

## הוראות לדף הנוסחאות



### הוראות הדפסה!

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמים  
אישית ברוחב 0.5 בכל צד.

ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את  
חלון השוליים, לבחור שוליים מותאמים אישית  
ולשנות ל 0.5 בכל הכיוונים

### עריכה:

בדף הכנסנו כמה שיותר הסברים, נוסחאות ותמונות. אם מספר העמודים חורג ממספר  
העמודים המותר בבחינה ניתן לערוך את קובץ ה WORD ולהוריד הסברים מורחבים,  
תמונות או נוסחאות טריוויאליות. ניתן גם כמובן להוסיף הסברים שלכם או נוסחאות.  
בכל מקרה מומלץ מאוד לעבור על הדף לפני המבחן!! הוא גם סיכום של החומר.  
אין להוריד את הסמל של GOOL או כל סימן מסחרי אחר!!

### מבנה הדף:



הדף בנוי משלושה טורים.  
ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.  
בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באותו  
עמוד (ולא לעמוד הבא). בסוף הטור האחרון  
עוברים לטור הראשון (הימני) בעמוד הבא.  
ניתן לשנות את כיוון הפריסה לרוחב, זה יוצר  
מראה יותר מרווח על חשבון מספר עמודים.

כל הזכויות שמורות למני גבאי ולאתר GOOL

הדף מיועד לכל שימוש שאינו מסחרי ובפרט לשימוש מרצים, מורים, סטודנטים ותלמידים  
בקורסים שונים, ניתן לערוך את הדף אך יש להשאיר סימונים של אתר גול.

## מבנה החומר

## GOOL

גודל אטום המימן (הקטן ביותר):  $0.53 \cdot 10^{-10}m$   
יחידת האנגסטרם:  $1\text{\AA} = 10^{-10}m$   
פרוטונים מסמנים ב-  $p$  נויטרונים ב-  $n$  ואלקטרונים ב-  $e$   
מסת הפרוטון והנויטרון:  $m_n \approx m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}kg$   
מסת האלקטרון:  $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}kg$   
מסת האלקטרון קטנה בערך פי 2000 ממסת הפרוטון וזניחה ביחס אליו. לכן, בקירוב טוב, הפרוטונים והנויטרונים קובעים את מסת האטום.

מטען האלקטרון:  $q_e = -1.6 \cdot 10^{-19}c$   
מטען הפרוטון זהה והפוך בסימנו:  $q_p = 1.6 \cdot 10^{-19}c$   
הנויטרון לא מושפע מהכוח החשמלי ולכן אין לו מטען.  
**המטען החשמלי של כל גוף יהיה חיובי להיות כפולה שלמה של מטען הפרוטון או האלקטרון.**

## הכוח החשמלי - חוק קולון

**חוק קולון:**  
 $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$   
 $r$  - הוא המרחק בין הגופים

קבוע הכוח החשמלי האוניברסלי:  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{c^2}$   
הכוח הוא כוח דחיה אם סימן המטענים זהה ומשיכה אם הסימן הפוך.  
הנוסחה נכונה רק עבור מטענים נקודתיים או כדורים הטעונים בצורה אחידה. **משען נקודתי** הוא גוף שהגודל שלו קטן בהרבה מ-  $r$ , המרחק שבו מחשבים את הכוח. הנוסחה נכונה עבור שני מטענים הנמצאים בריק, כאשר המטענים נמצאים בתווך (לדוגמה מים או שמן) הכוח משתנה.

## השדה החשמלי

**כוח הפועל על מטען הנמצא בשדה חשמלי  $E$ :**  $F = qE$   
השדה שיוצר מטען נקודתי בכל המרחב:  $E = \frac{kq}{r^2}$   
 $r$  - הוא המרחק מהמטען לנקודה בה מחשבים את השדה. **עקרון הסופרפוזיציה:** השדה השקול בנקודה במרחב הוא סכום וקטורי של כל השדות שיוצרים כל המטענים באותה נקודה.  
פונן שדה: מתארים איכותית את השדה במרחב. כיוון השדה בנקודה משיק לקווי השדה וגודלו בהתאם לצפיפות הקווים.

## חוק גאוס

**צפיפות מטען נפחית  $\rho$ , משטחית  $\sigma$ , אורכית  $\lambda$ , אחידה:**  
 $\rho = \frac{q}{V}, \sigma = \frac{q}{S}, \lambda = \frac{q}{L}$   
 $Q$  - סך המטען שבגוף.  $V$  - נפח הגוף.  $S$  - שטח.  $L$  - אורך.  
**הקבוע דיאלקטרי של הריק:**  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$   
ניתן לרשום את כל הנוסחאות עם  $k$  או עם  $\epsilon_0$ .  
**השטף דרך משטח בשדה אחיד:**  $\phi_E = E_{\perp} \cdot s$   
 $E_{\perp}$  רכיב השדה שמאונך למשטח.  $s$  הוא שטח המעטפת. אם השדה לא אחיד על המשטח ניתן לחלק את המשטח לחתיכות שבהן השדה אחיד ולסכום את השטף דרך כל חתיכה.  
**חוק גאוס:**  
 $\phi_E = 4\pi k Q_{in}$   
 $\phi_E$  - שטף דרך **משטח סגור**.  
 $Q_{in}$  - סך המטען הכלוא בנפח שסוגר המשטח.  
**השדה של כדור וקליפה כדורית** מחוץ לכדור או הקליפה הוא כמו של מטען נקודתי:  $E = \frac{kQ}{r^2}$   
כאשר  $Q$  הוא סך כל המטען.  $r$  הוא המרחק ממרכז הקליפה/כדור.

כיוון השדה הוא בכיוון הרדיאלי (כמו מטען נקי)  
- בקליפה דקה ובכדור מוליך השדה בתוך הקליפה/כדור מוליך הוא אפס.  
שדה של כדור מלא ברדיוס  $R$  הטעון בצפיפות אחידה: בכיוון רדיאלי

$$Q \text{ הוא סך המטען של הכדור } E = \begin{cases} \frac{kQr}{R^3}, & r < R \\ \frac{kQ}{r^2}, & r > R \end{cases}$$

$r$  הוא המרחק ממרכז הכדור

- הקשר בין סך המטען לצפיפות (אחידה) בכדור מלא:  $Q = \frac{4\pi R^3}{3} \rho$   
שדה של תיל אינסופי (אחיד):  $E(r) = \frac{2k\lambda}{r}$   
 $r$  - מרחק מהתיל.  $\lambda$  - צפיפות מטען ליחידת אורך של התיל  
- כיוון השדה רדיאלי (במאונך לתיל וכלפי חוץ/פנים עבור מטען חיובי/שלילי).  
- שדה של קליפה גלילית מתאפס בתוך הקליפה וכמו של תיל מחוץ לקליפה.

**שדה של גליל מלא ברדיוס  $R$  הטעון בצפיפות נפחית אחידה  $\rho$ :** (בכיוון רדיאלי)  
 $E = \begin{cases} \frac{\pi k \rho r}{r}, & r < R \\ \frac{2\pi R^2 \rho}{r}, & r > R \end{cases}$

## השדה של מישור אינסופי:

$$E = 2\pi k \sigma = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

כאשר  $\sigma$  היא צפיפות המטען  
ליחידת שטח במישור ( $\sigma = \frac{Q}{S}$ ).  
- כיוון השדה במאונך למישור (החוצה מהמישור עבור מטען חיובי וכלפי המישור עבור מטען שלילי)  
**השדה של שני מישורים אינסופיים עם צפיפות הפוכה**  
הוא  $4\pi k \sigma$  בין המישורים ואפס מחוץ

$$E = 0$$

**תנועה בשדה חשמלי אחיד**

אם השדה אחיד אז יש תנועה בתאוצה קבועה. כמו תנועה בליסטית. **גודל התאוצה** הוא:  
- כיוון התאוצה בכיוון השדה עבור מטען חיובי והפוך לשדה עבור מטען שלילי

## מוליכים

במוליך המטענים חופשיים לזוז.  
**השדה מתאפס** (או ליתר דיוק הכוח) בתוך המוליך. על השפה יכול להיות שדה מאונך לשפה.  
- **המטען הכולל בתוך המוליך מתאפס למעט על השפה** (במצב סטטי).  
- **הפוטנציאל במוליך אחיד** (קבוע).  
**הארקה:** חיבור לקרקע, מאפסת את הפוטנציאל.

## חומרים דיאלקטרים

- חומר דיאלקטרי הוא חומר מבודד (בפשטות, במקרים יותר מורכבים אפשר לדבר גם על חומרים דיאלקטרים מוליכים)  
- בחומר דיאלקטרי יש דיפולים, כאשר החומר נמצא בשדה חשמלי הדיפולים מתיישרים בכיוון השדה ויוצרים שדה נגדי.  
**השדה השקול בתוך החומר** (בהנחה שהחומר אחיד ובעל סימטריה):  $\vec{E}_T = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon_r}$

$\vec{E}_T$  - השדה השקול בתוך החומר, זה השדה שמרגיש מטען בתוך החומר.  $\vec{E}_0$  - שדה שנוצר מהמטען חיצוני (ולא מהדיפולים של החומר).  $\epsilon_r$  - מקדם דיאלקטרי יחסי, קבוע חסר יחידות שתלוי בסוג החומר וקיים בטבלאות.  
- לפעמים נתון **המקדם הדיאלקטרי** (הלא יחסי) והקשר הוא:  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$   
הוא:  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$

**מתח פוטנציאלי ואנרגיה של הכוח החשמלי**  
הכוח החשמלי הוא כוח משמר ולכן האנרגיה של מטען הנע בהשפעת הכוח החשמלי נשמרת.  
**משוואת שימור אנרגיה:**  $\frac{1}{2}mv_i^2 + U_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + U_f$   
 $v_i$  /  $v_f$  - מהירות הגוף בהתחלה / סוף התנועה.  
 $U_i$  /  $U_f$  - האנרגיה הפוטנציאלית בהתחלה / סוף התנועה.  
**אנרגיה פוטנציאלית של שני מטענים נקודתיים** (או אנרגיה פוטנציאלית של מטען נקודתי הנע בהשפעת הכוח החשמלי של מטען נקודתי אחר):  $U = \frac{kq_1q_2}{r}$

- שימו לב להציב גם את סימני המטענים בנוסחה!  
**העבודה שמבצע הכוח החשמלי** שווה למינוס השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של המערכת (או המטען שנע):  
 $W_{\text{חשמלי}} = -\Delta U$   
**העבודה הדרושה להזיז מטען** היא עבודה שאנחנו מבצעים כנגד הכוח החשמלי ולכן היא מינוס העבודה של הכוח החשמלי ושווה לשינוי האנרגיה הפוטנציאלית (וללא מינוס):  $\Delta U = W_{\text{חשמלי}} = -W_{\text{מטען}}$   
**פוטנציאל** הוא אנרגיה ליחידת מטען. הפוטנציאל היא פונקציה מתמטית שאומרת לנו מה תהיה האנרגיה הפוטנציאלית בנקודה מסוימת.  
**האנרגיה של מטען נקודתי הנמצא בנקודה בה הפוטנציאל הוא  $V$ :**  $U = qV$   
**פונקציית הפוטנציאל שיוצר מטען נקודתי במרחב:**  $V = \frac{kq}{r}$   
 $r$  - המרחק מהמטען.

**יחידות** הסטנדרטיות של הפוטנציאל הן וולט [V]. אחד וולט הוא גאול חלקי קולון.  
**סופרפוזיציה:** יש מנת לחשב את הפוטנציאל בנקודה במרחב ניתן לחבר את הפוטנציאל שיוצר כל מטען באותה נקודה. החיבור הוא סקלרי ויותר פשוט מחיבור שדות.  
**מתח:** הפרש פוטנציאלים, מסומן ב  $\Delta V$  אבל לפעמים מסומן גם ב  $V$  לבד כמו הפוטנציאל, כי פוטנציאל בנקודה הוא גם מתח (הפרש פוטנציאלים) מהאפס.

**יחידת המערכת** **וולט** [eV]: יחידת של עבודה/אנרגיה. נוחה לעבודה, לדוגמה: האנרגיה של אלקטרון בפוטנציאל 5 וולט היא פשוט 5 אלקטרון וולט.  $1eV = 1.6 \cdot 10^{-19}J$   
הפרש הפוטנציאלים (או המתח) בשדה אחיד:  $\Delta V = -\vec{E} \cdot \Delta \vec{x} = -|\vec{E}| |\Delta \vec{x}| \cos \alpha$

**פוטנציאל של לוח אינסופי** (כאשר בוחרים פוטנציאל אפס על הלוח):  $U(x) = -2\pi k \sigma x$   
 $\sigma$  - צפיפות המטען המשטחית על הלוח.

$x$  - המרחק מהלוח.  
**הפוטנציאל במוליך** קבוע (אחיד) ושווה לערך על השפה (לא בהכרח אפס)  
**הפוטנציאל של כדור מוליך בכל המרחב:**

$$V(r) = \begin{cases} \frac{kQ}{R}, & r \leq R \\ \frac{kQ}{r}, & r \geq R \end{cases}$$

$Q$  - סך המטען של הכדור  
 $R$  - רדיוס הכדור  
 $r$  - המרחק ממרכז הכדור  
שימו לב שהפוטנציאל בתוך הכדור אינו תלוי במרחק (קבוע).  
הפוטנציאל של כדור "א" כדור "א" הוא כדור מוליך מאוד גדול,  $R = \infty$  ולכן הפוטנציאל אפס.

חיבור של שני מוליכים בחוט מוליך: מאלץ את הפוטנציאלים שלהם להיות שווים (מטען יזרום ממוליך אחד לשני עד השוואת הפוטנציאלים)  
**הארקה:** חיבור מוליך לכדור "א", מאלץ את הפוטנציאל של המוליך להיות אפס (כמו כדור "א").  
**חישוב אנרגיה פוטנציאלית של מערכת שלמה** (העבודה הדרושה לבניית המערכת):

דרך 1: נסכום את העבודות להביא את המטענים אחד אחרי השני. עבור המטען הראשון, העבודה היא אפס (כי אין אף מטען אחד במרחב שיוצר פוטנציאל). עבור המטען השני, העבודה לקרב אותו למטען הראשון\*. עבור המטען השלישי העבודה לקרב לשני המטענים\*\*, וכן הלאה. במקרה של שלושה מטענים החישוב הוא:

$$W = 0 + q_2 \left( \frac{kq_1}{r_{12}} \right) + q_3 \left( \frac{kq_1}{r_{13}} + \frac{kq_2}{r_{23}} \right)$$

דרך 2: נסכום את האנרגיה של כל זוג מטענים במערכת. במקרה של שלושה מטענים:

$$W = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} + \frac{kq_1q_3}{r_{13}} + \frac{kq_2q_3}{r_{23}}$$

## זרם מתח והתנגדות

**זרם** הוא כמות המטען שעוברת ביחידת זמן  
**חישוב זרם קבוע או ממוצע:**  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$   
 $I$  הוא סקלר אבל כיוון הזרם נקבע לפי כיוון תנועת המטענים החיוביים.

- היחידות הסטנדרטיות של זרם הם אמפר  $1A = 1C/sec$   
- בגרף של  $I(t)$  סך המטען שעבר הוא השטח מתחת לגרף.  
- בגרף של  $q(t)$  שיפוע הגרף שווה לזרם. **אם הגרף לינארי ניתן לרשום:**  $q(t) = I \cdot \Delta t + q_0$   
**מהירות סחיפה:**  $I = n_e A q_e v_d$

$n_e$  - מספר האלקטרונים ליחידת נפח.  
 $A$  - שטח חתך של המוליך.  $q_e$  - מטען האלקטרון.  
 $v_d$  - מהירות הסחיפה (מהירות ממוצעת של האלקטרון במוליך)

**מהירות האות החשמלי** היא המהירות שבה ההשפעה של שינוי במקום אחד במעגל מגיעה למקום אחר (לדוגמה, המהירות שבה תידלק נורה כתוצאה מהדלקה של מתג). מהירות האות החשמלי היא מהירות האור והיא גדולה בהרבה מהמהירות הסחיפה.  
מקור מתח במבצע עבודה במעגל חשמלי סגור וגורם לתנועה של המטענים (זרם). **המקור אינו מוסיף מטענים** למעגל.  
**חוק אוהם:**  $V = IR$

$V$  - מתח על הרכיב.  $I$  - זרם ברכיב.  $R$  - התנגדות הרכיב. **נגד:** מוליך שההתנגדות שלו גדולה בהרבה מן החוטים.  
**תלות ההתנגדות במבנה הנגד:**  $R = \frac{l}{A} \cdot \rho$

$l$  - אורך הנגד (הדרך שהמטענים עושים בנגד).  
 $\rho$  - שטח חתך, שטח בנגד המאונך לכיוון הזרם.  
 $A$  - ההתנגדות סגולית, תכונה תלויה בסוג החומר ובטמפרטורה ונתונה בטבלאות.  
**ההתנגדות של נגד משתנה:**

$$R(x) = \rho \cdot \frac{x}{A} = rx$$

כאשר  $x$  הוא אורך הנגד (המשתנה)  
 $r$  - התנגדות ליחידת אורך (בדרך קבוע) ביחידות של אוהם למטר.

$\epsilon = V + Ir$  **כא"מ ומתח הדקים בסוללה לא אידיאלית:**  
 $\epsilon$  - כא"מ, המתח המקסימאלי של הסוללה.  
 $V$  - מתח הדקים.  $r$  - התנגדות פנימית.  $I$  - זרם בסוללה.  
נוסחה נוספת למתח הדקים עם ההתנגדות השקולה ( $R_T$ ):

$$V_{\text{ללא הזרם}} = \frac{\epsilon R_T}{R_T + r}$$

## עבודה אנרגיה והספק ברכיבים במעגל GOOL

העבודה שמתבצעת על מטען  $q$  שעובר בנגד תחת מתח  $V$  היא:  $W = qV = Q$   
כאשר  $Q$  זה החום שנוצר בנגד.

**הספק קבוע או ממוצע:**  $P = \frac{W}{\Delta t}$

$W$  - העבודה שהתבצעה במרווח הזמן  $\Delta t$   
- היחידות הסטנדרטיות של הספק הן וואט:  $1W = 1J/sec$   
**נוסחה נוספת להספק שנכונה גם להספק רגעי:**  
 $P = IV = I^2 R = V^2 / R$

השוויון הראשון נכון לכל רכיב חשמלי והשניים האחרונים (עם R) נכונים רק לנגד.

### חיבור נגדים במעגל

הצד בו הפוטנציאל גבוה בנגד הוא הצד שבו הזרם נכנס לנגד.

חיבור נגדים בטור:

חיבור בטור נעשה כאשר הזרם בנגדים זהה

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

המתח על הנגד השקול שווה לסכום המתחים

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

חיבור נגדים במקביל:

חיבור בטור נעשה כאשר המתח בנגדים זהה

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

הזרם בנגד השקול שווה לסכום הזרמים

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

הספק המעגל הוא סך ההספקים של הנגדים במעגל או ההספק של הנגד השקול.

המקור (בסוללה אידיאלית).

### חוקי קירכהוף

מתאים לפתור מעגלים עם מספר מקורות מתח.

1. סך הזרמים שנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים שיוצאים מהצומת.

2. סכום המתחים בלולאה סגורה שווה לאפס.

נעשה לולאות מתחים עד אשר נעבור על כל הרכיבים במעגל. נוסיף משוואות זרמים ונקבל מערכת משוואות ממנה ניתן למצוא את הזרמים.

### נצילות במעגל החשמלי

נצילות:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$\eta$  - נצילות המעגל.

$P_{out}$  - ההספק המופק/מנוצל ברכיבים השימושיים במעגל

$P_{in}$  - ההספק המושקע (של הסוללה)

### קבלים

קבל הוא רכיב חשמלי היכול לאגור מטען.

קיבול הוא היחס בין המטען על הקבל לבין המתח בו הוא נמצא.

הנוסחה הבסיסית של קבל (הגדרת הקיבול):

$$C = \frac{Q}{V}$$

C - הקיבול של הרכיב. V - המתח בין שני החלקים.

Q - המטען על הלוח החיובי.

יחידות הקיבול הן Farad:

$$1 \cdot \text{Farad} = \frac{1 \cdot \text{Coulomb}}{1 \cdot \text{Volt}}$$

סוגי קבלים נפוצים: קבל לוחות, קבל כדורי וקבל גלילי.

בדרכי נעסוק בקבלים עם שני לוחות (קבל לוחות).

הקיבול של קבל לוחות:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

A - שטח כל לוח. d - המרחק בין הלוחות.

תכונת הקיבול: הקיבול תלוי רק במבנה הגיאומטרי (אף פעם לא יהיה תלוי במטען על הקבל או במתח שנופל עליו)

לכן הוא תמיד קבוע במעגל (אלא אם משנים את המבנה).

סימון הקבל במעגל: --||--

לאחר שעבר זמן רב הקבל מתנהג כמו נתק במעגל: כאשר מחברים קבל למקור הוא מתחיל לאגור מטען, תהליך זה נקרא טעינה. התהליך נפסק כאשר המתח בקבל שווה והפוך למתח המופעל עליו, ברגע זה כבר לא יזרום זרם דרך הקבל. והקבל מתנהג כמו נתק במעגל.

חיבור קבלים במקביל:

$$C_T = C_1 + C_2$$

התנאי לחיבור במקביל הוא שהמתח על הקבלים זהה (וזה גם המתח על הקבל השקול)

המטען על הקבל השקול שווה לסכום המטענים על כל הקבלים.

חיבור קבלים בטור:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

התנאי לחיבור בטור הוא שהמטען על כל הקבלים זהה (וזה גם המטען של הקבל השקול).

המתח על הקבל השקול שווה לסכום המתחים של כל הקבלים.

אנרגיה האגורה בקבל:

$$U_c = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

העבודה שמבצעת הסוללה לטעינת קבל:

$$W = QV = 2U_c$$

חומרים דיאלקטריים בקבל: הכנסת חומר דיאלקטרי לקבל מקטינה את השדה והמתח בקבל ולכן מגדילה את הקיבול.

קיבול של קבל המלא בחומר דיאלקטרי אחיד:

$$C' = \epsilon_r C_0$$

במידה והקבל אינו מלא בחומר אחיד, ניתן לפצל אותו לקבלים חלקיים, לחשב את הקיבול של כל אחד ולחבר זור לפי החוקים של חיבור קבלים בטור או במקביל.

מרוק לגמרי

### הכוח המגנטי - חוק לורנץ

חוק לורנץ - הכוח המגנטי:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

ניתן לחשב את הכוח בשתי דרכים.

- דרך דטרמיננטה (ראו מכפלה וקטורית בוקטורים).

- דרך גודל וכיוון בנפרד, הגודל הוא:

$$F_B = qvB \sin \alpha$$

כאשר  $\alpha$  היא הזווית בין המהירות לשדה. וכיוון לפי כלל יד ימין:

- שימו לב שאתם עם יד ימין!

- כיוון הכוח הוא עבור מטען חיובי (עבור מטען שלילי הכוח בכיוון הפוך).

- לא להפוך את הסדר של האצבע והאמה (עדיף לעשות קודם אקדה).

תנועה בשדה אחיד: מטען q בעל מסה m הנע במהירות v בשדה מגנטי אחיד (המאונך למהירות) עושה תנועה מעגלית, רדיוס המעגל הוא:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

אם v לא מאונך למהירות אז התנועה תהיה בורגית כאשר המעגל יהיה מסביב לשדה, רדיוס המעגל יהיה:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$$

$v \cos \alpha$  היא מהירות ההתקדמות לאורך ציר השדה.

עבודת הכוח המגנטי: תמיד מתאפסת (כי הוא מאונך לתנועה).

השדה המגנטי

סימון וקטור לתוך הדף  $\otimes$  והחוצה מהדף  $\odot$  (אלינו)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

כאשר r הוא המרחק מהתיל.

$$A^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} N/A^2$$

$\mu_0$  מקדם המגנטיות של הריק.

כיוון השדה לפי כלל יד ימין (או הבורג):

היחידות הסטנדרטיות של השדה המגנטי הן T (טסלה).

שדה במרכז של טבעת ברדיוס R:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

קווי שדה של טבעת, דיפול מגנטי (מגנטי):

השדה המגנטי של כדור הארץ:

הצפון הגאוגרפי אינו הצפון המגנטי.

נהוג לחלק את השדה המגנטי לרכיב מקביל ומאונך לכדה"א (לקרקע) כאשר בדרכי מודדים רק את הרכיב המקביל.

שדה של סליל אינסופי:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L}$$

בתוך הסליל השדה אחיד ושווה ל:

N - מספר הליפופים הכולל. L - אורך הסליל.

- ניתן להגדיר גם מספר הליפופים ליחידת אורך של הסליל:

$$n = \frac{N}{L}$$

- כיוון, לפי כלל הבורג כאשר האצבעות בכיוון הזרם והאגודל בכיוון השדה.

חוק אמפר - המשך השדה המגנטי

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{in}$$

חוק אמפר:  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{in}$

הוא סכום לאורך מסלול סגור על הרכיב המקביל למסלול של השדה המגנטי. בדרכי נעבוד במקרים

סימטרים בהם הרכיב המקביל יהיה אחיד לאורך קטעים מהמסלול והחישוב יהיה פשוט לכפול את השדה באורך הקטעים.

$I_{in}$  - סך הזרם שעובר דרך השטח הסגור במסלול.

המקרים של חוק אמפר:

1. תיל/גליל אינסופי (עם זרם בכיוון ציר הסימטריה). נבחר לולאה בצורת עיגול ברדיוס r ו-

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot 2\pi r$$

2. סליל/גליל (עם זרם מעגלי) נבחר לולאה בצורת ריבוע בעל צלע l ו-

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot l$$

3. מישור אינסופי נבחר לולאה בצורת ריבוע בעל צלע l ו-

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot 2l$$

כוח על תיל נושא זרם ובין שני תילים

גודל הכוח הפועל על תיל ישר בשדה אחיד באורך L הנושא זרם I הוא:

$$F = BIL \sin \alpha$$

$\alpha$  - היא הזווית בין השדה לכיוון הזרם.

את כיוון הכוח יש למצוא לפי כלל יד ימין כמו בחוק לורנץ.

על מטען בודד כאשר כיוון הזרם (או כיוון ה-dl) מחליף את המהירות.

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

d - המרחק בין התילים.

כוח משיכה אם הזרמים באותו כיוון ודחייה אם בכיוונים הפוכים

מומנט כוח מגנטי

מומנט הכוח הפועל על מסגרת מלבנית הנמצאת בשדה מגנטי אחיד:

$$\tau = BIS \sin \alpha$$

S - שטח המסגרת.

$\alpha$  - הזווית בין האנך למסגרת לבין השדה.

הערות: לא תלוי בציר הסיבוב. אותה הנוסחה גם עבור לולאה סגורה בכל צורה שהיא.

חוק פאראדי והשראות

$$\epsilon = BLv \sin \alpha$$

כא"מ הנוצר במוט הנע בשדה מגנטי:

כאשר v היא מהירות המוט, L האורך שלו ו- $\alpha$  היא הזווית בין המהירות לשדה.

כיוון הכא"מ הוא בכיוון של הכוח המגנטי הפועל על מטען חיובי בתוך המוט.

חוק פאראדי:

$$\epsilon = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = B_{\perp} \cdot S$$

השוויון השני נכון אם  $B_{\perp}$  אחיד בכל השטח.

הכאמ מתנהג כמו מקור מתח במעגל.

בד"כ נמצא באמצעות החוק רק את גודל הכאמ ואת הכיוון נמצא לפי חוק לנץ.

חוק לנץ: הזרם נוצר בניגוד לשינוי בשטף.

האם השטף גדל או קטן?

נרצה להקטין את השטף

נרצה להגדיל את השטף

ניצור שדה מגנטי בכיוון הפוך לשדה הקיים

ניצור שדה מגנטי באותו הכיוון של השדה הקיים

נמצא את כיוון הזרם שייצור את השדה המתאים לפי כלל יד ימין

הספק של כוח הפועל על גוף בתנועה:

$$P = F \cdot v \cdot \cos \alpha$$

כאשר v היא מהירות הגוף ו- $\alpha$  הזווית בין הכוח למהירות

השראות ברכיב:

$$L = \frac{\phi_B}{I}$$

$\phi_B$  הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו- I הזרם ברכיב.

- ההשראות היא תכונה שתלוייה רק במבנה ולכן היא בדרכי קבועה.

חישוב השראות לפי הגדרה:

1. נניח שזרם I ברכיב.

2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם בתוך הרכיב.

3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב.

4. נציב בנוסחה של ההשראות והזרם יצטמצם.

השראות של סליל:

$$L = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{l}$$

N מספר הליפופים הכולל, l אורך הסליל ו-a רדיוס טבעת

כא"מ ברכיב עם השראות L:

$$\epsilon = -L \dot{I}$$

המתח על סליל (משרר) במעגל:

$$V_L = L \dot{I}$$

הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

### השראות הדדית

השראות הדדית:

$$M_{1,2} = \frac{\phi_{1,2}}{I_2}$$

חישוב השראות הדדית:

1. נניח שזרם  $I_2$  ברכיב 2.

2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם ברכיב 1.

3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב 1.

4. נציב בנוסחה של ההשראות  $I_2$  יצטמצם.

- השראות הדדית תמיד סימטרית  $M_{1,2} = M_{2,1} = M$  ולכן ניתן תמיד לחשב  $M_{1,2}$  ולהסיק על  $M_{2,1}$  (או להפך).

**יחס המתחים בשנאי:**  $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_1}{N_2}$

N הוא מספר הליפופים בכל צד.

## מבוא לגלים

**גלים רוחביים:** ההפרעה בכיוון ניצב להתקדמות (מיתר) גלים אורכיים: ההפרעה בכיוון מקביל להתקדמות (קול) **תווך:** החומר בו מתקדמת ההפרעה

**פונקציית הגל:**  $f(x \pm vt)$ , כאשר  $v$  היא מהירות הגל.

**אנרגיה של גל:**  $E \propto A^2$ ,  $A$  היא האמפליטודה (משרעת)

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

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.

**התאבכות:** סכימה של גלים שנפגשים

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

**גלים מחזוריים:**  $\lambda = v \cdot T$

$\lambda$  - אורך הגל;  $T$  - זמן המחזור;  $v$  - מהירות הגל

**תדירות (מספר המחזורים בשנייה):**  $f = \frac{1}{T}$

**גל הרמוני:**  $y(x, t) = A \cos(kx \pm \omega t + \phi)$

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

**קשרים בין הגדלים השונים:**  $\omega = vk = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

**גל עומד:** מורכב משני גלים נעים זהים הנעים בכיוונים

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

**נקודות צומת (node):** נקודות שלא זזות. אין מהירות גל.

**נקודת טבור (antinode):** אמפליטודה מקסימאלית.

**פעימות:** בפעמיות אחרונות מחברים שני גלים בעלי אותה

אמפליטודה ומקבלים גל בתוך מעטפת (פעימה).

$\Psi_1(t) = A \cos(\omega_1 t)$  &  $\Psi_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$

$\Psi_T(t) = \Psi_1(t) + \Psi_2(t) = 2A \cos(\epsilon t) \cos(\Omega t)$

$\epsilon = \frac{\omega_f - \omega_s}{2}$

$\Omega = \frac{\omega_f + \omega_s}{2}$

תדירות הפעימה היא  $2\epsilon$

מטריצת מומנט ההתמד:

$L_i = \sum_j I_{ij} \omega_j$

$I_{ij} = \sum_k m_k (r_k^2 \delta_{ij} + i \cdot j)$

כאשר  $i, j, k$  מקבלים את הערכים  $x, y, z$

## גלים רוחביים במיתר

**משוואת הגלים:**  $\frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial t^2}$

$T$  - המתוחות במיתר,  $\rho$  - צפיפות המסה ליחידת אורך,

$\psi$  - פונקציית הגל, ההעתק הרוחבי של כל חתיכה במיתר.

**מהירות הגל:**  $v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$

**פתרון המשוואה:**  $\psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + B \sin(kx - \omega t) + C \cos(kx + \omega t) + D \sin(kx + \omega t)$

- אפשרויות נוספות לפתרון (על ידי שימוש בזהויות טריגונומטריות)

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

שתי האפשרויות האחרונות עדיפות לגלים עומדים.

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

## החזרה והעברה

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

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

2. רציפות הכוח:  $F_L = F_R$

אם המתוחות אחידה, אז תנאי 2 הופך לרציפות הגזרות:

$\frac{\partial \psi_L}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \psi_R}{\partial x} \Big|_{x=0}$

$\psi_L(x, t) = \psi_r(x, t) + \psi(x, t)$ ;  $\psi_R(x, t) = \psi_t(x, t)$

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

$\psi_t(x, t) = t\psi\left(\frac{v_1}{v_2}x, t\right)$ ;  $v_1 = \sqrt{\frac{T}{\rho_1}}$ ,  $v_2 = \sqrt{\frac{T}{\rho_2}}$

**מקדם החזרה:**  $r = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} = \frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_2}}{\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}}$

## מקדם העברה:

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

## עכבה

**עכבה (impedance):**  $Z = \sqrt{\rho T} = \frac{T}{v}$

$T$  - מתוחות.  $V$  - 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 וחזרה בפגיעה של גל מתווך 1 ל-2:**

$r = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}$  מקדם החזרה.  $t = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}$  מקדם העברה

**תאום עכבות:**  $r = 0 \rightarrow t = 1 \Leftarrow z_1 = z_2$

## אנרגיה הספק ותנע

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 ביחידת 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 החזרה של האנרגיה:**  $R = \frac{P_1^-}{P_1^+} = r^2 = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2$

**מקדם העברה של האנרגיה:**  $T = \frac{P_2^+}{P_1^+} = \frac{z_2}{z_1} t^2 = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}$

$R + T = 1$

**תנע:** התנע הוא אפס.

## גלים עומדים

**מיתר חצי אינסופי:**

**קצה קשור:**  $\Psi(x=0, t) = 0 \Rightarrow \Psi(x, t) = C \sin(kx) \sin(\omega t + \phi)$

**קצה חופשי:**  $\frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \Rightarrow \Psi(x, t) = C \cos(kx) \cos(\omega t + \phi)$

**מיתר סופי:**

**2 קצוות קשורות:**  $\Psi(x=0, t) = \Psi(x=L, t) = 0$

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

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

**קצה קשור וקצה חופשי:**

$\Psi(x=0, t) = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0$

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

$\lambda_n = \frac{2L}{(n + \frac{1}{2})}$ ;  $f_n = \frac{v}{2L} (n + \frac{1}{2})$

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

**מיתר סופי עם 2 קצוות חופשיים:**

$\frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0$

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

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

**רדיאנט בקרטזיות:**  $\vec{f} = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$

**רדיאנט בגליליות:**  $\vec{f} = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$

**בכדוריות (\*):**  $\vec{f} = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \phi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \phi} \hat{\phi}$

**דיברגנט div בקרטזיות:**  $\vec{r} \cdot \vec{f} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$

**div בגליליות:**  $\vec{r} \cdot \vec{f} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$

**div בכדוריות:**  $\vec{r} \cdot \vec{f} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \phi} \frac{\partial F_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial(F_\phi \sin \phi)}{\partial \phi}$

**רотор (Rot/Curl) בקרטזיות:**

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left( \frac{\partial F_z}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial z} \right) \hat{y} + \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial F_z}{\partial \theta} - \frac{\partial F_\theta}{\partial z} \right) \hat{r} + \left( \frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial r} \right) \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial(r F_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial F_r}{\partial \theta} \right) \hat{z}$$

בכדוריות (\*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \frac{1}{r \sin \phi} \left( \frac{\partial}{\partial \phi} (F_\theta \sin \phi) - \frac{\partial F_\phi}{\partial \theta} \right) \hat{r} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r F_\phi) - \frac{\partial F_r}{\partial \phi} \right) \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left( \frac{1}{\sin \phi} \frac{\partial F_r}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot F_\theta) \right) \hat{\phi}$$

**(\*) שימו לב שהזווית  $\phi$  עם ציר ה-z והזווית  $\theta$  עם ציר ה-x**

**זוויות של אופרטורים:**

$\vec{\nabla}(f + g) = \vec{\nabla}f + \vec{\nabla}g$

$\vec{\nabla}(\vec{A} \cdot \vec{B}) = (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) \vec{B} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) \vec{A}$

$\vec{\nabla} \times (\vec{A} \cdot \vec{B}) = (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \cdot \vec{B} + (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot \vec{A}$

$\vec{\nabla}(\vec{A} \cdot \vec{B}) = \vec{A} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) + \vec{B} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) + (\vec{A} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} + (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{A}$

$\vec{\nabla}(f \cdot g) = (\vec{\nabla}f) \cdot g + (\vec{\nabla}g) \cdot f$

$\vec{\nabla}(f \cdot \vec{A}) = f(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) + \vec{A} \cdot (\vec{\nabla}f)$

## משוואות מקסוול

**הצורה דיפרנציאלית:** ; **הצורה האינטגרלית:**

1. חוק גאוס:  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$ ;  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$

2.  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ ;  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ ; השטף מגנטי על משטח סגור תמיד אפס, אין מטען מגנטי.

3.  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$ ;  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$

מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדי  $\epsilon = -\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{J} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$

4.  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$

חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

## גלים אלקטרומגנטיים

**משוואות הגלים בריק ( $\rho = J = 0$ ):**

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$ ;  $\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2}$

$c$  היא מהירות האור כאשר  $\frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0$

- למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.

- המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \Rightarrow \vec{\nabla}^2 E_x = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_x}{dt^2}$ ;  $\vec{\nabla}^2 E_y = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}$ ; כנל  $z$

- תזכורת ללאפליאן:  $\vec{\nabla}^2 E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$

**פתרון המשוואה עבור רכיב כלשהו של  $\vec{E}$  או של  $\vec{B}$ :**

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

$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$  הוא וקטור הגל, כיוונו הוא כיוון התקדמות הגל.

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

$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  היא התדירות הזוויתית

כאשר  $f$  היא התדירות בהרץ ו- $T$  הוא זמן המחזור.

- הקוסינוס בפתרון זהה לכל הרכיבים של השדה החשמלי והמגנטי, ההבדל בין הרכיבים הוא רק במקדם  $A_i$ .

איך למצוא שדה מגנטי מחשמלי ולהפך:

$\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{k} \times \vec{E}$ ;  $\vec{E} = c \vec{B} \times \vec{k}$

**צורת הגל במרחב:**

השדה החשמלי תמיד מאונך לשדה המגנטי ושניהם תמיד מאונכים לכיוון התקדמות הגל.

$|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$  הוא אורך הגל (המרחק בין שיא לשיא):

השדה החשמלי תמיד מאונך לשדה המגנטי ושניהם תמיד מאונכים לכיוון התקדמות הגל.

$|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$  הוא אורך הגל (המרחק בין שיא לשיא):

יחס הדיספרסיה:  $\omega = c|k|$   
היחס מתקבל מהצבה של הפתרון במשוואת הגלים.

פתרון נוסף (עם פלוס):  $E_i(\vec{r}, t) = A_i \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)$   
במקרה הזה הגל מתקדם בכיוון הפוך ל  $\vec{k}$

**ווקטור פוינטינג והאנרגיה האגורה בשדות GOOL**  
אנרגיה אלקטרו מגנטית האגורה בשדות:

$$U = \int \left( \frac{\epsilon_0 (\vec{E})^2}{2} + \frac{(\vec{B})^2}{2\mu_0} \right) dv$$

צפיפות האנרגיה (אנרגיה ליח' נפח):  $u_{em} = \frac{\epsilon_0 (\vec{E})^2}{2} + \frac{(\vec{B})^2}{2\mu_0}$

ווקטור פוינטינג:  $\vec{s} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$

שטף האנרגיה ליחידת שטח וליחידת זמן.

הקשר בין האנרגיה לווקטור פוינטינג:

$$P + \oint \vec{s} \cdot d\vec{s} = - \frac{dU_{em}}{dt}$$

בצד שמאל עושים אינטגרל של הווקטור פוינטינג על משטח סגור (שטף) ובצד ימין גוזרים בזמן את האנרגיה האגורה בשדות בנפח הכלוא במשטח.

$P$  - ההספק שהולך לחום

הקשר הדיפרנציאלי:  $\vec{E} \cdot \vec{j} + \vec{\nabla} \cdot \vec{s} = - \frac{du_{em}}{dt}$

$\vec{j} \cdot \vec{E}$  היא צפיפות הזרם.  $\vec{E} \cdot \vec{j}$  זה ההספק ליחידת נפח.