# פיזיקה 2 חשמל ומגנטיות

## פרק 4 - פוטנציאל

### תוכן העניינים


1. מהו פוטנציאל ..... 1
2. שיטה 1, סופרפוזיציה ..... 3
3. שיטה 2, שאלות חוק גאוס ..... 4
4. שיטה 3, חישוב מפורש ..... 6
5. סיכום ותרגילים נוספים ..... 7

# מהו פוטנציאל:

## רקע:

**פוטנציאל:**

$$\varphi = -\int \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{r}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$$

**אנרגיה פוטנציאלית חשמלית:**

$$U = q\varphi$$

**מתח:**

$$V = \Delta\varphi$$

**עבודה של הכוח החשמלי:**

$$W = -\Delta U = -q\Delta\varphi$$

**עבודה להזיז מטען:**

$$W = \Delta U = q\Delta\varphi$$

**פוטנציאל של מטען נקודתי:**

$$\varphi = \frac{kq}{r}$$

**מוליכים:**

- מטענים חופשיים לזוז.
- השדה (או ליתר דיוק הכוח) יהיה אפס בתוך המוליך.
- על השפה יכול להיות שדה מאונך לשפה.
- המטען הכולל בתוך המוליך הוא אפס (במצב סטטי) למעט על השפה.
- הפוטנציאל במוליך אחיד (קבוע).

**הארקה** - חיבור לקרקע , מאפסת את הפוטנציאל.

## שאלות:

**1) עבודה להביא מטען מהאינסוף**

מהי העבודה הדרושה להביא מטען $Q = 2 \cdot 10^{-6} c$

מהאינסוף למרחק $r = 50 c.m$ ממטען $Q = 3 \cdot 10^{-6} c$

המקובע במקום?

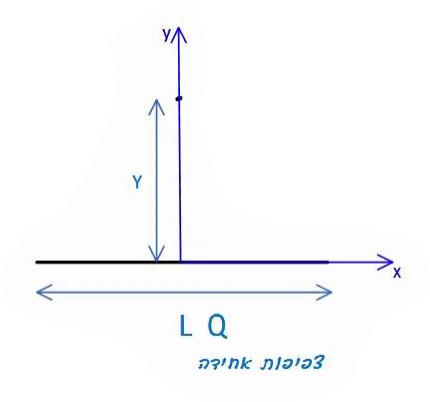
## תשובות סופיות:

**1)** $W = 108 \cdot 10^{-3} J$

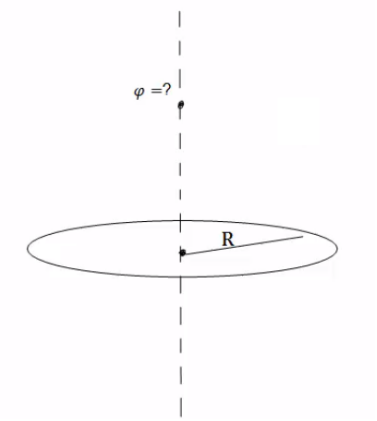
# שיטה 1, סופרפוזיציה:

## שאלות:

1) **שיטה ראשונה, סופרפוזיציה**
תיל באורך L טעון במטען כולל Q המפולג בתיל בצורה אחידה. התיל מונח על ציר ה-$x$.
מצא את הפוטנציאל על ציר ה-$y$ העובר במרכז התיל.




2) **פוטנציאל של טבעת לאורך ציר הסימטריה**
מצא את הפוטנציאל של טבעת ברדיוס R עם צפיפות מטען ליחידת אורך $\lambda$ לאורך ציר הסימטריה.




## תשובות סופיות:

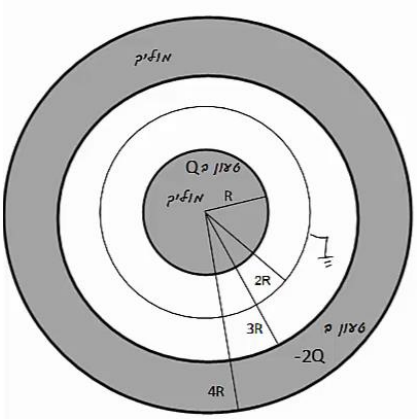
1) $$\varphi = k\lambda \ln \left| \frac{\frac{L}{\alpha} + \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}}{-\frac{L}{\alpha} + \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}} \right|$$

2) $$\varphi = \frac{2\pi k \lambda R}{\sqrt{R^2 + z^2}}$$

# שיטה 2, שאלות חוק גאוס:

## שאלות:

**1) דרך שניה, שאלות חוק גאוס**



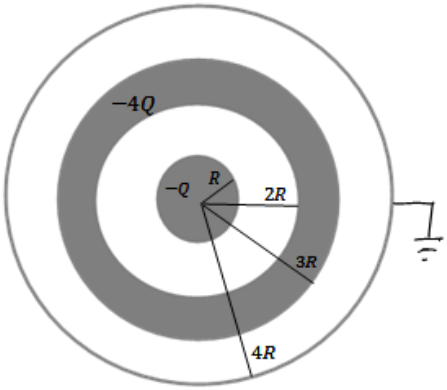

כדור מוליך בעל רדיוס R טעון במטען Q.
מסביב לכדור ברדיוס 2R, נמצאת מעטפת כדורית דקה, מוליכה ומוארקת.
כל המערכת מוקפת במעטפת עבה ומוליכה עם רדיוס פנימי 3R ורדיוס חיצוני 4R.
המעטפת החיצונית טעונה במטען 2Q- (ראה ציור).
לכדור ולמעטפות מרכז משותף, Q , R נתונים.

א. מהו הפוטנציאל בכל המרחב?
ומהי התפלגות המטען בכל המרחב?

**2) פוטנציאל של קליפה כדורית**

מצא את הפוטנציאל בכל המרחב של קליפה כדורית ברדיוס R הטעונה במטען כולל Q. הנח שהמטען מפוזר בצורה אחידה על השפה.

**3) קליפות גליליות מוליכות**




גליל מוליך בעל רדיוס R ואורך L טעון במטען Q-.
סביב הגליל נמצאת קליפה גלילית עבה מוליכה, בעלת רדיוס פנימי 2R ורדיוס חיצוני 3R.
אורך הקליפה הוא L גם כן.
הקליפה טעונה במטען כולל של 4Q-.
מסביב לקליפה העבה נמצאת קליפה דקה מוליכה ומוארקת ברדיוס 4R ואורך זהה.
הנח כי $L >> R$ ולקליפות ציר מרכזי משותף.

א. כיצד מתפלג המטען במערכת?

ב. מה הפוטנציאל בכל המרחב?

ג. פרוטון בעל מסה $m_p$ ומטען |e| משוחרר ממנוחה במרחק r=2R.
מהי מהירות הפרוטון לאחר שעבר מרחק R?

**4) שדה ופוטנציאל של כדור מלא**

נתון כדור מלא בעל רדיוס R וצפיפות מטען נפחית אחידה $\rho$.

א. מצא את פונקציית השדה בכל המרחב.

ב. מצא את פונקציית הפוטנציאל בכל במרחב.

## תשובות סופיות:

**1)** א. פוטנציאל: $\varphi=\begin{cases}C_1 & r<R\\ \frac{kQ}{r}+C_2 & R<r<2R\\ \frac{k(Q+q)}{r}+C_3 & 2R<r<3R\\ C_4 & 3R<r<4R\\ \frac{k(q-Q)}{r}+C_5 & 4R<r\end{cases}$ התפלגות: ראה סרטון

**2)** $\varphi=\begin{cases}\frac{KQ}{R} & r<R\\ \frac{KQ}{r} & R>r\end{cases}$

**3)** א. ראה סרטון

ב. $\varphi=\frac{Q}{2\pi L\varepsilon_0}\cdot\begin{cases}\ln\frac{1}{2}+5\ln\frac{3}{4} & r<R\\ \ln\frac{r}{2R}+5\ln\frac{3}{4} & R<r<2R\\ 5\ln\frac{3}{4} & 2R<r<3R\\ 5\ln\frac{r}{4R} & 3R<r<4R\\ 0 & 4R<r\end{cases}$

ג. $v=\sqrt{\frac{|e|Q\ln 2}{\pi L\varepsilon_0 m_p}}$

**4)** א. $E=\begin{cases}\frac{\rho r}{3\varepsilon_o}\hat{r} & r<R\\ \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2}\hat{r} & R<r\end{cases}$

ב. $\varphi=\begin{cases}-\frac{\rho r^2}{6\varepsilon_o}+C_1 & r<R\\ -\left(-\frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r}\right)+C_2 & R<r\end{cases}$

# שיטה 3, חישוב מפורש:

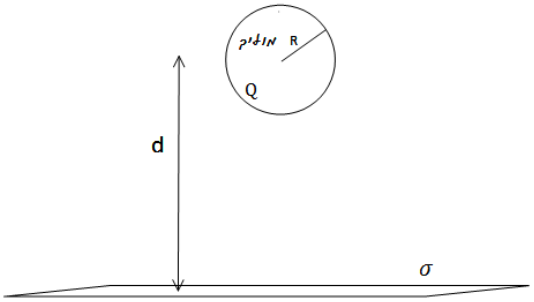
## שאלות:

**1) דרך שלישית, חישוב מפורש**

נתון משטח אינסופי הטעון בצפיפות מטען משטחית $\sigma$.

במרחק d מעל המשטח ממוקם כדור מוליך בעל רדיוס R ומטען Q.

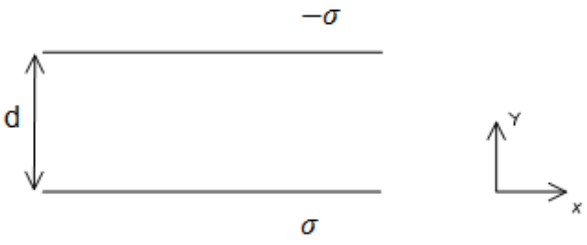
מצא את הפרש הפוטנציאלים בין המישור לבין שפת הכדור.




**2) מתח בין לוחות**

מצא את הפרש הפוטנציאלים בין שני לוחות, כאשר לוח אחד טעון בצפיפות מטען אחידה ליחידת שטח $\sigma$ והלוח השני טעון בצפיפות אחידה ליחידת שטח $-\sigma$.

נתון כי המרחק בין הלוחות הוא d וכי שטח הלוחות גדול בהרבה מהמרחק ביניהם.




## תשובות סופיות:

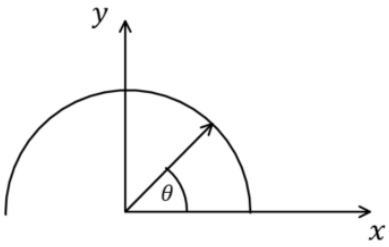
**1)** $\Delta\varphi_{B\to A}=-\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}(d-R)+\frac{kQ}{R}-\left[Q+\frac{KQ}{\lambda}\right]$

**2)** $V=|E|d$

# תרגילים נוספים:

## שאלות:

**1) חישוב פוטנציאל במרכז חצי טבעת עם צפיפות משתנה**




תיל מכופף לחצי טבעת ברדיוס R. מרכז הטבעת (או מרכז המעגל השלם) הוא בראשית הצירים וחצי הטבעת נמצאת בחלק החיובי של ציר ה-$y$ (ראו איור).
חצי הטבעת טעונה בצפיפות מטען לא אחידה ליחידת אורך: $\lambda(\theta)=\lambda_0\sin\theta$ כאשר $\theta$ והיא הזווית עם ציר ה-$x$ החיובי ו- $\lambda_0=2\cdot10^{-12}\frac{C}{m}$.
מצאו את הפוטנציאל בראשית.

**2) יצירת היסוד קיריום**

בשנת 1944 המדענים גלן סיבורג (חתן פרס נובל לכימיה), ראלף ג'יימס ואלברט גיורסו ייצרו לראשונה את היסוד הכימי שמספרו 96 וקראו לו "קיריום" על שם מארי קירי. לשם כך הם "הפציצו" גרעינים של פלוטוניום (שמספרו האטומי 94 , כלומר יש לו 94 פרוטונים) בגרעיני הליום – 4 (בהם יש 2 פרוטונים ושני נויטרונים), והמסה שלו היא: $M=6.6\times10^{-27}\,\text{kg}$.

א. אפשר להתייחס בקירוב אל גרעין הפלוטוניום כאל כדור ברדיוס: $R=7\times10^{-15}\,\text{m}$, בו המטען של 94 הפרוטונים מפוזר באופן אחיד בנפחו.
אם כך, מה הפוטנציאל על פניו (יחסית לאינסוף)?

ב. מה צריכה להיות האנרגיה של גרעין ההליום בשביל שהוא יוכל להגיע אל פני גרעין הפלוטוניום?
תנו את התשובה גם ביחידות eV וגם ביחידות J .

ג. מה צריכה להיות המהירות שלו רחוק מהגרעין ("באינסוף")?

ד. באיזה מרחק ממרכז הגרעין המהירות שלו יורדת ל-80% מהמהירות בסעיף ג'?

### 3) דיפול

במרחב נמצאים שני מטענים:

$q_1=-q$ בנקודה $\vec{r}_1=-a\hat{y}=(-a,0,0)$

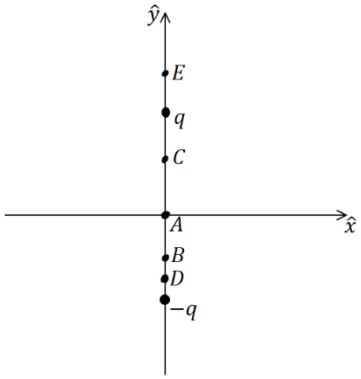
$q_2=-q$ בנקודה $\vec{r}_2=a\hat{y}=(a,0,0)$

א. מה הפוטנציאל (יחסית לאינסוף), ומה השדה החשמלי בכל אחת מהנקודות הבאות: $\vec{r}_A=0$ , $\vec{r}_B=-\frac{1}{2}a\hat{y}$ , $\vec{r}_C=\frac{1}{2}a\hat{y}$ , $\vec{r}_D=-\frac{3}{4}a\hat{y}$ , $\vec{r}_E=\frac{3}{2}a\hat{y}$ ?

ב. היכן הפוטנציאל (יחסית לאינסוף) מתאפס?
תארו את המקום הגאומטרי של כל הנקודות בהן זה קורה.

ג. ציירו גרפים סכמתיים של הפוטנציאל לאורך ציר $y$ ולאורך שני צירים שמקבילים לציר $y$ בשני מרחקים שונים.

ד. ציירו את קווי השדה ואת המשטחים שווי הפוטנציאל.




### 4) מטען q ומטען 3q

במרחב נמצאים שני מטענים.

מטען 3q בנקודה $(a,0,0)$ ומטען $-q$ בנקודה $(-a,0,0)$.

א. מה הפוטנציאל $\varphi$ (יחסית לאינסוף) ומה השדה החשמלי בראשית הצירים.

ב. מצאו על ציר $x$ שתי נקודות בהן הפוטנציאל מתאפס.

ג. מה השדה החשמלי בשתי הנקודות שמצאתם בסעיף ב'?

ד. הראו שהמקום הגאומטרי של כל הנקודות בהן הפוטנציאל יחסית לאינסוף מתאפס הוא כדור.
מצאו את הרדיוס שלו ואת מרכזו (בשביל למצוא את הרדיוס והמרכז אפשר להיעזר בתוצאה של סעיף ב').

ה. מצאו איפה השדה החשמלי מתאפס. מה הפוטנציאל שם?

ו. ציירו גרף סכמתי של הפוטנציאל לאורך ציר $x$.
ציינו את המיקומים של נקודות בהן הפוטנציאל ידוע ואת ערכו בהן.

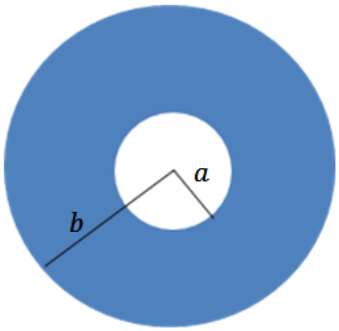
### 5) מטען על השפה בצורה לא אחידה

מטען Q מפוזר בצורה לא אחידה על שפה של קליפה כדורית ברדיוס R.

א. מה הפוטנציאל במרכז הקליפה?

ב. האם ניתן לחשב את הפוטנציאל על השפה?

**6) דסקה עם חור**




בדסקה בעלת רדיוס b קדחו חור במרכזה ברדיוס a.
הדסקה טעונה בצפיפות מטען ליחידת שטח: $\sigma(r)=\frac{D}{r^2}$ , D קבוע לא נתון.

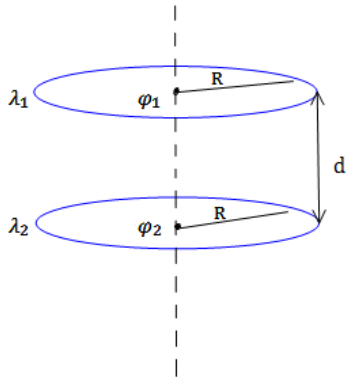
א. מצא את היחידות של D.

ב. מצא את D אם נתון גם המטען הכולל בדסקה Q.

ג. מצא את הפוטנציאל במרכז הדסקה.

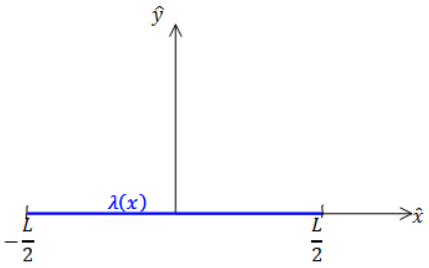
ד. בדוק מה קורה בגבול של $a \to b$.

**7) טבעת מעל טבעת**




שתי טבעות זהות בעלות רדיוס R מונחות האחת מעל ובמקביל לשנייה כך שהמרחק בניהן הוא d.
הטבעת העליונה טעונה בצפיפות מטען ליחידת אורך $\lambda_1$ ונתון כי הפוטנציאל במרכזה הוא $\varphi_1$ .
הטבעת התחתונה טעונה בצפיפות מטען ליחידת אורך $\lambda_2$ ונתון כי הפוטנציאל במרכזה הוא $\varphi_2$ .
מצא את צפיפויות המטען של הטבעות אם נתון כי הפוטנציאל באינסוף מתאפס.

**8) תיל עם צפיפות משתנה**




תיל דק מונח על ציר ה-$x$ כך שמרכזו בראשית הצירים. אורך התיל הוא L והוא טעון בצפיפות מטען ליחידת אורך: $\lambda(x)=\lambda_0\frac{x}{L}$.

א. מצא את המטען הכולל בתיל.

ב. מצא את הפוטנציאל על ציר ה-$x$ למעט בתחום בו נמצא התיל.

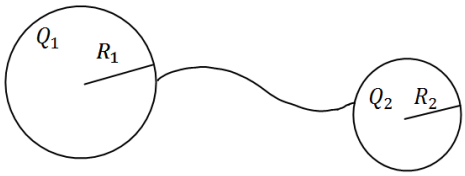
**9) כדור זז מחבר בין שני כדורים**




הכדורים 1 ו-2 בתמונה הם מוליכים המקובעים במקומם וטעונים במטען זהה. הנח שהכדורים מאוד מרוחקים זה מזה וידוע שהכוח הפועל עליהם הוא F. הכדור השלישי גם הוא זהה אך אינו טעון. מצמידים את הכדור השלישי לכדור הראשון וממתינים עד שהמערכת תתייצב. לאחר מכן מנתקים את הכדור השלישי ומצמידים אותו לכדור השני. שוב ממתינים עד שהמערכת תתייצב. לבסוף מרחיקים את הכדור השלישי לגמרי.
מהו הכוח בין הכדורים 1 ו-2 לאחר כל התהליך?

**10) שני כדורים מוליכים מחוברים בחוט**

שני כדורים מוליכים טעונים ונמצאים במרחק גדול מאוד זה מזה.
רדיוסי הכדורים והמטענים שלהם הם: $R_1 , R_2 , Q_1 , Q_2$ .
מחברים בין הכדורים באמצעות חוט מוליך.

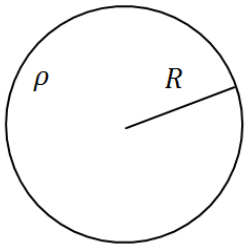



א. מה יהיה המטען על כל כדור לאחר זמן רב?

ב. כמה מטען זרם דרך החוט ולאיזה כיוון?

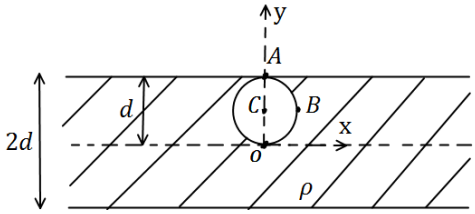
**11) פוטנציאל של גליל מלא טעון בצפיפות אחידה**

מצא את הפוטנציאל בכל המרחב של גליל אינסופי ברדיוס R וצפיפות מטען אחידה ונתונה $\rho$ .




**12) חור במישור**

לוח אינסופי בעובי 2d טעון בצפיפות מטען אחידה וחיובית ליחידת נפח $\rho$ .
בתוך הלוח ישנו חלל כדורי בקוטר d.




א. חשב את השדה החשמלי בנקודות: $O(0,0) , A(0, d) , B(0.5d, 0.5d) , C(0,0.5d)$.

ב. מצא את הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות A ו-B.

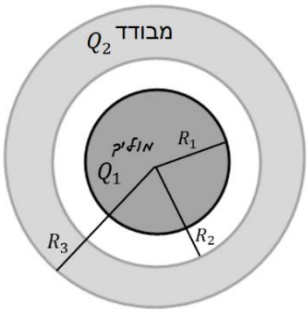
ג. משחררים מטען $q > 0$ בעל מסה $m$ מהנקודה C.

i. לאיזה כיוון יתחיל לנוע המטען אם מתעלמים מהשפעת כוח הכובד?

ii. מהי מהירות המטען רגע לפני שהוא מגיע לדופן החלל?

**13) כדור מוליך מוקף בקליפה מבודדת**

כדור מוליך בעל רדיוס $R_1$ טעון במטען $Q_1$ .
הכדור נמצא במרכזה של קליפה כדורית מבודדת בעלת רדיוס פנימי $R_2$ ורדיוס חיצוני $R_3$.
הקליפה טעונה באופן הומוגני במטען $Q_2$.




א. חשב השדה החשמלי והפוטנציאל בכל המרחב.

ב. חזור על החישוב הזה במקרה שבו הכדור מוארק.

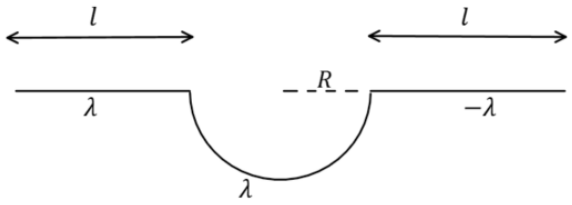
**14) שדה ופוטנציאל במרכז של תיל עם חצי עיגול**

תיל טעון מורכב משלושה חלקים, שני קווים ישרים בעלי אורך l וחצי עיגול ברדיוס R שמחבר ביניהם, ראו איור. החלק הישר השמאלי וחצי העיגול טעונים בצפיפות מטען אחידה $\lambda$ שאינה נתונה. החלק הישר הימני טעון ב $-\lambda$.

א. מצאו את $\lambda$ אם ידוע שסך כל המטען במערכת הוא $Q$.

ב. חשבו את השדה החשמלי במרכז חצי העיגול.

ג. חשבו את הפוטנציאל החשמלי במרכז חצי העיגול.



## תשובות סופיות:

**1)** $3.6\cdot10^{-2}$

**2)** א. $1.93\cdot10^{7}\,\mathrm{V}$ ב. $6.17\cdot10^{-12}\,\mathrm{J}$

ג. $v=4.32\cdot10^{7}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}$ ד. $r=1.95\cdot10^{-14}\,\mathrm{m}$

**3)** א. ראה סרטון ב. $y=0$

ג. ראה סרטון ד. ראה סרטון

**4)** א. פוטנציאל: $\frac{2kq}{\alpha}$ , שדה חשמלי: $-\frac{k4q}{d^2}\hat{x}$ ב. $x_1=-\frac{1}{2}a\ ,\ x_2=-2a$

ג. $x_1=-\frac{kq}{a^2}\cdot\frac{16}{3}\hat{x}\ ,\ x_2=\frac{kq}{a^2}\cdot\frac{2}{3}\hat{x}$ ד. רדיוס: $R=\frac{3}{4}a$ , מרכז: $\left(-\frac{5}{4}a,0,0\right)$

ה. איפוס השדה: $x_2=-3.73a$ , הפוטנציאל בנקודה זו: $0.27\frac{kq}{a}$

ו. ראו סרטון.

**5)** א. $\frac{kQ}{R}$ ב. לא

**6)** א. $[D]=[c]$ ב. $D=\frac{Q}{2\pi\ln\frac{b}{a}}$ ג. $\varphi=\frac{kQ}{\ln\frac{b}{a}}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)$

ד. $\frac{kQ}{a}$

**7)** $\varphi_1=2\pi k\lambda_1+\frac{2\pi k\lambda_2 R}{\sqrt{R^2+d^2}}\ ,\ \varphi_2=2\pi k\lambda_2+\frac{2\pi k\lambda_1 R}{\sqrt{R^2+\left(-d^2\right)}}$

**8)** א. 0 ב. $\varphi=\frac{k\lambda_0}{L}\left(-L+x\ln\left(\frac{x+\frac{L}{2}}{x-\frac{L}{2}}\right)\right)$

**9)** $\frac{3}{8}F$

**10)** א. $q_2'=\frac{R_2\left(Q_1+Q_2\right)}{R_1+R_2}$ ב. אם $\frac{Q_1}{Q_2}>\frac{R_1}{R_2}$ אז המטען עבר משמאל לימין,

אם $\frac{Q_1}{Q_2}<\frac{R_1}{R_2}$ אז עבר מימין לשמאל.

**11)** $$\varphi=\begin{cases}-\frac{\rho}{4\varepsilon_0}\left(r^2-R^2\right) & r\le R\\ -\frac{\rho R^2}{2\varepsilon_0}\ln\frac{r}{R} & r\ge R\end{cases}$$

**12** א. $\vec{E}_O=\frac{\rho d}{6\varepsilon_0}\hat{z}$ , $\vec{E}_A=\frac{5\rho d}{6\varepsilon_0}\hat{z}$ , $\vec{E}_B=\frac{\rho d}{6\varepsilon_0}\hat{x}$ , $\vec{E}_C=\frac{\rho d}{2\varepsilon_0}\hat{z}$

ב. $\frac{3\rho d}{8\varepsilon_0}$ ג. i. למעלה. ii. $V=\sqrt{\frac{2q\rho d^2}{3\varepsilon_0 m}}$

**13** א.
$$\vec{E}=\begin{cases}0 & r<R_1\\ \frac{kQ_1}{r^2}\hat{r} & R_1<r<R_2\\ \frac{k}{r^2}\left(Q_1+Q_2\left(\frac{r^3-R_2^3}{R_3^3-R_2^3}\right)\right)\hat{r} & R_2<r<R_3\\ \frac{k(Q_1+Q_2)}{r^2}\hat{r} & R_3<r\end{cases}$$

ב.
$$\varphi(r)=\begin{cases}C_1 & r<R_1\\ \frac{kQ_1}{r}+C_2 & R_1<r<R_2\\ \frac{kQ_1}{r}-\frac{kQ_2r^2}{2(R_3^3-R_2^3)}-\frac{kQ_2R_2^3}{(R_3^3-R_2^3)r}+C_3 & R_2<r<R_3\\ \frac{k(Q_1+Q_2)}{r}+C_4 & R_3<r\end{cases}$$

**14** א. $\lambda=\frac{Q}{\pi R}$ ב. $\vec{E}=\frac{2K\lambda}{R}\hat{y}+2K\lambda\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{l+R}\right)\hat{x}$

ג. $\varphi=K\lambda\pi$