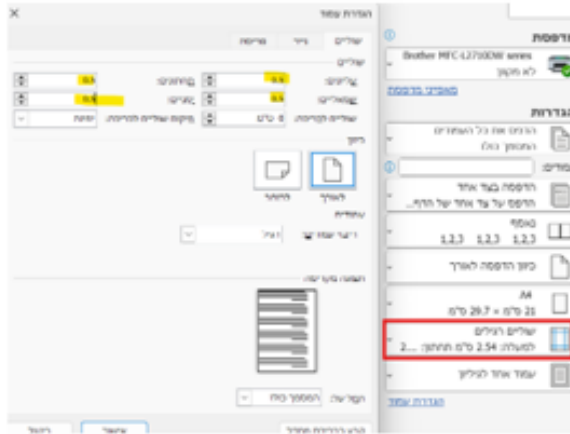


## הוראות לדף הנוסחאות



### הוראות הדפסה!

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמות 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!!

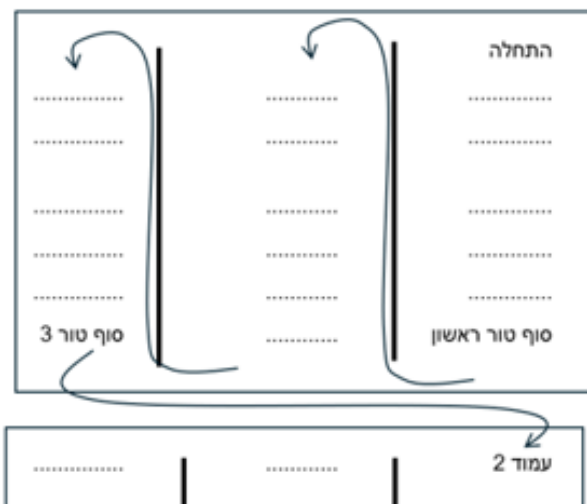
### מבנה הדף:

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.



## משוואת פואסון ולאפלאס

## GOOL

משוואת פואסון:  $\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$

משוואת לפלס:  $\nabla^2 \varphi = 0$

הפליסיאן ( $\nabla^2 f$  או  $\Delta f$ ) של פונקציה סקלרית בקרטזיות:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

בגליליות:

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

בכדוריות:

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \frac{\partial f}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2}$$

כאשר  $\varphi$  היא הזווית עם ציר  $z$ .

## GOOL

## אנרגיה הדרושה לבניית מערכת

$$U = \sum_i \frac{1}{2} q_i \varphi_i = \int \frac{\epsilon_0}{2} E^2 dv$$

- הסכום הוא על כל המטענים כפול הפוטנציאל שהם נמצאים בו.

- בנוסחה עם האינטגרל על השדה אפשר להשתמש רק אם

אין מטענים נקודתיים או התפלגות קווית

$$\mu_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$$

## GOOL

## חומרים דיאלקטריים

חומר דיאלקטרי הוא חומר שמכיל דיפולים. במצב רגיל

כל דיפול לכיוון שונה והשדה הממוצע בחומר הוא אפס.

כשמכנסים את החומר לשדה חצוני הדיפולים מתיישרים

ויוצרים שדה מנוגד לשדה החיצוני.

השדה בתוך חומר דיאלקטרי לינארי ואיזוטרופי:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_{free}}{\epsilon_r}$$

$\vec{E}_{free}$  הוא השדה שנוצר ממטענים חופשיים/מחוץ לחומר.

$\vec{E}$  הוא השדה הכולל בתוך החומר (מהמטענים החופשיים

והדיפולים של החומר).

$\epsilon_r$  או  $\epsilon$  - מקדם דיאלקטרי של החומר - תכונה של החומר

בדרי"כ קבוע וידוע.  $\epsilon_r > 1$  ו-  $\epsilon_r = \epsilon_0$

$\sigma_{free}$  - צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני:

$$\sigma_{free} = \epsilon_0 \Delta E_{free}$$

$\sigma_T$  - צפיפות המטען הכוללת:

$$\sigma_T = \epsilon_0 \Delta E_{\perp}$$

$\sigma_i$  - צפיפות מטען מושרית/קשורה: צפיפות מטען שנוצרת

על שפת החומר הדיאלקטרי מהקיטוב של הדיפולים:

$$\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$$

$\vec{P}$  - וקטור הפולריזציה. צפיפות הדיפולים ליחידת נפח:

$$\vec{P} = N \vec{p}_1$$

$\vec{p}_1$  - מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.

$N$  - מספר הדיפולים ביחידת נפח. יחידות של  $\left[ \frac{1}{m^2} \right]$ .

$$\vec{p} = \int \vec{P} dv$$

מומנט הדיפול הכולל בחומר:

$$\vec{p} = \int \vec{P} dv$$

הקשר בין  $\vec{P}$  לצפיפות המושרית על השפה:

$$\sigma_i \equiv \sigma_b = \vec{P} \cdot \hat{n}$$

כאשר  $\hat{n}$  הוא וקטור יחידה המאונך לשפה כלפי חוץ

מהחומר.

אם  $\vec{P}$  לא אחיד אז יש גם צפיפות מטען מושרית נפחית

$$\rho_i \equiv \rho_b = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$$

בתוך החומר:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

וקטור העתקה:

חוק גאוס למטען החופשי:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_f \Leftrightarrow \oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{in_f}$$

בחומרים לינארים (בדרי"כ בשאלות):

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

חומר איזוטרופי:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0$$

## GOOL

## מעגלי זרם ישר

זרם:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

- כמות המטען שעוברת (דרך שטח חתך) ביחידת זמן.

חוק אוהם - הקשר בין המתח לזרם בנגד:

$$V = IR$$

חיבור נגדים בטור - נגדים עם זרם זהה:

$$R_T = R_1 + R_2$$

כאשר  $R_T$  התנגדות הנגד

השקול.

$$V_T = V_1 + V_2$$

$$I_T = I_1 = I_2$$

כאשר  $V_T$  ו-  $I_T$  הם

המתח והזרם בנגד

השקול.

חיבור נגדים במקביל - נגדים עם מתח זהה:

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

$$I_T = I_1 + I_2$$

$$V_T = V_1 = V_2$$

- עבור יותר משני

נגדים הנוסחאות ממשיות באופן דומה:

$$R_T = \sum R_i, V_T = \sum V_i, I_T = I_i$$

במקביל:  $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}, I_T = \sum I_i, V_T = V_i$

מד זרם (אמפרמטר) אידיאלי - מחובר בטור ובעל

התנגדות זניחה.

מד מתח (וולטמטר) אידיאלי - מחובר במקביל לרכיב

הנמדד, בעל התנגדות מאוד גבוהה.

$$P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

ההספק בנגד:

( $P = IV$ ) נכון לכל רכיב חשמלי, שני השוויונים האחרים

הם לאחר שימוש בחוק אוהם ונכונים רק בנגד.

נתק - מצב בו לא עובר זרם - חוט חתוך או התנגדות

אינסופית.

קצר - מצב בו אין התנגדות

מקור מתח לא אידיאלי:

$$V = \epsilon - Ir$$

$V$  - מתח הדקים, המתח בין קצוות הסוללה או המתח

שמרגיש המעגל - תלוי בזרם.

$\epsilon$  - כא"מ הסוללה, מתח פנימי שאינו משתנה.

$r$  - ההתנגדות הפנימית.

חוקי קירכהוף (לפתרון מעגלים מורכבים):

- נגיד זרם לכל חוט במעגל.

- נרשום משוואות מתחים, סכום המתחים במסלול סגור

שווה לאפס. (להוסיף משוואות עד שעוברים על כל

הרכיבים במעגל).

- נרשום משוואות זרמים, בכל צומת סך הזרם שנכנס

שווה לסך הזרם שיוצא.

- נפתור את מערכת המשוואות.

שיטת קרמר (לפתרון מערכת משוואות):

$$I_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$$

$\Delta$  - דטרמיננטה של מערכת המשוואות ההומוגנית (ללא

הפתרונות). לדוגמה, עבור מערכת המשוואות הבאה:

$$\begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 3 & 5 & 8 \\ 2 & 1 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 5 & 8 \\ 2 & 1 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_6 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_7 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_8 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_9 = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{10} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{12} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{13} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{14} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{15} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{16} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{17} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{18} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{19} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{20} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{21} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{23} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{24} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{25} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

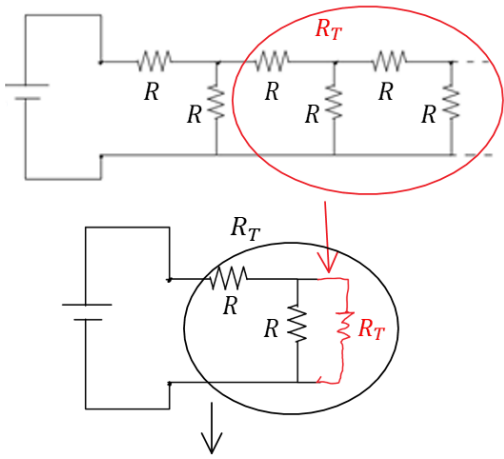
$$\Delta_{26} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{27} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{28} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{29} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{30} = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$



$$R_T = R + \frac{R \cdot R_T}{R + R_T}$$

## GOOL

## חומרים דיאלקטריים

הגדרת הקיבול:  $C = \frac{|q|}{|V|}$

הקיבול היא תכונה קבועה ותלויה רק במבנה הגיאומטרי של הגוף (ולא במתח או במטען על הרכיב).

קיבול של קבל לוחות:

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

$A$  - שטח כל לוח.  $d$  - מרחק בין הלוחות,  $d \ll \sqrt{A}$

שדה בתוך קבל לוחות:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{V}{d}$$

$\sigma$  - צפיפות המטען ליחידת שטח בכל לוח.

$V$  - המתח בין הלוחות.  $d$  - מרחק בין הלוחות.

קיבול של קבל גלילי:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}}$$

a ו- b - רדיוס הגליל הפנימי והחיצוני בהתאמה.

L - אורך הגלילים,  $a, b \ll L$

הקיבול של קבל המלא בחומר דיאלקטרי אחיד:

$$C' = kC_0$$

$k$  (או  $\epsilon_r$ ) - המקדם הדיאלקטרי של החומר.

$C_0$  - הקיבול ללא החומר הדיאלקטרי.

חיבור קבלים בטור (קבלים עם מטען זהה):

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

כאשר  $Q_T = Q_1 = Q_2$  ו-  $V_T = V_1 + V_2$

חיבור קבלים במקביל (מתח זהה):

$$C_T = C_1 + C_2$$

כאשר  $Q_T = Q_1 + Q_2$  ו-  $V_T = V_1 = V_2$

שיטה 1 לחישוב קיבול - לפי הגדרה:

א. נניח שיש מטען  $Q$  על לוחות הקבל.

ב. נחשב את השדה בין הלוחות

ג. נחשב את המתח בין הלוחות

ד. נציב בנוסחה (בדרי"כ  $Q$  יצטמצם)

שיטה 2 לחישוב קיבול - פירוק הקבל לקבלים חלקיים:

א. נפרק את הקבל לקבלים שמחוברים בטור או במקביל

ב. נחשב את הקיבול של כל אחד

ג. נחבר חזרה באמצעות הנוסחאות

$$U_c = \frac{1}{2} q^2 C = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV$$

העבודה שמבצעת הסוללה:

$$W_s = \Delta q V_s = -2\Delta U_c$$

$\Delta q$  הוא המטען שעבר דרכה (זוהי המטען שקיבל הקבל)

הכוח הפועל על חומר דיאלקטרי בקבל:

$$F = \left| \frac{dU_c}{dx} \right|$$

הכוח תמיד מושך את החומר פנימה.

## GOOL

## פריקה וטעינה של קבל

מעגל טעינה:

משוואות המתחים:

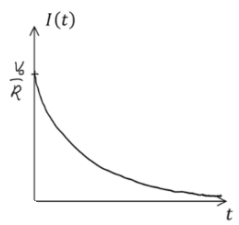
$$V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

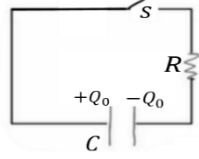
הזרם כחולות בזמן:

$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

בהתחלה ( $t = 0$ ) הקבל מתנהג כמו קצר, המתח והמטען על הקבל הם אפס והזרם הוא  $\frac{V_0}{R}$



לאחר זמן רב ( $t > 5\tau$ ) הקבל מתנהג כמו נתק, המטען והמתח קבועים והזרם מתאפס.



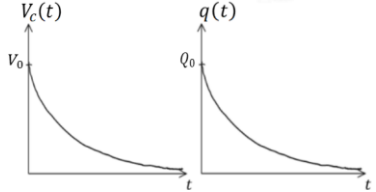
מעגל פריקה:

משוואת המתחים:

$$\frac{q}{C} - IR = 0$$
$$I = -\frac{dq}{dt}$$

המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בפריקה):

$$q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; V_c(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; Q_0 = CV_0$$



הזרם כתלות בזמן בפריקה זהה לטעינה:  $I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$   
מעגלים אינסופיים בקבלים: ראו מעגלים אינסופיים במעגלי זרם ישר.

**GOOL מבנה הנגד וצפיפות זרם**

התלות של ההתנגדות במבנה הנגד:  $R = \rho \frac{L}{S}$   
 $\rho$  - התנגדות סגולית, תלויה בחומר (לא להתבלבל עם צפיפות מטען נפחית).

L - אורך הנגד, הדרך שהמטענים עושים בנגד.  
S (או A) - שטח החתך, משטח שמאונך לכיוון הזרם.  
הערה: שטח החתך וההתנגדות הסגולית צריכים להיות אחידים לאורך הנגד. במידה והם לא אחידים צריך לחלק את הנגד לחתיכות, לחשב התנגדות של כל חתיכה ולסכום לפי סוג החיבור (במקביל/סדר).

מוליכות (לא לבלבל עם צפיפות מטען משטחית):  $\sigma = \frac{1}{\rho}$

צפיפות הזרם ליחידת שטח:  $I = \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$

כאשר האינטגרל הוא על שטח החתך, שטח שמאונך ל- $\vec{J}$ .

אם  $\vec{J}$  אחידה אז:  $I = JS$

חוק אוהם הדיפרנציאלי:  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

כאשר  $\sigma$  היא המוליכות ו- $E$  השדה החשמלי.

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען נפחית בתנועה:

$\vec{J} = \rho \vec{v}$

כאשר  $\rho$  היא צפיפות נושאי המטען ליחידת נפח ו- $\vec{v}$  היא מהירות נושאי המטען. במוליך,  $\rho = nq$  כאשר  $n$  הוא מספר נושאי המטען ליחיד נפח ו- $q$  הוא המטען של נושא מטען יחיד, בד"כ אלקטרון. מהירות המטענים נקראת מהירות הסחיפה  $\vec{v}_{drift}$ .

צפיפות הזרם ליחידת אורך:  $I = \int \vec{k} \cdot d\vec{l}$

כאשר האינטגרל הוא על אורך שמאונך ל- $\vec{k}$

אם  $\vec{k}$  אחידה אז:  $I = kl$

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען משטחית בתנועה:

$\vec{k} = \sigma \vec{v}$

עבור צפיפות מטען ליחידת אורך  $\lambda$  בתנועה נקבל:  $I = \lambda v$

**GOOL 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 אקדח).

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:

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

$\cos \alpha$  היא מהירות ההתקדמות לאורך ציר השדה. עבודת הכוח המגנטי: תמיד מתאפסת (כי הוא מאונך לתנועה).

**GOOL הכוח המגנטי על תיל נושא זרם**

הכוח הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך  $dl$  עם זרם  $I$  הנמצאת בשדה מגנטי  $\vec{B}$  הוא:  $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$

אם התיל ישר בשדה אחיד אז גודל הכוח הוא:  $F = BIL \sin \alpha$

את כיוון הכוח יש למצא לפי כלל יד ימין כמו בחוק לורנץ על מטען בודד כאשר כיוון הזרם (או כיוון ה- $dl$ ) מחליף את המהירות.

הכוח על לולאה סגורה בשדה אחיד מתאפס.

הכוח על תיל בשדה אחיד אינו תלוי בצורת התיל, הכוח יהיה זהה לכוח הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

**GOOL חוק ביו-סבר**

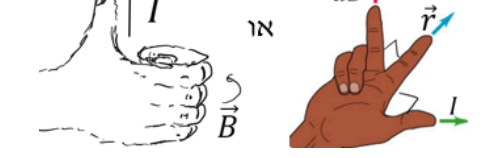
חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

$\vec{r}$  הוא הוקטור מהחתיכה לנקודה בה מחפשים את השדה.

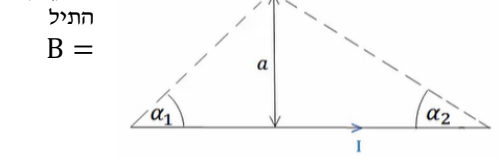
$d\vec{l}$  הוא אורך החתיכה וכיוונו בכיוון הזרם.

חישוב הכיוון לפי כלל יד ימין:



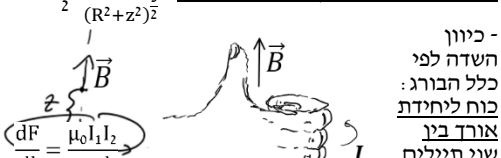
השדה של תיל סופי:  $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$

במרכז התיל  $B =$



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \frac{L}{(\frac{L}{2})^2 + a^2}^{\frac{1}{2}}$$

שדה של טבעת לאורך ציר הסימטריה:  $B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$



כיוון השדה לפי כלל הבורג: כוח ליחידת אורך בין שני תילים מקבילים:

הכוח הוא כוח משיכה אם הזרמים באותו כיוון, ודחייה אם כיוון הזרמים הפוך.

**GOOL חוק אמפר**

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

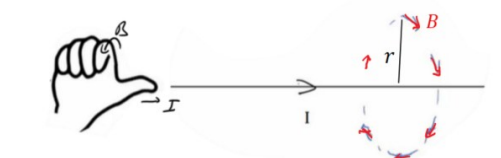
כאשר האינטגרל הוא על הרכיב המשיק של B לאורך מסלול סגור. בדרכי נבחר מקרים בהם B אחיד לאורך המסלול והאינטגרל יהיה B כפול אורך המסלול.

הזרם הוא סך הזרם שעובר דרך השטח הסגור במסלול. המקרים הנפוצים של חוק אמפר:

1. תיל / גליל / מעטפת גלילית אינסופיים.
2. מישור אינסופי.
3. סליל אינסופי / טורואיד.

שדה של תיל אינסופי:  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

כאשר  $r$  הוא המרחק מהתיל.



כאשר הזרם בכיוון  $\hat{z}$  השדה בכיוון  $\hat{\theta}$

שדה של מישור אינסופי:  $\vec{B} = \frac{\mu_0 \sigma v}{2} \begin{cases} -\hat{y}, & z > 0 \\ \hat{y}, & z < 0 \end{cases}$

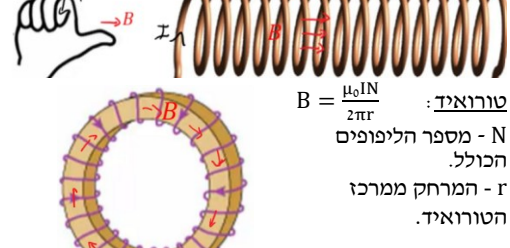
עבור מישור דק הטעון בצפיפות משטחית  $\sigma$  ונע בכיוון  $\hat{x}$  במהירות  $v$ .



שדה של סליל אינסופי/סולנואיד:  $B = \mu_0 n I$

כאשר  $n$  הוא מספר הליפופים ליחידת אורך של הסליל.

כיוון: לפי כלל הבורג, האצבעות בכיוון הזרם והאגודל בכיוון השדה.



מציאת צפיפות זרם

משדה מגנטי נתון (חוק אמפר הדיפרנציאלי):  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$

מציאת צפיפות זרם קווית  $\vec{k}$  משדה מגנטי נתון (כאשר יש אי רציפות בשדה):  $\hat{n}_{1 \rightarrow 2} \times \Delta \vec{B} = \mu_0 \vec{k}$

כאשר  $\hat{n}_{1 \rightarrow 2}$  הוא וקטור יחידה בכיוון הקפיצה מתחום 1 לתחום 2 ו- $\vec{B}_1, \vec{B}_2$  שדה המהירות

בשביל למצא זרם של תיל נחפש שדה המהירות

בוקטור דינמיות גליליות ובאזור הכולל את הראשית ו-1

קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי ( $\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ ) ונקבל

$$I = \frac{C_2 \pi}{\mu_0}$$

**GOOL חוק פאראדיי**

חוק פאראדיי:  $\epsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}; \phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$

הכא"מ מתנהג כמו מקור מתח במעגל.

בד"כ נמצא באמצעות החוק את גודל הכא"מ ואת הכיוון נמצא לפי חוק לנץ.

חוק לנץ: הזרם נוצר בניגוד לשינוי בשטף.

האם השטף גדל או קטן?

נרצה להגדיל את השטף

נרצה להקטין את השטף

ניצור שדה מגנטי באותו הכיוון של השדה הקיים

ניצור שדה מגנטי בכיוון הפוך לשדה הקיים

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

הספק של כוח הפועל על גוף בתנועה:  $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$

כאשר  $\vec{v}$  היא מהירות הגוף (שימו לב למכפלה הסקלרית)

כא"מ הנוצר במוט הנע בשדה מגנטי:  $\epsilon = BLv \sin \alpha$

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

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

**GOOL מומנט דיפול מגנטי**

דיפול מגנטי הוא לולאת זרם סגורה.

מומנט הדיפול המגנטי  $\vec{\mu}$  לפעמים מסומן ב- $\vec{m}$ :  $\vec{\mu} = I \vec{A}$

הזרם בלולאה.  $\vec{A}$  - השטח הסגור על-ידי הלולאה.

כיוונו במאונך למשטח ובהתאם לכלל יד ימין של הזרם.

השדה שיוצר דיפול מגנטי במרחק הגדול בהרבה מממדי הדיפול:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\vec{\mu} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{\mu}]$$

הדיפול: מומנט כוח שפועל על דיפול מגנטי הנמצא בשדה מגנטי

חיצוני:  $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$

האנרגיה הפוטנציאלית של דיפול מגנטי בשדה מגנטי

חיצוני:  $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

**GOOL ההשראות ברכיב**

ההשראות ברכיב:  $L = \frac{\Phi_B}{I}$

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

ההשראות היא תכונה שתלויה רק במבנה ולכן היא בד"כ קבועה.

חישוב השראות לפי הגדרה: נניח שזרם  $I$  ברכיב. 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:  $\mathcal{E} = -L \dot{I}$

האנרגיה האגורה בסליל (או בכל רכיב בעל השראות):  $U_L = \frac{1}{2} L I^2$

האנרגיה האגורה בשדה המגנטי:  $U = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV$

- את האינטגרל עושים על כל המרחב.

- זו אותה האנרגיה שמחשבים באמצעות ההשראות (פשוט צורת חישוב אחרת).

- ניתן לחשב השראות דרך השוואה של שתי הנוסחאות האחרונות של האנרגיה (תניחו זרם והוא יצטמצם בסוף).

המתח על סליל (משורר) במעגל:  $V_L = L \dot{I}$

הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

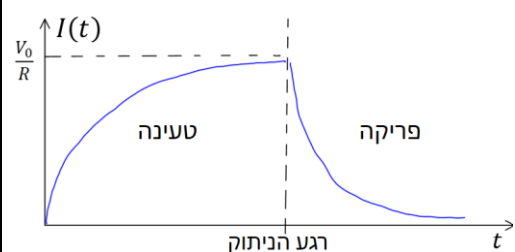
מעגלי RL טעינה:

$V_0 - IR - L \dot{I} = 0$   
 $I(t) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$   
 $\tau = \frac{L}{R}$

- סליל (או משרר) מתנהג בהתחלה כמו נתק ולאחר זמן רב כמו קצר.

פריקה:  $-IR - L \dot{I} = 0$

$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$



חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:

בטור:  $L_T = L_1 + L_2 + \dots$

כאשר  $V_T = V_1 = V_2 = \dots$  ו-  $I_T = I_1 = I_2 = \dots$

במקביל:  $\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$

כאשר  $V_T = V_1 = V_2 = \dots$  ו-  $I_T = I_1 + I_2 + \dots$

השראות הדדית

השראות הדדית:  $M_{1,2} = \frac{\Phi_1}{I_2}$

חישוב השראות הדדית:

1. נניח שזרם זרם  $I_2$  ברכיב 2.

2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם ברכיב 1.

3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב 1.

4. נציב בנוסחה של ההשראות ו-  $I_2$  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:  $\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_1}{N_2}$

N הוא מספר הליפופים בכל צד.

הפוטנציאל הוקטורי

חומרים פאראמגנטיים: חומרים המחזקים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים בעלי אטומים עם מס אלק' לא זוגי, לאטומים אלו דיפול מגנטי כתוצאה מסיבוב האלקטרון ה"נוסף".

הדיפולים מתיישרים לכיוון השדה החיצוני ומגבירים אותו.

חומרים דיאמגנטיים: חומרים המקטינים את השדה החיצוני. בד"כ חומרים ללא מומנט דיפול טבעי של האטומים. נוכחות השדה החיצוני גורמת ליצירת מומנט דיפול הפוך לשדה הקיים (על ידי שינוי מהירות הסיבוב של האלקטרון) ובכך להחלשת השדה החיצוני.

חומרים פרומגנטיים: חומרים בהם הקיטוב המגנטי נשמר גם כאשר השדה החיצוני נפסק. הקיטוב תלוי "בהיסטוריה" של החומר.

אפקט פרומגנטי << דיאמגנטי >> פאראמגנטי.

וקטור המגנטיזציה  $\vec{M}$ : מומנט דיפול ליחידת נפח בחומר (יחידות של מומנט דיפול מגנטי חלקי נפח):  $\vec{M} = N \vec{m}_1$

N הוא מספר הדיפולים ליחידת נפח בחומר.

$\vec{m}_1$  הוא מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.

מומנט הדיפול הכולל של החומר:  $\vec{m} = \int \vec{M} dV$

צפיפות זרם קשורה: ניתן לחשב את השדה המגנטי שיוצרים הדיפולים באמצעות חישוב השדה של צפיפות זרם קשורה.

$\vec{J}_b = \vec{\nabla} \times \vec{M}$ ;  $\vec{k}_b = \vec{M} \times \hat{n}$

$\hat{n}$  וקטור המאונך לשפת החומר וכלפי חוץ.

צפיפות זרם כוללת וחופשית: ניתן להפריד את צפיפות הזרם הכוללת לשני חלקים

כאשר  $\vec{J}_{free}$  היא צפיפות הזרם הנובעת ממטענים חופשיים לזוז בחומר ו-  $\vec{J}_b$  נובעת מהמגנטיזציה.

הוקטור  $\vec{H}$ :  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

- הוקטור  $\vec{H}$  מקיים את חוק אמפר עבור הזרמים החופשיים:  $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_{free}$ ;  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{in free}$

הדיברגנט של  $\vec{H}$ :  $\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$

חומרים לינאריים:  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ ;  $\vec{B} = \mu \vec{H}$

כאשר  $\chi_m$  היא הסוסטביביליות המגנטית, תכונה שתלויה בחומר ובדרי"כ קבועה.  $\mu$  היא הפרמאביליות המגנטית כך ש:  $\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$

תנאי שפה:

1.  $H_{2\perp} - H_{1\perp} = -(M_{2\perp} - M_{1\perp})$

2.  $\vec{H}_{2\parallel} - \vec{H}_{1\parallel} = \vec{k}_{free} \times \hat{n}_{1 \rightarrow 2}$

3.  $B_{2\perp} = B_{1\perp}$

4.  $\vec{B}_{2\parallel} - \vec{B}_{1\parallel} = \vec{k}_T \times \hat{n}_{1 \rightarrow 2}$

הכי נוה להשתמש בתנאים 2 ו-3 ואלו מספיקים בשביל למצא את כל הרכיבים של כל השדות בהנחת הלינאריות או בהינתן המגנטיזציה.

מודל המטען המגנטי:

אם  $\vec{J}_{free} = 0$  אז  $\vec{H}$  שדה משמר וניתן להגדיר פונקציית פוטנציאל מגנטי:

$\vec{H} = -\vec{\nabla} \phi_m$

את הפוטנציאל (או השדה) ניתן למצא כמו שמוצאים פוטנציאל באלקטרוסטטיקה ממטען (באמצעות חוק גאוס, חוק קולון, משוואת לפלס או כל שיטה אחרת), כאשר

"המטען" המגנטי הוא:  $\rho_m = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$

משוואת לפלס:  $\vec{\nabla}^2 \phi_m = -\rho_m$

- המודל תקף גם אם יש  $\vec{k}_{free}$  (זרם חופשי על השפה).

- המודל תקף גם עבור חומרים לא לינאריים.

משוואות מקסוול

הצורה הדיפרנציאלית: 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.  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ ;  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$

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

4.  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$ ;  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{J} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$

מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדי  $\mathcal{E} = -\oint \vec{B} \cdot d\vec{l}$

חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

שדות משתנים בזמן זרם העתקה

ממשוואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמשנתה בזמן יוצר שדה חשמלי ולהפך.

אם נתון שדה מגנטי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה החשמלי אז: נשתמש במשוואה השלישית של מקסוול כמו חוק פאראדי ובמקום הכא"מ נחשב את האינטגרל כאשר

בדרי"כ יש סימטריה גלילית והאינטגרל הופך ל  $E 2\pi r$

אם נתון שדה חשמלי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה המגנטי אז: נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר

רק שבמקום זרם יש  $\int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$  (או במקום צפיפות זרם  $\vec{J}$ )

$\epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$  שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

וקטור פוינטינג והאנרגיה האגורה בשדות

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):  $u_{em} = \frac{\epsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0}$

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

שטף האנרגיה ליחידת שטח וליחידת זמן.

הקשר בין האנרגיה לוקטור פוינטינג בריק:

$\oint \vec{s} \cdot d\vec{l} = -\frac{dU}{dt}$

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

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

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  $\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$

- למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.

- המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \Rightarrow$

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

- 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

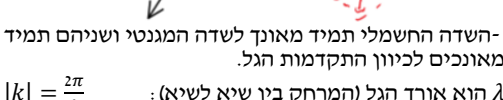
כאשר f היא התדירות בהרץ ו-T הוא זמן המחזור.

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

איד למצא 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):

יחס הדיספרסיה:  $\omega = c|k|$

היחס מתקבל מהצבה של הפתרון במשוואות 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  $\vec{k}$