) (3,2).
- (0,4.2) (0,8.7) (0,16.5) (0,0).
- (0,4.5) (0,8) (0,17.5).

19) שאלה 2 בהתאבכות גלי מים

שני מקורות גל זהים ושווי מופע ממוקמים בנקודות $(0,0)$ ו- $(5,0)$ (הערכים בס"מ). אורך הגל של כל אחד מהם 2 ס"מ. היכן על ציר y תתקבל התאבכות בונה מסדר ראשון? (הערכים בס"מ).

- א. $(5,2.5)$.
- ב. $(0,5.25)$.
- ג. $(0,6)$.
- ד. $(0,2.5)$.
- ה. $(0,-5.25)$.

20) שאלה 3 בהתאבכות גלי מים

שני מקורות גל זהים A ו-B נמצאים בנקודות $(0,5)$ ו- $(0,-5)$. בנקודה $(10,10)$ מתקבלת התאבכות בונה מסדר ראשון (כל המספרים נתונים בס"מ) אורך הגל הוא בקירוב:

- א. 8.5 ס"מ.
- ב. 5 ס"מ.
- ג. 7.3 ס"מ.
- ד. 15 ס"מ.
- ה. 6.8 ס"מ.

21) שאלה 4 בהתאבכות גלי מים

באמבט גלים ממוקמים שני מתנדים בשתי נקודות $(4,2)$ ו- $(7,6)$. המתנדים רוטטים בתדירות זהה ובאותו מופע. בנקודה $(10,10)$ מתקבלת התאבכות בונה מסדר שלישי. מהו אורך הגל? (הגדלים המספריים במטרים).

- א. 1.67m.
- ב. 0.62m.
- ג. 2.79m.
- ד. 6.83m.
- ה. 1.23m.

(22) התאבכות אור תרגיל 1

מאירים בלייזר בעל אורך גל 500 ננומטר לוחית בעלת 2 סדקים בעלי $d = 0.2\text{mm}$. במרחק $L = 3\text{m}$ נמצא מסך.

- מהו רוחב פס אור כל עוד אנחנו בזויות קטנות?
- מהו מרחקו ממרכז התבנית של מרכז פס האור מסדר רביעי?
- מהו מרחקו ממרכז תבנית ההתאבכות של קו החושך מסדר שביעי?
- מה מרחקו ממרכז תבנית ההתאבכות של מרכז פס האור מסדר 200?

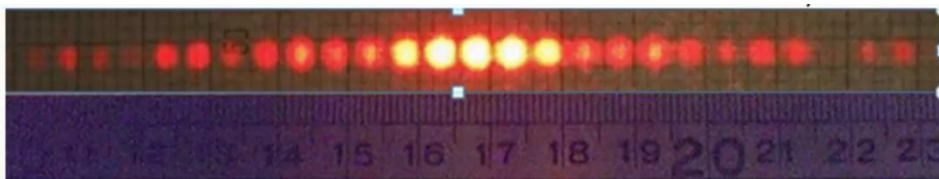
(23) התאבכות אור תרגיל 2

מאירים בלייזר ירוק בעל אורך גל לא ידוע על לוחית ובה 2 סדקים שהמרחק ביניהם 0.15 מ"מ. מניחים מסך שאורכו $h = 1\text{m}$ במרחק 3 מטר מהלוחית כך שמרכז המסך בדיוק מול הסדקים. הזווית למקסימום מסדר חמישי נמדדת ושווה ל-1 מעלה.

- מה אורך הגל של הלייזר?
- מה מרחקו של המינימום מסדר חמישי ממרכז המסך?
- כמה קווי חושך התקבלו על המסך?
- אם נחליף המסך במסך ארוך מאוד שיונח באותו מיקום, כמה פסי אור ייווצרו על המסך?

(24) התאבכות אור תרגיל 3

לוקחים לייזר אדום בעל אורך גל לא ידוע ומציבים לפניו לוחית בעלת 2 סדקים שהמרחק ביניהם 0.25 מ"מ. ממקמים מסך במרחק 1.8 מטר מהלוחית. על המסך מתקבלת תבנית ההתאבכות הבאה, לצד סרגל שהודבק למסך מראש.



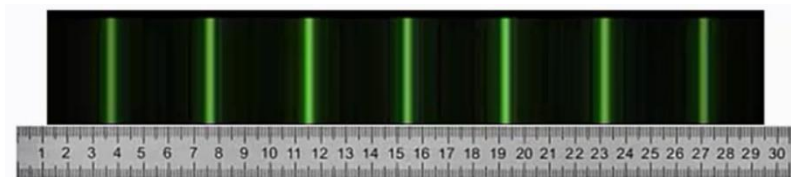
- מצא את אורך הגל של הלייזר בדרך המדויקת ביותר.
- איזה מהנקודות בצילום הינה נקודת המקסימום המרכזי?
- לאיזה נקודה בצילום מגיע אור שמרחקו מאחד הסדקים גדול ב-3 אורכי גל מאשר מרחקו מהסדק השני?
- לאיזה נקודה על המסך מגיע אור שמרחקו מאחד הסדקים גדול ב-4.5 אורכי גל מאשר מרחקו מהסדק השני?
- מהן 3 הדרכים אשר ניתן לצופף בהן את תבנית ההתאבכות?

(25) התאבכות אור בסריג – תרגיל 4

- מאירים בלייזר בעל אורך גל לא ידוע על סריג בעל קבוע של 100 חריצים למ"מ. מציבים מסך במרחק 1 מטר מהסריג כך שמרכזו מול מרכז הסריג ומול קרן הלייזר. אורך המסך 4 מטר.
- מיקומו של קו המקסימום הראשון נמדד ושווה ל-6.5 ס"מ ממרכז המסך.
- מהו אורך הגל של הלייזר?
 - מה מיקומו של קו המקסימום מסדר שני?
 - מה מיקומו של קו המקסימום מסדר חמישי?
 - כמה קווי מקסימום יתקבלו על המסך?
 - בהנחה שמחליפים מסך זה במסך ארוך מאוד באותו המיקום, כמה קווי מקסימום יתקבלו עליו?

(26) התאבכות אור בסריג – תרגיל 5

- מאירים בלייזר ירוק בעל אורך גל 550 ננומטר על סריג בעל קבוע לא ידוע, ומציבים מסך במרחק 2.5 מטר מהסריג.
- על המסך שעליו מודבק סרגל מתקבלת התמונה הבאה:



- מצאו את קבוע הסריג בדרך המדויקת ביותר.
- באיזה זווית ביחס לאנך האמצעי יתקבל קו המקסימום מסדר 20?
- מה יקרה לתבנית ההתאבכות אם נחליף את הלייזר הירוק בלייזר כחול?

(27) התאבכות אור בסריג – תרגיל 6

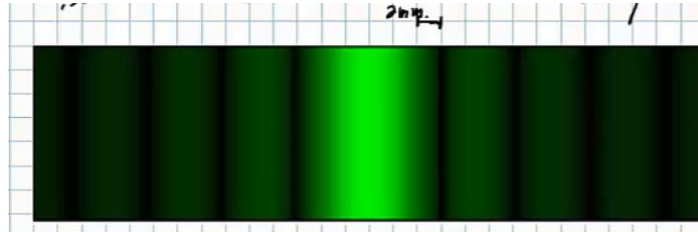
- אור לבן פוגע בסריג עקיפה בעל קבוע 300 חריצים למ"מ. מסך ארוך מונח במרחק 2 מטר מהסריג.
- מה רוחב הפס הצבעוני מסדר ראשון?
 - מה הזווית שנפתחת בין המקסימום האדום מסדר שני, והסגול מסדר שני?
 - הוכח שקיימת חפיפה בצבעים בין הסדר השני לסדר השלישי.

(28) עקיפה מסדק יחיד – תרגיל 1

- תלמיד מאיר בלייזר אדום בעל אורך גל 670 ננומטר סדק שרוחבו 0.3 מ"מ. תבנית עקיפה מתקבלת על מסך במרחק 1.5 מטר.
- מה רוחבו של המקסימום המרכזי?
 - מה רוחבו של מקסימום משני, מסדר נמוך?

29) עקיפה מסדק יחיד – תרגיל 2

לוקחים לייזר ירוק בעל אורך גל 530 ננומטר. מציבים אותו לפני סדק בעל רוחב לא ידוע, ועל מסך משבצות במרחק 3 מטר מהסדק מתקבלת תבנית ההתאבכות הבאה:

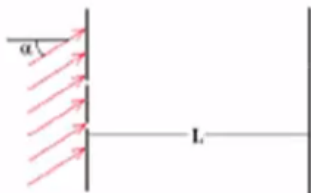


נתון שרוחב משבצת על הלוח הוא 2 מ"מ.

- מה רוחב הסדק?
- כמה קווי צומת יתקבלו על מסך ארוך מאוד?
- מה יקרה לתבנית ההתאבכות אם נגדיל את רוחב הסדק?

30) שאלה בהתאבכות גלי אור

דרך משטח מישורי עם שני סדקים צרים מאוד מעבירים גל מישורי בעל אורך גל λ המתקדם בכיוון היוצר זווית קטנה α עם האנך למשטח (ראו ציור).



המרחק בין הסדקים הוא d כאשר $d \gg \lambda$. מודדים את העוצמה במרכז לוח מישורי הנמצא במרחק $L \gg d$ מהמשטח עם הסדקים, כלומר בנקודה הנמצאת מול נקודת האמצע בין שני הסדקים. העוצמה הנמדדת היא 0.

מהי הזווית הקטנה ביותר α המסבירה מדידה זו?

- $\alpha = 0$
- $\alpha = \frac{\lambda}{2d}$
- $\alpha = \frac{2\lambda}{\pi d}$
- $\alpha = \frac{2\lambda}{d}$
- $\alpha = \frac{2\pi\lambda}{d}$
- $\alpha = \frac{\lambda}{\pi d}$

31 שאלה 2 בהתאבכות גלי אור

שני גלים אלקטרומגנטיים העוברים כל אחד דרך סדק צר יוצרים תבנית התאבכות

על פני מסך רחוק. הגל העובר דרך הסדק הראשון מתואר ע"י: $\vec{E}_1 = A_1 \cdot e^{i(kz - \omega t)} \hat{x}$.

הגל העובר דרך הסדק השני מתואר ע"י: $\vec{E}_2 = A_1 \cdot e^{i(kz - \omega t)} (-\hat{y})$.

היחס בין העוצמה המקסימלית לעוצמה המינימלית הוא:

א. $\sqrt{2}:1$.

ב. $1:0$.

ג. $1:1$.

ד. $2:1$.

ה. $4:1$.

ו. $3:2$.

32 שאלה 1 – גלי קול

אם נניח, כי עוצמת סף השמע היא: $10^{-16} \frac{W}{cm^2}$.

מהי העוצמה ביחידות הני"ל בסף הכאב 140dB (כלומר, כמה $\frac{W}{cm^2}$ יש ב-140dB)?

א. $14 \cdot 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$.

ב. $10^{-14} \frac{W}{cm^2}$.

ג. $140 \frac{W}{cm^2}$.

ד. $10^4 \frac{W}{cm^2}$.

ה. $10^{-2} \frac{W}{cm^2}$.

33 שאלה 2 – גלי קול

פי כמה גדולה עוצמת קול של 100 דציבל מעוצמת קול של 10 דציבל?

א. פי 10.

ב. פי 100.

ג. פי 1,000.

ד. פי 10,000.

ה. פי 1,000,000.

ו. פי 1,000,000,000.

ז. פי 10,000,000,000.

34 שאלה 3 – גלי קול

אם עוצמת הקול המינימאלית שבני אדם מסוגלים לשמוע (סף השמע)

היא: $10^{-16} \frac{W}{cm^2}$, מהי עוצמת הקול באותן יחידות ב-130 דציבל (סף הכאב),

וכמה אנרגיה פוגעת בעור התוף החשוף לעוצמה הזו (130dB) במשך שעה? נתון ששטחו של עור התוף כ-0.7 סמ"ר.

א. העוצמה: $10^{-13} \frac{W}{cm^2}$, וסה"כ אנרגיה בשעה: 5.3J.

ב. העוצמה: $10^{-3} \frac{W}{cm^2}$, וסה"כ אנרגיה בשעה: 5.3J.

ג. העוצמה: $130 \frac{W}{cm^2}$, וסה"כ אנרגיה בשעה: 75J.

ד. העוצמה: $1.3 \cdot 10^{-3} \frac{W}{cm^2}$, וסה"כ אנרגיה בשעה: 2.52J.

ה. העוצמה: $0.001 \frac{W}{cm^2}$, וסה"כ אנרגיה בשעה: 2.52J.

35 שאלה 4 – גלי קול

אם נניח כי עוצמת סף השמע היא: $10^{-16} \frac{W}{cm^2}$ (ווט לסמ"ר),

מהי העוצמה I ביחידות הנ"ל ב-120dB, וכמה אנרגיה E פוגעת בעור התוף של אוזנו של אדם, החשוף לעוצמת קול זו במשך 4 שעות? הניחו ששטחו של עור התוף 0.7 סמ"ר.

א. $I = 12 \cdot 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$ ו- $E = 5.8 \text{Joule}$.

ב. $I = 13 \cdot 10^{-14} \frac{W}{cm^2}$ ו- $E = 5.8 \text{Joule}$.

ג. $I = 10^{-4} \frac{W}{cm^2}$ ו- $E = 1.01 \text{Joule}$.

ד. $I = 10^{-4} \frac{W}{cm^2}$ ו- $E = 10.1 \text{Joule}$.

ה. $I = 120 \frac{W}{cm^2}$ ו- $E = 1.2 \cdot 10^6 \text{Joule}$.

(36) שאלה 5 – גלי קול

כאשר אדם נחשף לקול בעוצמה של 20 דציבל בפרק זמן של שעה, כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף של אוזנו היא: $2.5 \cdot 10^{-11} \text{ Joule}$. מהי כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף כאשר האוזן נחשפת לקול בעוצמה של 120 דציבל למשך זמן של 20 דקות?

- א. 0.08 Joule .
- ב. 0.75 Joule .
- ג. 25 Joule .
- ד. $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ Joule}$.
- ה. $5 \cdot 10^{-11} \text{ Joule}$.

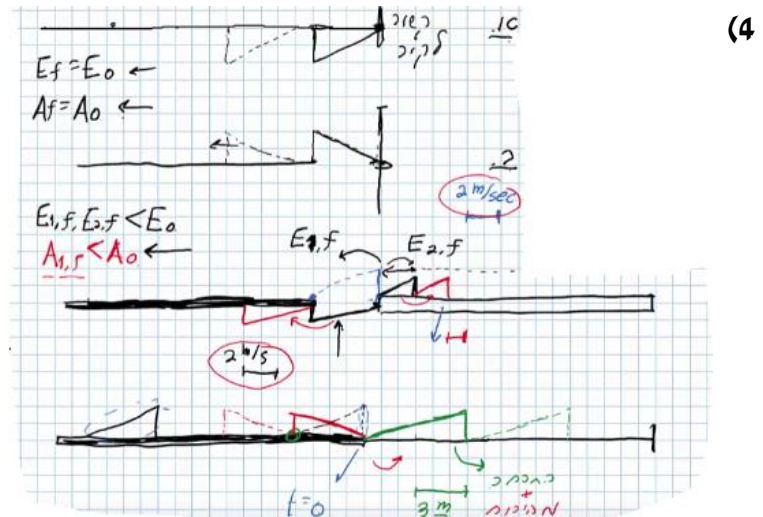
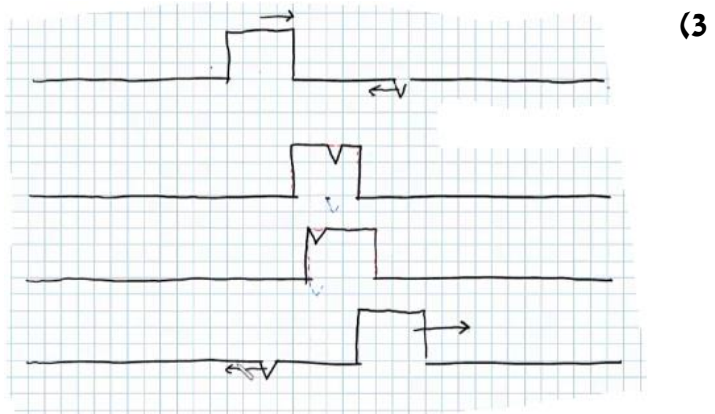
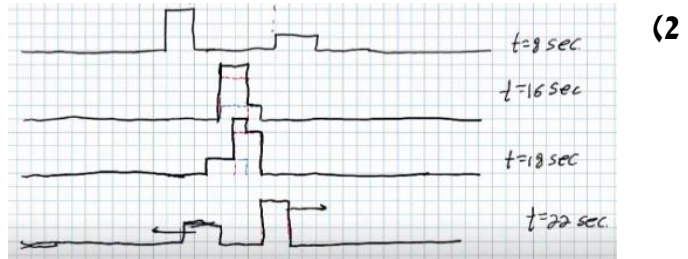
(37) שאלה 6 – גלי קול

כאשר אדם נחשף לקול בעוצמה של 20 דציבל בפרק זמן של שעה, כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף של אוזנו היא: $2.5 \cdot 10^{-11} \text{ Joule}$. מהי כמות האנרגיה הכוללת המגיעה לעור התוף כאשר האוזן נחשפת לקול בעוצמה של 120 דציבל למשך זמן של 30 דקות?

- א. 0.125 Joule .
- ב. 1.130 Joule .
- ג. 37.52 Joule .
- ד. $3.8 \cdot 10^{-5} \text{ Joule}$.
- ה. $7.5 \cdot 10^{-11} \text{ Joule}$.

תשובות סופיות:

(1) א. $A = 0.3m$ ב. $V = 0.2 \frac{m}{sec}$ ג. למעלה. ד. למטה.

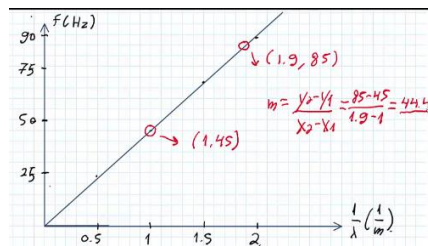


5 א.

$\frac{1}{\lambda} (\text{m}^{-1})$	$\lambda (\text{m})$	צורת הגל העומד	f - תדירות התנודות (Hz)
0.5	2		24
1	1		45
1.5	$\frac{2}{3}$		67
2	$\frac{1}{2}$		88

$f = 111 \text{ Hz}$. ד $f = v \frac{1}{\lambda}$. ג

ב.

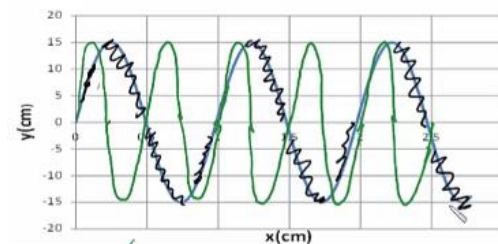


$v = 25 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. ד

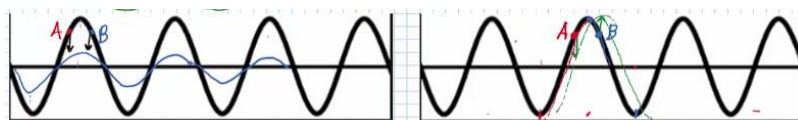
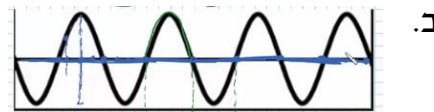
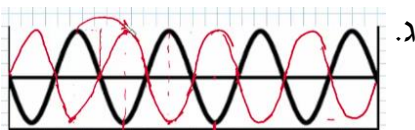
$t = 4$. ג $\lambda = 1 \text{ m}$. ב $A = 0.15 \text{ m}$. א (6)

ה. $(0.5, 0)$, $(1.5, 0)$, $(2.5, 0)$

הגל הירוק בשרטוט: (7)



8 א. מתקדם: $\lambda_1 = 80 \text{ cm}$, עומד: $\lambda_2 = 80 \text{ cm}$.

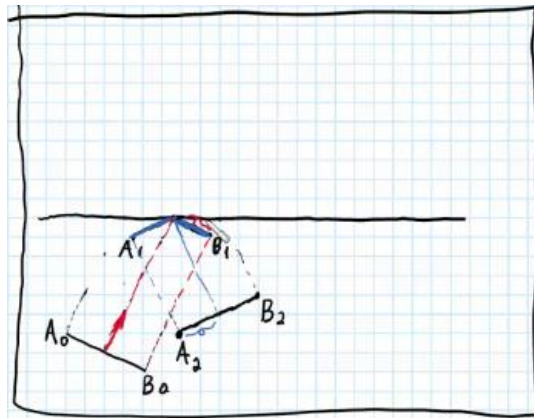


9 א.

10 ב.

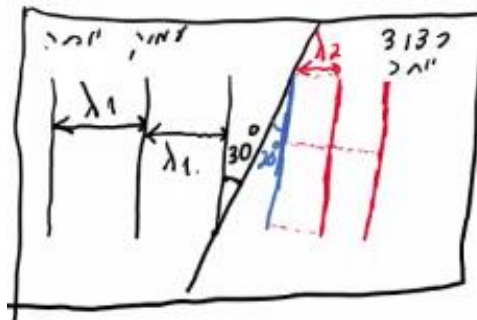
11 א.

12 ג.



(13)

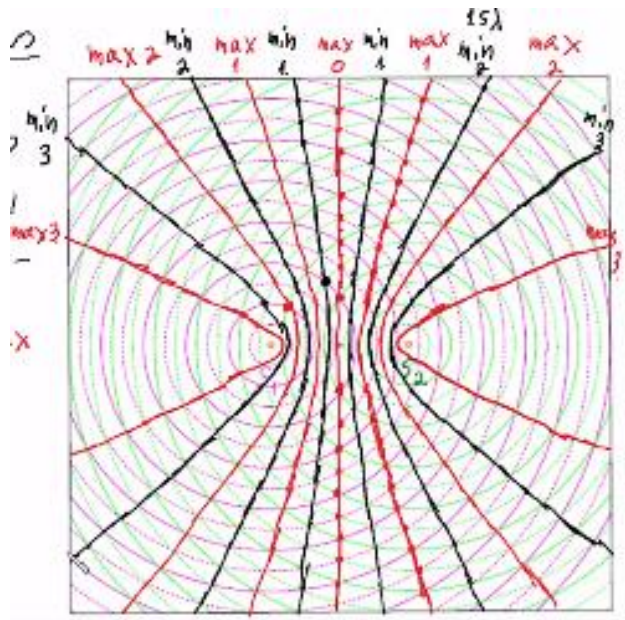
א. $v_2 = 13.7 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ ב. $\lambda_1 = 5\text{cm}$ ג. $\lambda_2 = 3.42\text{cm}$



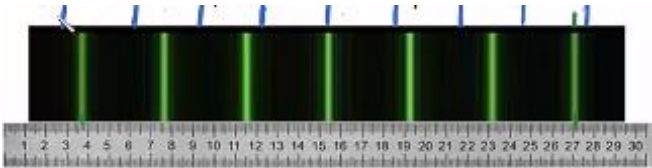
ד.

א. 0.45cm ב. 5

(15)



(16)

- (17) א. 1.2 ס"מ.
 ב.i. A - נקי מקסימום מסדר ראשון.
 ב.ii. B - נקי צומת מסדר שני.
 ב.iii. C - נקי מקסימום מסדר שלישי, נקי על קו מקסימום.
 ב.iv. D - נקי ביניים.
 ג. 11 קווי מקסימום, 12 קווי מינימום.
- (18) א' מלאה ו-ו' חלקית.
- (19) ב' ו-ה.
- (20) ה.
- (21) א'.
- (22) א. 7.5 nm ב. 3 ס"מ. ג. $\theta = 0.93^\circ$ ד. $x_{200} = 1.73$
- (23) א. 524 נ"מ. ב. 4.72 ס"מ. ג. 94 קווי חושך. ד. 573 פסי מקסימום.
- (24) א. 5 מ"מ. ב. $\lambda = 694$ ג. 3λ ד. 4.5λ ה. ראה סרטון.
- (25) א. 649 נ"מ. ב. 13 ס"מ. ג. 34.3 ס"מ. ד. 27 קווים. ה. 31 קווים.
- (26) א. $282 \frac{\text{haritsim}}{\text{cm}}$ ב. 18.1°
- ג.
- 
- (27) א. 0.188 מ'. ב. 10.9° ג. הוכחה.
- (28) א. 6.7 מ"מ. ב. 3.35 מ"מ.
- (29) א. 0.265 מ"מ. ב. 1,000 קווי צומת בתבנית.
 ג. האור ינוע בקווים ישרים ולא מבצע עקיפה.
- (30) ב'.
- (31) ג'.
- (32) ה.
- (33) ו'.
- (34) ה.
- (35) ג'.
- (36) א'.
- (37) א'.

גלים

פרק 2 - גלים אלקטרו-מגנטיים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים 18

הרצאות ותרגילים:

שאלות:

(1) דוגמה - חישוב כל הגדלים הבסיסיים
 השדה החשמלי של גל א"מ המתקדם בחומר לא מגנטי נתון בביטוי

$$\vec{E} = 4\pi \cos(10^9 t - 6x) \hat{y} \frac{mV}{m}$$

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.

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

4 דוגמה - קיטובים אליפטיים וערכים מקסימאליים

מצאו את הקיטוב של הגלים הבאים.
 אם הקיטוב אליפטי, מצאו את הערך המקסימאלי של השדה החשמלי ואת זווית ההטיה של הציר הראשי של האליפסה.

א. $\vec{E} = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{x} + 2E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{y}$

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

ג. $\vec{E} = E_0 \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{4}\right) \hat{x} + E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{y}$

ד. $\vec{E} = E_0 \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{4}\right) \hat{x} + \frac{1}{2}E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{y}$

5 קיטוב אליפטי הוא סכום של קיטובים מעגליים

הוכיחו כי ניתן לייצג גל בעל קיטוב אליפטי בעזרת סכום של גל בעל קיטוב מעגלי ימני וגל בעל קיטוב מעגלי שמאלי.

6 קיטוב מעגלי כסכום של קיטובים אליפטיים

הוכיחו כי גל בעל קיטוב מעגלי הינו סופרפוזיציה של שני גלים בעלי קיטוב אליפטי בכיוונים הפוכים.

7 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).

א. מצאו את זווית ברוסטר עבור גל בקיטוב מקבילי.

גל המקוטב אנכית פוגע בפני המים בזווית שחישבתם בסעיף א.

ב. מהי זווית ההעברה של הגל?

ג. מה הם מקדמי ההעברה וההחזרה?

8 דוגמה - גלי סונר ורדיו מתפשטים במים

גל אלקטרומגנטי בעל קיטוב לינארי מתפשט בתוך מי ים.

המוליכות הסגולית של מי ים היא: $\sigma \approx 4 \frac{1}{\Omega \cdot m}$ והמקדם הדיאלקטרי היחסי

הוא: $\epsilon_r \approx 80$. הניחו כי הגל מתפשט בכיוון z וכי האמפליטודה של השדה

החשמלי היא: E_0 .

מצאו את הגדלים הבאים עבור גלי רדיו: $f = 10^7 \text{ Hz}$, ועבור גלי סונר: $f = 10^3 \text{ Hz}$.

א. עומק החדירה, אורך הגל, ומהירות הגל.

ב. השדה החשמלי ו- \vec{H} .

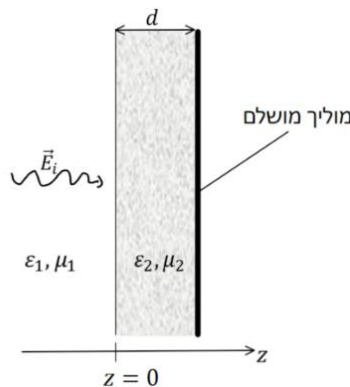
ג. הוקטור פוינטינג.

ד. כמות יחסית של אנרגיה הנקלטת בצוללת בעומק של 15 מטר מתחת לפני המים.

9) ציפוי כסף למיקרוגל

מיקרוגל פועל בתדרים של 10^{10} Hz . על מנת שקרינה לא תצא מהמיקרו יש לעטוף אותו בשכבת מתכת (כלוב פארדיי). העריכו מה צריכה להיות עובי השכבה כך שלא תהיה יציאה של קרינה מהמיקרו אם המתכת היא כסף. למה לדעתכם לא משתמשים בכסף ליצירה של שכבת הגנה במיקרו? ההתנגדות הסגולית של כסף היא: $\rho = 1.59 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, $\mu_r \approx \epsilon_r \approx 1$.

10) שכבת חומר דיאלקטרי ליד מוליך מושלם



גל הנע בתווך דיאלקטרי בעל ϵ_1, μ_1 פוגע בניצב לשכבה בעובי d עם ϵ_2, μ_2 ומוחזר ממוליך מושלם הנמצא בקצה השכבה, ראו איור. השדה החשמלי של הגל נתון

$$\vec{E}_i(z, t) = E_{i0} \hat{x} \cos \omega \left(\frac{z}{u} - t \right)$$

לפי: 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.

11) גל עובר דרך פיסת נחושת

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

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

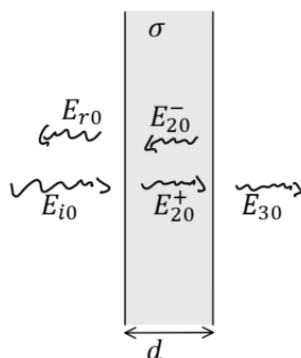
מישורית בעובי d השווה לעומק החדירה.

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



12 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.

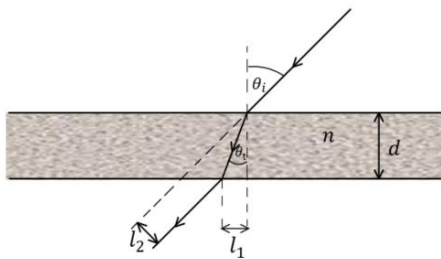
רשמו ביטוי ל- \vec{H} .

ד. רשמו ביטוי לווקטור פוינטינג הממוצע בזמן.

13 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: $\vec{E} = (5i\hat{x} - \hat{y})e^{-i(\pi z + \omega t)}$

**14 חישוב הזזה לטרלית (חוק סנל)**

קרן אור נעה באוויר ופוגעת בזווית θ_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).

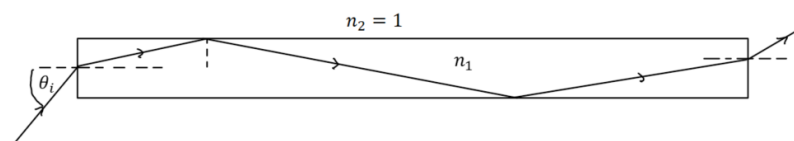
15 גל א"מ לא יוצא מסיב אופטי

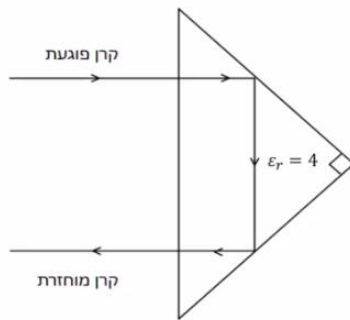
סיב אופטי ישר עשוי מחומר דיאלקטרי שקוף בעל אינדקס שבירה n_1 .

גל אלקטרו מגנטי נכנס בצידו האחד של הסיב בזווית θ_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 θ_i .



**16) 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.

17) פגיעה ישרה במוליך מושלם

גל הנע באוויר (ריק) בכיוון ציר z פוגע פגיעה ישירה במוליך מושלם (שפת המוליך היא מישור xy). אמפליטודת השדה החשמלי של הגל היא: $6 m \frac{V}{m}$ והתדירות היא: $100 MHz$.

א. מצאו את השדה החשמלי ואת H של הגל הפוגע והגל המוחזר.
 ב. רשמו ביטוי לשדה החשמלי הכולל.
 ציינו במפורש מה גודל השדה הנמדד כתלות בזמן ובמרחב.
 ג. מצאו את המיקום הכי קרוב למוליך שבו השדה החשמלי מתאפס.

18) גל מקוטב מעגלית פוגע במוליך מושלם

השדה החשמלי של גל מישורי הנע באוויר נתון לפי: $\vec{E}(z) = E_{i0}(\hat{x} - i\hat{y})e^{ikz}$. הגל פוגע פגיעה ישרה במוליך מושלם כך ששפת המוליך היא במישור $z = 0$.

א. מהו סוג הקיטוב של הגל? במקרה של קיטוב מעגלי או אליפטי ציינו גם אם הקיטוב ימני או שמאלי.
 ב. מצאו את הקיטוב של הגל המוחזר.
 ג. מהו הזרם המושרה במוליך?
 ד. רשמו ביטוי מפורש לשדה החשמלי הנמדד כתלות במרחב ובזמן.

19) גל פוגע בזווית במוליך מושלם

גל מישורי בתדירות ω נע באוויר (ריק) ופוגע בזווית במוליך מושלם. זווית הפגיעה היא θ_i וקיטוב הגל מאונך למישור הפגיעה. אמפליטודת השדה החשמלי היא E_{i0} .

א. מצאו את הזרם על שפת המוליך כתלות בזמן ובמרחב.
 ב. מצאו את הממוצע בזמן של הוקטור פוינטנג.

20) גל פוגע בזווית במוליך מושלם קיטוב מקבילי

השדה החשמלי של גל מישורי הנע באוויר נתון

$$\vec{E}_i(x, z) = 10e^{i(6x+8z)} \hat{y} \frac{V}{m}$$

הגל פוגע במוליך מושלם ששפתו היא במישור $z = 0$.

- מהם אורך הגל והתדירות?
- רשמו ביטוי עבור השדה החשמלי ו- H הנמדדים כתלות בזמן ובמרחב.
- מהי זווית הפגיעה?
- מצאו את השדה החשמלי ואת H של הגל המוחזר.
- רשמו את השדה החשמלי ואת H השקולים באוויר.

21) גל פוגע בזווית במוליך מושלם קיטוב אנכי

השדה החשמלי של גל מישורי הנע באוויר נתון

$$\vec{E}_i(x, z) = 5(\hat{y} + \sqrt{3}\hat{z})e^{-i6(\sqrt{3}y-z)} \frac{V}{m}$$

הגל פוגע במוליך מושלם ששפתו היא במישור $z = 0$.

- מהם אורך הגל והתדירות?
- רשמו ביטוי עבור השדה החשמלי ו- H הנמדדים כתלות בזמן ובמרחב.
- מהי זווית הפגיעה?
- מצאו את השדה החשמלי ואת H של הגל המוחזר.
- רשמו את השדה החשמלי ואת H השקולים באוויר.

22) גלי רדיו בנחושת

מצאו את אורך הגל ומהירות הפאזה של גל רדיו בתדר של 1MHz המתפשט בנחושת. השוו לתוצאה המתקבלת באוויר (או ריק).

$$\mu_r \approx \epsilon_r \approx 1 \text{ ו- } 59.6 \cdot 10^6 (\Omega \cdot m)^{-1}$$

23) כמה עמוק חודרת קרינת הפלאפון למח

המוליכות של עצם הגולגולת היא בערך: $0.15 \frac{S}{m}$ ($S = siemens = \frac{1}{\Omega}$) והמקדם

הדיאלקטרי הוא בערך 12. עבור רקמת המוח עצמה המוליכות היא בקירוב $1 \frac{S}{m}$

והמקדם הדיאלקטרי הוא בקירוב 50 (קרוב למים).

העריכו את עומק החדירה של קרינת ה-4g המשודרת בתדרים בסביבות ה-1GHz.

מה יהיה השינוי בעומק החדירה עבור קרינת ה-5g המשודרת בתדרים של

כ-30GHz (בפועל התוצאה נמוכה פי 10 כי המקדם הדיאלקטרי והמוליכות גם

משתנים עם שינוי התדר).

24) גל פוגע בזווית במי ים

גל בעל תדירות של 10 kHz המקוטב במקביל למישור הפגיעה נע באוויר ופוגע בזווית בשפה של המים באוקיינוס.

זווית הפגיעה היא: 88° , $\epsilon_r = 80$, $\mu_r = 1$ ו- $\sigma = 4 \frac{\text{S}}{\text{m}}$.

א. מצאו את זווית ההעברה.

ב. מצאו את מקדם ההעברה τ .

ג. את היחס $\frac{\langle s_t \rangle}{\langle s_i \rangle}$ על השפה (s) הוא הממוצע בזמן).

ד. ואת המרחק שבו עוצמת השדה יורדת ב-30dB (דציבל).

תשובות סופיות:

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

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

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

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

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

$$(3) \quad \text{א. קיטוב ליניארי, } \theta = 72^\circ, \hat{n} = \frac{1}{\sqrt{10}}(1, 3) \quad \text{ב. קיטוב מעגלי שמאלי.}$$

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

$$(4) \quad \text{א. קיטוב ליניארי, } \theta = 26.6^\circ, \hat{n} = \frac{(1, 2)}{\sqrt{5}}$$

$$\text{ב. קיטוב אליפטי, } \theta = \frac{\pi}{2}, E_{\max} = 2E_0$$

$$\text{ג. קיטוב אליפטי, } \theta = 45^\circ, E_{\max} = 1.7E_0$$

$$\text{ד. קיטוב אליפטי, } \theta = 21.7^\circ, E_{\max} = 1.27E_0$$

(5) הוכחה.

(6) הוכחה.

$$(7) \quad \theta_B = 84^\circ \quad \text{א.} \quad \theta_i = 6.4^\circ \quad \text{ב.} \quad \tau^\perp = 0.025, \Gamma^\perp = -0.975 \quad \text{ג.}$$

$$(8) \quad \text{א. רדיו: } d = 0.08m, \lambda = 0.5m, u = 5 \cdot 10^6 \frac{m}{\text{sec}}$$

$$\text{סונר: } d = 8m, \lambda = 50m, u = 5 \cdot 10^4 \frac{m}{\text{sec}}$$

$$\text{ב. רדיו: } \vec{E} = E_0 e^{-\frac{7}{0.08} z} e^{i(4\pi z - 2\pi \cdot 10^7 t)} \hat{x}, \vec{H} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} E_0 e^{-\frac{7}{0.08} z} e^{i(4\pi z - 2\pi \cdot 10^7 t + \frac{\pi}{4})} \hat{y}$$

$$\text{סונר: } \vec{E} = E_0 e^{-\frac{7}{8} z} e^{i(4\pi \cdot 10^{-2} z - 2\pi \cdot 10^3 t)} \hat{x}, \vec{H} = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} E_0 e^{-\frac{7}{8} z} e^{i(4\pi \cdot 10^2 z - 2\pi \cdot 10^3 t + \frac{\pi}{4})} \hat{y}$$

$$\text{ג. רדיו: } \vec{S} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} E_0^2 e^{-\frac{z}{0.04}} \hat{z} \quad \text{סונר: } \vec{S} = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} E_0^2 e^{-\frac{z}{4}} \hat{z}$$

ד. רדיו: 0%

סונר: 2.35%

9) עובי השכבה. כסף היא מתכת יקרה. $\sim 3\mu m$

א. $\tan \theta = \frac{\eta_2}{\eta_1} \tan(K_2 d)$ כאשר $\vec{E}_r(z, t) = E_{i0} \cos(K_1 z + \omega t - 2\theta) \hat{x}$ (10)

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

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

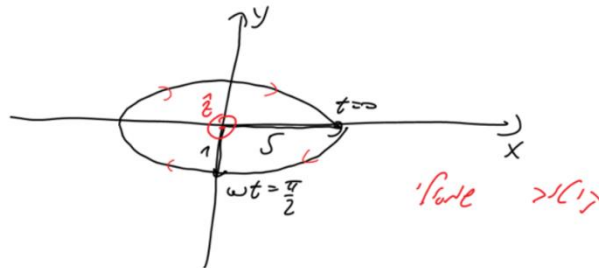
א. $\frac{E_{r0}}{E_{i0}} \approx -1 + 4.67 \cdot 10^{-6} i$, $\frac{E_{20}^+}{E_{i0}} \approx (1.90 + 0.140i) \cdot 10^{-6}$, $\frac{E_{20}^-}{E_{i0}} \approx (-2.49 + 4.53i) \cdot 10^{-6}$ (11)

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

א. $f = 10^7 \text{ Hz}$. ב. בכיוון $-\hat{z}$. ג. $\lambda = 2\pi m$. ד. $\epsilon_r = 22.8$ (12)

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

13) שרטוט:



א. $\sin \theta_i = \frac{1}{n} \sin \theta_i$. ב. $l_1 = \frac{d \sin \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}$ (14)

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

(15) $\sqrt{2}$

(16) 79%

א. $\vec{E}_i = 6 \cdot 10^{-3} e^{i\left(\frac{2\pi}{3}z - 2\pi \cdot 10^8 t\right)} \hat{x}$, $\vec{H}_i = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{120\pi} e^{i\left(\frac{2\pi}{3}z - 2\pi \cdot 10^8 t\right)} \hat{y}$ (17)

ג. $-\frac{3}{2} m$

ב. $\vec{E}_T = 12 \cdot 10^{-3} \sin\left(\frac{2\pi}{3}z\right) \sin(2\pi \cdot 10^8 t)$

א. קיטוב מעגלי שמאלי. ב. מעגל ימני. ג. $\vec{J}_s = \frac{2E_{i0}}{\eta_0} (\hat{x} - i\hat{y})$ (18)

ד. $\vec{E}_1(z, t) = 2E_{i0} \sin(kz) (\sin(\omega t)) \hat{x} + \cos(\omega t) \hat{y}$

$$\vec{J}_s(y, t) = \frac{E_{i0}}{60\pi} \cos \theta_i \cos \left(\frac{\omega}{c} \sin \theta_i y - \omega t \right) \hat{x} \quad \text{א. (19)}$$

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{-E_{i0}^2}{30\pi} \sin \theta_i \sin^2 \left(\frac{\omega}{c} \cos \theta_i z \right) \hat{y} \quad \text{ב.}$$

$$\lambda = \frac{\pi}{5} m, \quad f = \frac{3}{2\pi} \cdot 10^9 \text{ Hz} \quad \text{א. (20)}$$

$$\vec{E}_i(x, z, t) = 10 \cos(6x + 8z - 3 \cdot 10^9 t) \hat{y}, \quad \vec{H}_i(x, z, t) = \frac{3\hat{z} - 4\hat{x}}{60\pi} \cos(6x + 8z - 3 \cdot 10^9 t) \quad \text{ב.}$$

$$\theta_i = 36.9^\circ \quad \text{ג.}$$

$$\vec{E}_r(x, z, t) = -10 \cos(6x - 8z - 3 \cdot 10^9 t) \hat{y}, \quad \vec{H}_r(x, z, t) = \frac{-3\hat{z} - 4\hat{x}}{60\pi} \cos(6x - 8z - 3 \cdot 10^9 t) \quad \text{ד.}$$

$$\vec{E}_1(x, z, t) = -20 \sin(8z) \sin(6x - 3 \cdot 10^9 t) \hat{y} \quad \text{ה.}$$

$$\vec{H}_1(x, z, t) = \frac{1}{30\pi} \left(-3 \sin(8z) \sin(6x - 3 \cdot 10^9 t) \hat{z} - 4 \cos(8z) \cos(6x - 3 \cdot 10^9 t) \hat{x} \right)$$

$$\lambda = \frac{\pi}{6} m, \quad f = \frac{1.8}{\pi} \cdot 10^9 \text{ Hz} \quad \text{א. (21)}$$

$$\vec{E}_i = 5(\hat{y} + \sqrt{3}\hat{z}) \cos(6\sqrt{3}y - 6z + 3.6 \cdot 10^9 t), \quad \vec{H}_i = -\frac{\hat{x}}{12\pi} \cos(6\sqrt{3}y + 6z + 3.6 \cdot 10^9 t) \quad \text{ב.}$$

$$\theta = 60^\circ \quad \text{ג.}$$

$$\vec{E}_r = 5(-\hat{y} + \sqrt{3}\hat{z}) \cos(6\sqrt{3}y + 6z + 3.6 \cdot 10^9 t), \quad \vec{H}_r = -\frac{\hat{x}}{12} \cos(6\sqrt{3}y + 6z + 3.6 \cdot 10^9 t) \quad \text{ד.}$$

$$\vec{E}_1 = 10(\sin(6z) \sin(6\sqrt{3}y + 3.6 \cdot 10^9 t) \hat{y}) + \sqrt{3} \cos(6z) \cos(6\sqrt{3}y + 3.6 \cdot 10^9 t) \hat{z} \quad \text{ה.}$$

$$\vec{H}_1 = -\frac{\hat{x}}{12\pi} \cos(6z) \cos(6\sqrt{3}y + 3.6 \cdot 10^9 t) \hat{z}$$

$$\lambda = 4.1 \cdot 10^{-4} m, \quad u = 410 \frac{m}{\text{sec}} \approx 10^{-5} c \quad \text{ב. (22)}$$

$$d = 4 \text{ cm} \quad \text{עבור ה-5g אין הבדל. (23)}$$

$$\frac{\langle S_t \rangle}{\langle S_i \rangle} = 1.03 \cdot 10^{-3} \quad \text{ג.}$$

$$\tau'' = 7.37 \cdot 10^{-4} e^{-i \cdot 0.778} \quad \text{ב.}$$

$$\theta_i = 0.03^\circ \quad \text{א. (24)}$$

$$8.69 m \quad \text{ד.}$$