

# מבוא לפיזיקה 2 ה מספר קורס 400011

פרק 9 - מתח, פוטנציאל ואנרגיה פוטנציאלית חשמלית

תוכן העניינים

1. עבודה ואנרגיה של הכוח החשמלי..... 1
2. פוטנציאל ומתח..... 3
3. פוטנציאל במוליכים..... 5
4. תרגילים נוספים..... 6

## עבודה ואנרגיה של הכוח החשמלי:

### שאלות:

#### (1) עבודה להביא מטען מהאינסוף

מהי העבודה הדרושה להביא מטען  $Q_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  מהאינסוף למרחק  $r = 50 \text{ cm}$  ממטען  $Q_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  המקובע במקום?

#### (2) מטען מגיע עם מהירות מהאינסוף

מטען  $Q_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  בעל מסה  $m = 10^{-3} \text{ kg}$  נע מהאינסוף במהירות  $v_0 = 20 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  כלפי מטען  $Q_2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  המקובע במקום.  
 א. מהו המרחק בו ייעצר רגעית המטען?  
 ב. מהי מהירות המטען כאשר מרחקו  $100 \text{ m}$ ?

#### (3) עבודה להרחיק שני מטענים

חשב את העבודה הדרושה להרחיק שני מטענים:  $Q_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ,  $Q_2 = -4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  ממרחק  $r_1 = 20 \text{ cm}$  למרחק  $r_2 = 40 \text{ cm}$ .  
 בדוק האם הסימן הגיוני.

#### (4) עבודה להכניס מטען לתוך קליפה טעונה

חשב את העבודה הדרושה להביא מטען של  $Q_1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  לתוך קליפה כדורית ברדיוס  $R = 0.8 \text{ m}$  הטעונה בצפיפות מטען משטחית  $\sigma = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$ .

#### (5) עבודה של לוח אינסופי

מטען  $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  נמצא במרחק  $d = 30 \text{ cm}$  מלוח אינסופי הטעון בצפיפות מטען ליחידת שטח  $\sigma = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$ .  
 חשב את העבודה הדרושה להביא את המטען אל הלוח.

**6) מטען זה בין שני לוחות**

שני לוחות גדולים מאוד טעונים בצפיפויות מטען משטחיות הפוכות  $\sigma = \pm 3 \cdot 10^{-3} \frac{C}{m^2}$ .

המרחק בין הלוחות הוא  $d = 5 \text{ cm}$ .

מצא את העבודה הדרושה להעביר מטען של  $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  מהלוח השלילי אל הלוח החיובי. הזנח את השפעת המטען על השדה של הלוחות.

**תשובות סופיות:**

$$W = 108 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (1)$$

$$r = 90 \text{ m} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$v_F \approx 6.32 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ב.}$$

$$W = 0.27 \text{ J}, \quad \text{כ.} \quad (3)$$

$$W = 5.43 \cdot 10^3 - 0 \quad (4)$$

$$W = 170 \text{ J} \quad (5)$$

$$W = 33.9 \text{ J} \quad (6)$$

## פוטנציאל ומתח:

### שאלות:

#### (1) פוטנציאל שיוצר מטען בשתי נקודות

חשב את הפוטנציאל שיוצר המטען  $Q_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ c}$  במרחק  $r_1 = 0.8 \text{ m}$  ובמרחק  $r_2 = 0.3 \text{ m}$  מהמטען. מהי העבודה הדרושה להזיז את המטען  $Q_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ c}$  מהמרחק הראשון למרחק השני?

#### (2) 3 מטענים בפינות של ריבוע

בשלוש פינות של ריבוע מקובעים שלושה מטענים זהים  $Q = 2 \cdot 10^{-5} \text{ c}$ . אורך צלע הריבוע היא  $a = 3 \text{ cm}$ .



- חשב את הפוטנציאל בפינה הרביעית של הריבוע.
- חשב את הפוטנציאל במרכז הריבוע.
- חשב את העבודה הדרושה להזיז את המטען  $q = 3 \cdot 10^{-6} \text{ c}$  ממרכז הריבוע לקצה הריבוע.

#### (3) שני מטענים על משולש שווה צלעות

שני מטענים זהים  $Q_1 = Q_2 = 10^{-6} \text{ c}$  נמצאים על קדקודיו של משולש שווה צלעות בעל אורך צלע  $l = 5 \text{ cm}$ .



- מצא את המתח בין הנקודה A הנמצאת בקודקוד השלישי של המשולש לבין הנקודה B הנמצאת באמצע הצלע המחברת את שני המטענים.
- חשב את העבודה הדרושה להביא מטען של  $q = 5 \cdot 10^{-6} \text{ c}$  מהקדקוד אל אמצע הצלע.

#### (4) פוטנציאל בין לוחות

שני לוחות גדולים מאוד טעונים במטענים בעלי סימן הפוך. ידוע כי כיוון השדה בין הלוחות הוא מהלוח התחתון ללוח העליון.



- איזה מהלוחות טעון במטען חיובי ואיזה במטען שלילי?
- איזה מהלוחות נמצא בפוטנציאל יותר גבוה?
- איזו מהנקודות A ו-B נמצאת בפוטנציאל יותר גבוה?
- איזה מהנקודות A ו-C, הנמצאות באותו גובה, נמצאת בפוטנציאל יותר גבוה?

**5) מתח בין לוחות**

שני לוחות גדולים מאוד נמצאים במרחק  $d_1 = 40\text{cm}$  זה מזה. המתח בין הלוחות הוא  $V = 20\text{V}$ , וידוע כי הלוח העליון נמצא בפוטנציאל גבוה יותר.

א. איזה מהלוחות טעון במטען חיובי ואיזה במטען שלילי?

ב. מהו השדה בין הלוחות (גודל וכיוון)?

ג. מהי העבודה הדרושה להזיז מטען  $Q = 2 \cdot 10^{-6}\text{C}$

מ-A ל-B, אם ידוע שהמרחק בין הנקודות הוא  $d_2 = 5\text{cm}$ ?

ד. מהו המתח בין A ל-B?

ה. מהי העבודה הדרושה להזיז מטען  $Q = 2 \cdot 10^{-6}\text{C}$  מ-A ל-C - הנמצאת באותו

הגובה של A?

**תשובות סופיות:**

$$W = 18.75 \cdot 10^{-2}\text{J} \quad (1)$$

$$W = -27.65\text{J} \quad \text{ג.}$$

$$V_B = 25.46 \cdot 10^6\text{V} \quad \text{ב.}$$

$$V_A = 16.24 \cdot 10^6\text{V} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$W_{A \rightarrow B} = 1.8\text{J} \quad \text{ב.}$$

$$V_{BA} = 3.6 \cdot 10^5\text{V} \quad \text{א.} \quad (3)$$

(4) א. הלוח הטעון במטען חיובי נמצא למטה, והשלילי למעלה.

ב. התחתון. ג. B. ד. הפוטנציאל שווה.

$$E = 50 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad \text{ב.}$$

(5) א. הלוח הטעון במטען חיובי נמצא למעלה, והשלילי למטה.

ה. 0

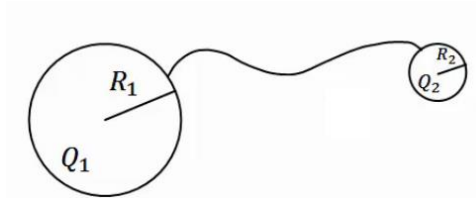
$$V_{AB} = 2.5\text{V} \quad \text{ד.}$$

$$-W_{AB} = -5 \cdot 10^{-6}\text{J} \quad \text{ג.}$$

## פוטנציאל במוליכים:

### שאלות:

#### (1) שני כדורים מוליכים מחוברים



שני כדורים מוליכים בעלי רדיוסים  $R_1, R_2$  נמצאים במרחק גדול מאוד אחד מהשני. הכדורים טעונים במטענים  $Q_1, Q_2$  בהתאמה. מחברים את הכדורים באמצעות חוט מוליך. מה היה המטען על כל כדור לאחר זמן רב?

#### (2) מטען נקודתי במרכז קליפה מוארקת

מטען נקודתי  $Q$  נמצא במרכזה של קליפה (חלולה) כדורית דקה ומוליה ברדיוס  $R$ . מהו המטען על הקליפה אם ידוע שהיא מוארקת?

### תשובות סופיות:

$$q_1' = (Q_2 + Q_1) \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad q_2' = (Q_2 + Q_1) \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$q = Q \quad (2)$$

## תרגילים נוספים:

### שאלות:

#### (1) אנרגיה חשמלית של מערכת

מצא את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של שני מטענים זהים:  $Q_1 = Q_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  הנמצאים במרחק 80 ס"מ זה מזה.

#### (2) מטענים בפינות ריבוע



בארבעת הפינות של ריבוע בעל צלע  $a = 0.5 \text{ m}$  ישנם מטענים זהים שגודלם הוא:  $Q = 2 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ .

א. מהי העבודה הדרושה לבניית המערכת?

ב. מהו הפוטנציאל בנקודה הנמצאת באמצע אחת מצלעות הריבוע?

ג. מהי העבודה הדרושה להבאת מטען  $q = 3 \cdot 10^{-8} \text{ C}$  לנקודה מסעיף ב'?

ד. מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המערכת לאחר סעיף ג'?

#### (3) מטען שמאפס פוטנציאל בקודקוד



בשני קודקודיו של משולש שווה צלעות נמצאים

מטענים זהים שגודלם הוא:  $Q = 2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ .

מטען נוסף,  $q$ , מונח במרכז הצלע שביניהם.

אורך הצלע של המשולש הוא:  $l = 20 \text{ cm}$ .

א. מצא את גודלו של המטען  $q$  כך שהפוטנציאל

בקודקוד השלישי יתאפס.

ב. חזור על סעיף א' אם המטען  $q$  נמצא במרכז של צלע אחרת במשולש.

#### (4) פוטנציאל בנקודה מסוימת

בנקודה מסוימת קיים פוטנציאל של 15V.

א. מהי העבודה להביא מטען בוחן מהאינסוף לנקודה זו?

ב. מהי העבודה הדרושה להביא מטען של  $Q = -3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  לנקודה זו?

ג. מהי העבודה הדרושה להביא מטען של  $Q = -3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  מפוטנציאל

של  $V = 5 \text{ V}$  לנקודה זו?

ד. מהי העבודה הדרושה להביא מטען של  $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  מנקודה זו

לפוטנציאל של 10V?

**(5) עבודה לא תלויה במסלול**

מטען נקודתי  $Q_1 = 10^{-5} \text{ c}$  ממוקם בראשית הצירים.

מטען נקודתי נוסף  $Q_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ c}$  ממוקם ב- $(0.8\text{m}, 0)$ .

א. מצא את הפוטנציאל בנקודות:  $A(1.5\text{m}, 0)$ ,  $B(1.5\text{m}, 1\text{m})$ ,  $C(0.8\text{m}, 1\text{m})$ .

ב. מהי העבודה הדרושה להעביר את המטען  $q = 3 \cdot 10^{-6} \text{ c}$  מנקודה A ל-B?

ג. מהי העבודה הדרושה להעביר את אותו המטען מנקודה B אל נקודה C?

ד. מהי העבודה הדרושה להעביר את אותו המטען מנקודה A לנקודה C, דרך הקו הישר בין הנקודות?

**(6) אלקטרון מואץ בהפרש פוטנציאליים**

אלקטרון מואץ בהפרש פוטנציאליים של  $300\text{V}$ . האלקטרון מתחיל תנועתו ממנוחה.

א. מהו ההפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של האלקטרון בתחילת התנועה לסוף התנועה, ביחידות של אלקטרון וולט וביחידות של ג'אול?

ב. מהי מהירות האלקטרון בסוף התהליך?

$$q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ c}, m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

**(7) פרוטון נע בין לוחות**

שני לוחות גדולים בעלי שטח  $A = 2\text{m}^2$  נמצאים במרחק  $d = 10\text{cm}$  אחד מהשני.

טוענים את אחד הלוחות במטען  $Q = 6 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ , ואת הלוח השני במטען זהה והפוך בסימנו.

א. חשב את צפיפות המטען ליחידת שטח על כל לוח.

ב. מהו השדה בין הלוחות?

ג. מהו המתח בין הלוחות?

ד. פרוטון משוחרר ממנוחה קרוב מאוד ללוח החיובי.

מהי מהירות הפרוטון בהגיעו ללוח השלילי?

$$q_p = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ c}, m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

**(8) פוטנציאל של כדור מוליך**

כדור מוליך שרדיוסו  $R = 20\text{cm}$  טעון במטען  $Q = 3 \cdot 10^{-6} \text{ c}$ .

א. מהו השדה החשמלי במרחק  $r_1 = 25\text{cm}$  ובמרחק  $r_2 = 15\text{cm}$  ממרכז הכדור?

ב. מהו הפוטנציאל באותם מרחקים?

**9 מטענים על קליפות**

במערכת הבאה ישנם שתי קליפות כדוריות מוליכות, דקות, ברדיוסים  $a$ ,  $b$ . הקליפה החיצונית מוחזקת במתח  $V_0$  והקליפה הפנימית מוארקה. השתמש בפוטנציאל של קליפה כדורית בודדת ובעקרון הסופרפוזיציה וחשב את המטען על כל קליפה.

**10 מתח בין שני כדורים מוליכים**

שני כדורים מוליכים, בעלי רדיוסים:  $R_1 = 1\text{m}$  ו-  $R_2 = 1.4\text{m}$ , טעונים במטענים:  $Q_1 = 2 \cdot 10^{-6}\text{C}$  ו-  $Q_2 = 6 \cdot 10^{-6}\text{C}$ .

- א. מהו הפרש הפוטנציאלים בין שפות הכדורים, אם הם מרוחקים מאוד זה מזה.  
 ב. מהו הפרש הפוטנציאלים בין שתי הנקודות הכי קרובות של הכדורים, אם המרחק בין מרכזיהם הוא  $d = 5\text{m}$ .  
 הנח שהתפלגות המטען על כל כדור עדיין אחידה.

**11 שני מטענים מתרחקים**

שני גופים בעלי מסות  $m_1 = 20\text{gr}$  ו-  $m_2 = 60\text{gr}$  ומטענים ו-  $Q_2 = 6 \cdot 10^{-6}\text{C}$  נמצאים במרחק  $r_1 = 80\text{cm}$  זה מזה, ובמנוחה.

- א. מה תהיה מהירות הגופים כאשר המרחק ביניהם הוא  $r_2 = 1.2\text{m}$ ?  
 ב. מה תהיה מהירות הגופים לאחר זמן רב מאוד?

**12 שני מטענים מתרחקים ומתקרבים**

שני גופים בעלי מסות  $m_1 = 25\text{gr}$  ו-  $m_2 = 50\text{gr}$  ומטענים  $Q_1 = 4 \cdot 10^{-6}\text{C}$  ו-  $Q_2 = -5 \cdot 10^{-6}\text{C}$  נמצאים במרחק  $r_1 = 1\text{m}$  זה מזה.



לגופים מהירות התחלתית כך שאחד מתרחק מהשני.

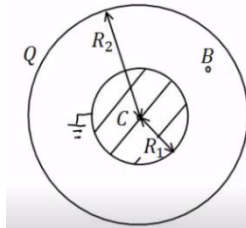
גודל המהירות ההתחלתית של שני הגופים הוא  $v_0 = 5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .

- א. מה תהיה מהירות הגופים כאשר המרחק ביניהם הוא  $r_2 = 5\text{m}$ ?  
 ב. מהו  $v_0$  המינימאלי עבורו הגופים לא יפגשו לעולם?  
 ג. כעת נניח כי  $v_0$  שווה לחצי מהערך שחישבת בסעיף ב'. מהו המרחק המקסימאלי אליו יגיעו הגופים?  
 ד. מצא את מהירות הגופים כאשר  $r_3 = 0.5\text{m}$ .

## 13) 1000 טיפות שמן

1000 טיפות שמן זהות טעונות במטען זהה ונמצאות בפוטנציאל זהה  $v_1$ .  
הטיפות מתחברות לטיפה אחת גדולה. מהו הפוטנציאל של הטיפה הגדולה ( $v_1$  נתון)?  
רמז: ניתן להתייחס לכל טיפה ככדור מוליך.

## 14) כדור מוליך מוארק בתוך קליפה כדורית



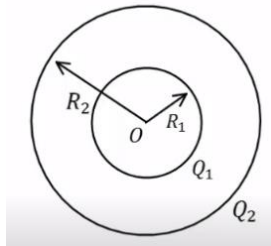
כדור מוליך ברדיוס  $R_1 = 5\text{cm}$ . נמצא בתוך ובמרכזה של קליפה כדורית דקה.

רדיוס הקליפה הוא:  $R_2 = 10\text{cm}$ . והמטען עליה הוא:  $Q = 3 \cdot 10^{-7}\text{C}$ . מאריקים את הכדור.

א. מצא את המטען על שפת הכדור.

ב. מהו הפוטנציאל בנקודות:  $r_A = 20\text{cm}$ ,  $r_B = 7\text{cm}$ ,  $r_C = 0$ ?

ג. מהי העבודה הדרושה להזיז את המטען  $Q = 10^{-10}\text{C}$  מ- $r_A$  ל- $r_C$ ?



## 15) שתי קליפות קוצנטריות מחוברות בחוט

קליפה כדורית (כדור חלול) שהרדיוס שלה  $R_1$  נמצאת בתוך קליפה כדורית שהרדיוס שלה  $R_2$ , ולשתי הקליפות מרכז משותף O (ראה תרשים). הקליפה הפנימית טעונה במטען חשמלי חיובי  $Q_1$ , והקליפה החיצונית טעונה במטען חשמלי חיובי  $Q_2$ . שתי הקליפות עשויות מחומר מוליך.

א. בטא באמצעות נתוני השאלה, את הגודל של השדה החשמלי ששתי הקליפות יוצרות בכל אחת מהנקודות הבאות:

i. הנקודה O.

ii. נקודה הנמצאת מחוץ לקליפה הפנימית, אך קרובה אליה מאוד, מרחקה מ-O ייחשב ל- $R_1$ .

iii. נקודה הנמצאת מחוץ לקליפה החיצונית, אך קרובה אליה מאוד, מרחקה מ-O ייחשב ל- $R_2$ .

ב. בטא באמצעות נתוני השאלה, את הפוטנציאל החשמלי הכולל ששתי הקליפות יוצרות בכל אחת משלוש הנקודות הבאות:

i. הנקודה O.

ii. נקודה על פני הקליפה הפנימית.

iii. נקודה על פני הקליפה החיצונית.

ג. מחברים את שתי הקליפות באמצעות תיל מוליך דק שהתנגדותו זניחה, ולכן חלקיקים טעונים יכולים לעבור ביניהן.

בטא, באמצעות נתוני השאלה, את המטען החשמלי על כל אחת משתי הקליפות לאחר שנפסק הזרם בתיל.

## תשובות סופיות:

$$U \approx 0.101 \text{ J} \quad (1)$$

$$W \approx 6.25 \cdot 10^{-5} \text{ J} \quad \text{ג.} \quad V_A = 20.84 \cdot 10^3 \text{ V} \quad \text{ב.} \quad W \approx 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$W = 3.96 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad \text{ד.}$$

$$q = -2 \cdot 10^{-5} \text{ C} \quad \text{ב.} \quad q = -3.46 \cdot 10^{-5} \text{ C} \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$W = -3 \cdot 10^{-5} \text{ J} \quad \text{ג.} \quad W = 3 \cdot 10^{-7} \text{ J} \quad \text{ב.} \quad W = 15 \text{ J} \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$W = -10^{-5} \text{ J} \quad \text{ד.}$$

$$V_A = 3.17 \cdot 10^5 \text{ V}, V_B \approx 1.97 \cdot 10^5 \text{ V}, V_C = 2.5 \cdot 10^5 \text{ V} \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$W_{AC} = -2.01 \cdot 10^{-1} \text{ J} \quad \text{ד.} \quad W_{B \rightarrow C} = 1.59 \cdot 10^{-1} \text{ J} \quad \text{ג.} \quad W_{AB} = -3.6 \cdot 10^{-1} \text{ J} \quad \text{ב.}$$

$$V_F \approx 1.02 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ב.} \quad \Delta U = -300 \text{ eV} / = 4.8 \cdot 10^{-17} \text{ J} \quad \text{א.} \quad (6)$$

$$V = 3.39 \cdot 10^4 \text{ V} \quad \text{ג.} \quad E \approx 3.39 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}} \quad \text{ב.} \quad \sigma = 3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{C}}{\text{m}^2} \quad \text{א.} \quad (7)$$

$$v = 2.55 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ד.}$$

$$E(r_1) = 4.32 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}, E(r_2) = 0 \quad \text{א.} \quad (8)$$

$$V(r_1) = 1.08 \cdot 10^5 \text{ V}, V(r_2) = 1.35 \cdot 10^5 \text{ V} \quad \text{ב.}$$

$$q_1 = \frac{bv_0}{k} \cdot \frac{a}{(a-b)}, q_2 = -\frac{bv_0}{ka \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right)} \quad (9)$$

$$V_{ba} = 7.6 \cdot 10^3 \text{ V} \quad \text{ב.} \quad V_{21} \approx 2.06 \cdot 10^4 \text{ V} \quad \text{א.} \quad (10)$$

$$u_2 = 1.06 \frac{\text{m}}{\text{sec}}, u_1 = -3.18 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ב.} \quad u_1 \approx -1.84 \frac{\text{m}}{\text{sec}}, u_2 = 0.612 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{א.} \quad (11)$$

$$u_1 = -7.96 \frac{\text{m}}{\text{sec}}, u_2 = 1.48 \frac{\text{m}}{\text{sec}} / u_1 = 4.62 \frac{\text{m}}{\text{sec}}, u_2 = -4.81 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{א.} \quad (12)$$

$$u_1 = -3.79 \frac{\text{m}}{\text{sec}}, u_2 = 1.35 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ד.} \quad r_{\max} = 1.29 \text{ m} \quad \text{ג.} \quad v_{0_{\min}} \approx 2.18 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ב.}$$

$$V_{1000} = 100V_1 \quad (13)$$

$$V_A = 6.75 \cdot 10^3 \text{ V}, V_B \approx 7.71 \cdot 10^3 \text{ V}, V_C = 0 \quad \text{ב.} \quad q = -1.5 \cdot 10^{-7} \text{ C} \quad \text{א.} \quad (14)$$

$$W_{A \rightarrow C} = -6.75 \cdot 10^{-7} \text{ J} \quad \text{ג.}$$

$$E_T = \frac{k(Q_1 + Q_2)}{R_2^2} \quad \text{.iii} \quad E_T = \frac{kQ_1}{R_1^2} \quad \text{.ii} \quad E_T = 0 \quad \text{.i. א.} \quad (15)$$

$$V_T(R_2) = \frac{k(Q_1 + Q_2)}{R_2} \quad \text{.iii} \quad V_T(R_1) = \frac{kQ_1}{R_1} + \frac{kQ_2}{R_2} \quad \text{.ii} \quad V_T = \frac{kQ_1}{R_1} + \frac{kQ_2}{R_2} \quad \text{.i. ב.}$$

$$q_1' = 0, q_2' = Q_1 + Q_2 \quad \text{ג.}$$