

פתח דבר

לתלמידים ולמורים

ספר זה מיועד לתלמידי פיזיקה אינטרניים ואקסטרניים, המתכוננים לגשת לבחינת הבגרות **בחשמל**, שאלון מספר 036371, וכן למורים הזקוקים למאגר של בחינות מתכונת מעודכנות. הספר מעודכן לתוכנית הלימודים של משרד החינוך בהתאם למבנה הבחינה לקיץ 2025. וכולל את עיקרי חומר הלימוד לפי הפרקים השונים, כולל דוגמאות והסברים. כמו כן בספר 15 בחינות מתכונת מעודכנות, הכוללות כ-90 שאלות. לכל אחת מהשאלות שבבחינות המתכונת ניתן פתרון מלא ומנומק בהתאם לדרישות הפיקוח על הוראת הפיזיקה ובהתאם למחוזונים של הערכת הבחינות בשנים האחרונות. השאלות כוללות את כל רמות החשיבה הנדרשות מהתלמידים, החל ברמה של ידע וכלה ברמות חשיבה והבנה גבוהות. רוב השאלות מתאפיינות ברמת קושי מדורגת מהקלה לקשה. השאלות שבבחינות נכתבו במהלך השנים הרבות שבהן כתבתי בחינות לתלמידיי, ושופרו במשך השנים בעקבות בדיקת התשובות של התלמידים.

תודות:

- לצוות של רכס על התמיכה ועל הליווי.
- לשוקי זכאי על הערותיו החכמות.
- לתלמידיי במשך השנים שמהם למדתי יותר מכולם.

רון הדר

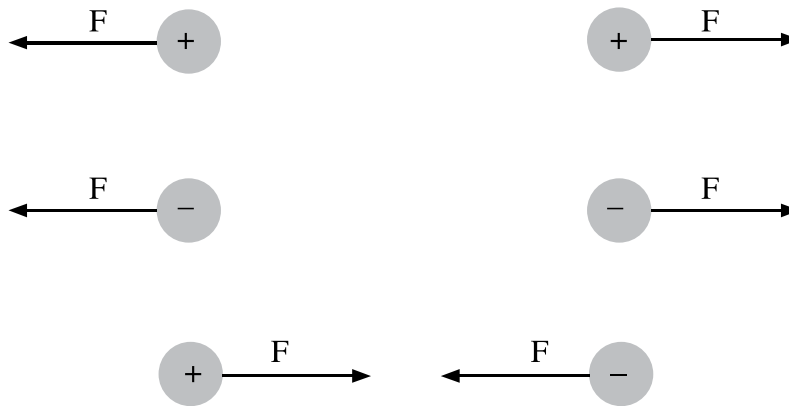
פרק 1 – חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי

הכוח החשמלי – חוק קולון

מטען חשמלי הוא התכונה שיש לגוף או לחלקיק, המאפשרת השתתפות באינטראקציה החשמלית. קיימים שני סוגים של מטען חשמלי: מטען חיובי ומטען שלילי. יחידת המטען החשמלי היא קולון ומסומנת באות C.

הכוח החשמלי הוא כוח הפועל בין כל שני גופים הטעונים במטענים חשמליים. בין גופים הטעונים מטענים בעלי סימן זהה פועלים כוחות דחייה, ובין גופים הטעונים מטענים בעלי סימנים מנוגדים פועלים כוחות משיכה.

את גודל הכוח אפשר לחשב בנוסחה הידועה כחוק קולון:



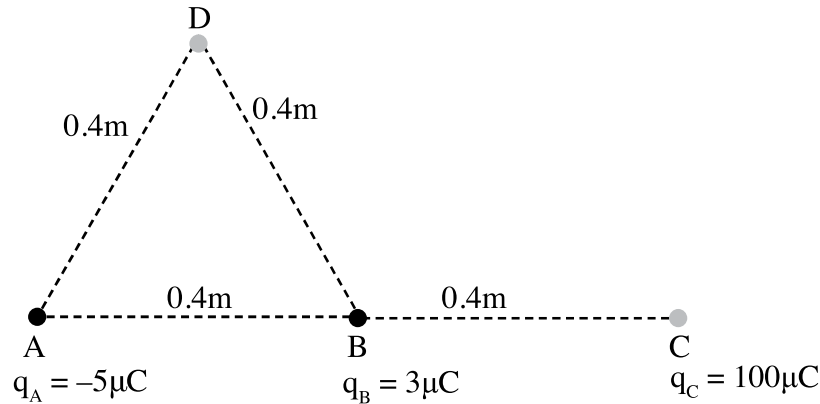
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

כאשר:

- F – גודל הכוח החשמלי בניוטונים (N).
- q_1, q_2 – שני המטענים החשמליים בקולונים (C).
- r – המרחק בין שני המטענים במטרים (m) (אם שני הגופים הטעונים הם כדורים, המרחק נמדד בין שני מרכזי הכדורים).
- k – הקבוע האלקטרוסטטי שערכו $k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ (שימו לב! בנוסחאון מופיע קבוע נוסף המסומן באות k , קבוע בולצמן, יש להתעלם ממנו).

שאלה לדוגמה:

בנקודות A ו-B ניצבים שני מטענים, $q_A = -5\mu\text{C}$ ו $q_B = 3\mu\text{C}$, בהתאמה. המרחקים נתונים בתרשים שלפניכם (הסימן μ , מיקרו, מייצג מיליונית, כלומר $1\mu\text{C} = 10^{-6}\text{C}$):



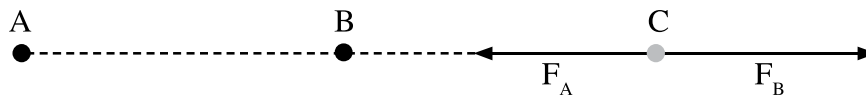
- מה הכוח השקול שיפעל על מטען שלישי $q_C = 100\mu\text{C}$ הניצב בנקודה C, ונמצאת על המשך הקטע AB?
- מה הכוח השקול שיפעל על המטען השלישי, אם הוא יעבור לנקודה D שנמצאת במרחקים שווים מ-A ומ-B?

הפתרון:

שיטת הפתרון המומלצת: תחילה, יש לקבוע את כיווני הכוחות לפי סימני המטענים. לאחר מכן יש לחשב את גודל הכוחות בלי להתייחס לסימנים, ולבסוף לחבר את הווקטורים.

1. על q_C פועלים שני כוחות: F_A - כוח משיכה (כי סימני המטענים מנוגדים) שמאלה, שמפעיל עליו המטען q_A ,

ו- F_B - כוח דחייה (כי סימני המטענים זהים) ימינה, שמפעיל עליו המטען q_B .

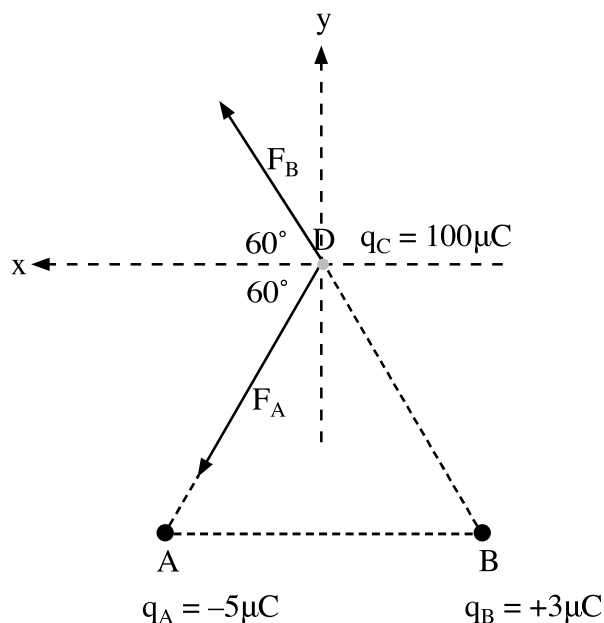


$$\Sigma F = |F_B| - |F_A| = \frac{kq_Bq_C}{r_{BC}^2} - \frac{kq_Aq_C}{r_{AC}^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0.4^2} - \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0.8^2}$$

$$= 16.88 - 7.03 = 9.85 \text{ N}$$

גודלו של הכוח השקול הוא 9.85N, וכיוונו ימינה.

2. נוסיף מערכת צירים, ונקבע את כיווני הכוחות:



נחשב את רכיבי הכוח השקול:

$$\Sigma F_x = F_{Bx} + F_{Ax} = \frac{kq_Bq_C \cos 60^\circ}{r_{BD}^2} + \frac{kq_Aq_C \cos 60^\circ}{r_{AD}^2}$$

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cos 60^\circ}{0.4^2} + \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cos 60^\circ}{0.4^2}$$

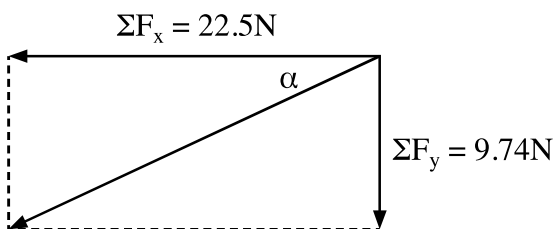
$$\Sigma F_x = 8.44 + 14.06 = 22.5 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = F_{By} + F_{Ay} = \frac{kq_Bq_C \sin 60^\circ}{r_{BD}^2} - \frac{kq_Aq_C \sin 60^\circ}{r_{AD}^2}$$

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \sin 60^\circ}{0.4^2} - \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \sin 60^\circ}{0.4^2}$$

$$\Sigma F_y = 14.62 - 24.36 = -9.74 \text{ N}$$

נבנה את וקטור הכוח השקול:



$$\Sigma F = \sqrt{22.5^2 + 9.74^2} = 24.5\text{N}$$

$$\tan \alpha = \frac{9.74}{22.5}$$

$$\alpha = 23.4^\circ$$

גודל הכוח השקול הוא 24.5N, וכיוונו 23.4° יחסית לכיוון החיובי של ציר x.

השדה החשמלי

רעיון השדה החשמלי פותח כדי להסביר כיצד הכוח החשמלי בין שני מטענים פועל ממרחק, ללא מגע בין המטענים. המטען הראשון יוצר שדה חשמלי בסביבתו, והמטען השני שנקלע לשדה מושפע ממנו, וההפך, המטען השני יוצר שדה חשמלי בסביבתו והמטען הראשון מושפע ממנו.

	מטען q_1 יוצר שדה E_1 בכל נקודה בסביבתו:
	מטען q_2 מושפע מהשדה E_1 , ופועל עליו כוח חשמלי:

הגדרה: השדה החשמלי בנקודה מסוימת הוא הכוח ליחידת מטען הנמצא בנקודה.

$$E = \frac{F}{q}$$

הגדרה פשוטה יותר: בנקודה מסוימת השדה החשמלי הוא הכוח שיפעל על מטען יחידה (מטען חיובי של +1C) אם הוא יימצא בנקודה זו.

יחידת המידה של שדה חשמלי היא ניוטון לקולון - $\frac{N}{C}$ (בהמשך נראה שיחידת השדה החשמלי גם יכולה להיות וולט למטר - $\frac{V}{m}$).

הכוח הפועל על מטען הנמצא בשדה חשמלי

הכוח הפועל על מטען חשמלי q הנמצא בשדה חשמלי E הוא: $F = qE$

כיוון השדה מוגדר ככיוון הכוח הפועל על מטען חיובי. מכאן נובעת המסקנה:

- אם המטען q חיובי, אז הכוח פועל עם כיוון השדה.
- אם המטען q שלילי, אז הכוח פועל נגד כיוון השדה.

שאלה לדוגמה:

בנקודה P שורר שדה חשמלי $E = 500 \frac{N}{C}$ שכיוונו ימינה. מה הכוח שיפעל על אלקטרון שיימצא בנקודה P?

הפתרון:

נמצא את מטען האלקטרון בנוסחאון: $q_e = -e = -1.6 \cdot 10^{-19} C$.

נחשב את הכוח:

$$\begin{aligned}\vec{F} &= q\vec{E} \\ \vec{F} &= -e\vec{E} = -1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 500 = -8 \cdot 10^{-17} N\end{aligned}$$

משמעות סימן המינוס היא שכיוון הכוח מנוגד לכיוון השדה, לכן גודל הכוח הוא $8 \cdot 10^{-17} N$ וכיוונו שמאלה.

שדה חשמלי שיוצר מטען נקודתי

גודל השדה החשמלי שיוצר מטען נקודתי בנקודה מסוימת הוא:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

כאשר:

k - הקבוע האלקטרוסטטי.

q - המטען הנקודתי בקולון.

r - מרחק הנקודה המסוימת מהמטען במטרים.

E - גודל השדה החשמלי ב- $\frac{N}{C}$.

כיוון השדה החשמלי שיוצר מטען חיובי הוא מהמטען החוצה. כיוון השדה החשמלי שיוצר מטען שלילי הוא כלפי המטען. כדי להיזכר בכיוונים, חושבים מה יהיה כיוון הכוח, משיכה או דחייה, שיפעל על מטען חיובי שיוצב בנקודה מסוימת. ראו בתרשים שלפניכם:

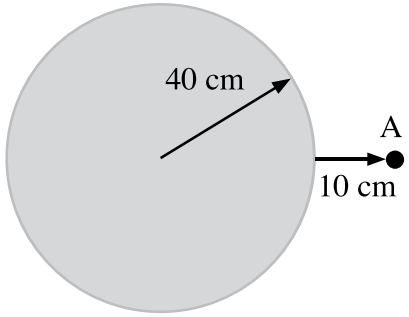
**שדה חשמלי מחוץ לגוף כדורי טעון**

השדה מחוץ לגוף כדורי טעון הוא כאילו כל מטען הגוף היה מרוכז במרכזו כמטען נקודתי. עובדה זו נכונה כאשר המטען מפוזר בכדור באופן סימטרי.

שאלה לדוגמה:

1. מהו השדה שיוצר כדור טעון, שרדיוסו 40 סנטימטרים בנקודה A הנמצאת 10 סנטימטרים מפניו?
 מטען הכדור הוא $q = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ C}$.

2. מה יהיה הכוח שיפעל על מטען $Q = -6 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ שיימצא בנקודה A?



The diagram shows a gray circle representing a sphere. An arrow from the center to the right edge is labeled '40 cm'. A point 'A' is marked on the right edge with a black dot. An arrow points from the center to point 'A', and this arrow is labeled '10 cm'.

הפתרון:

1. מכיוון שמטען הכדור חיובי, כיוון השדה הוא ממרכז הכדור החוצה, כלומר ימינה. נמצא את גודל השדה, נזכור שיש להציב בנוסחה את מרחק הנקודה A ממרכז הכדור.

$$r = 40 + 10 = 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m}$$

$$E = \frac{kq}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1.6 \cdot 10^{-7}}{0.5^2} = 5,760 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

השדה בנקודה A הוא $5,760 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ וכיוונו ימינה.

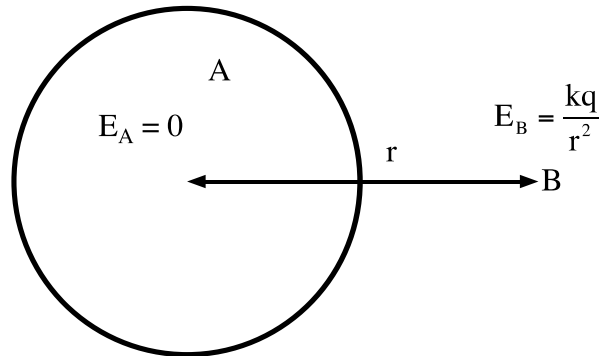
2. המטען Q שלילי, לכן כיוון הכוח הפועל עליו מנוגד לכיוון השדה, כלומר שמאלה. נחשב את גודל הכוח:

$$F = QE = 6 \cdot 10^{-7} \cdot 5,760 = 3.456 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

הכוח שיפעל על המטען הוא $3.456 \cdot 10^{-3}$ ניוטון.

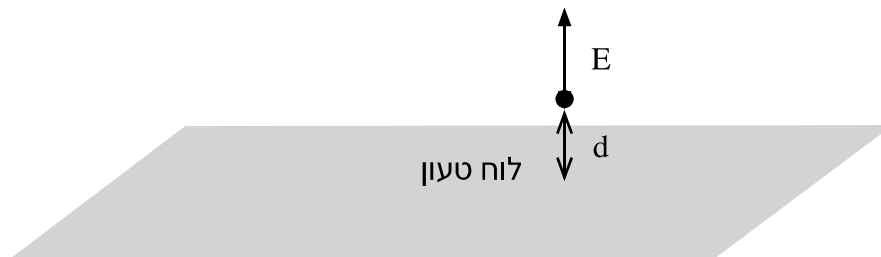
שדה חשמלי של קליפה כדורית טעונה

- השדה מחוץ לקליפה הוא כאילו כל מטען הקליפה היה מרוכז במרכזה (נקודה B).
- השדה בתוך הקליפה הוא 0 (נקודה A).



שדה חשמלי סמוך ללוח מישורי, אינסופי, טעון בצפיפות

מטען אחידה

גודל השדה שיוצר לוח מישורי טעון בצפיפות מטען אחידה σ הוא:

$$E = 2\pi k\sigma$$

כאשר:

- σ - צפיפות המטען המשטחית השווה למטען הכולל של הלוח חלקי שטחו - $\sigma = \frac{Q}{A}$ ביחידות של $\frac{C}{m^2}$.
- k - הקבוע האלקטרוסטטי.
- E - גודל השדה החשמלי ב- $\frac{N}{C}$.

אם הלוח טעון במטען חיובי, אז כיוון השדה הוא מהלוח החוצה, ואם הלוח טעון במטען שלילי, אז כיוון השדה הוא אל הלוח.

ביטוי זה מתקיים בנקודה שמרחקה מהלוח (d בתרשים) קטן מאוד ממרחקה אל הקצה הקרוב של הלוח. בנקודה כזו הלוח נחשב אינסופי.

בנוסחאון מחליפים את הקבוע האלקטרוסטטי k , במקדם הדיאלקטריות של הריק ϵ_0 , והביטוי לשדה נכתב כך:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$$

מדובר כמובן בגרסה שונה לאותו ביטוי.

אם הביטוי לעיל מבלבל, אפשר ללמוד בעל פה את הנוסחה $E = 2\pi k \sigma$.
נוח לזכור אותה בעזרת ראשי התיבות שפק"ס – שני פאי קיי סיגמא.

חיבור שדות חשמליים (סופרפוזיציה)

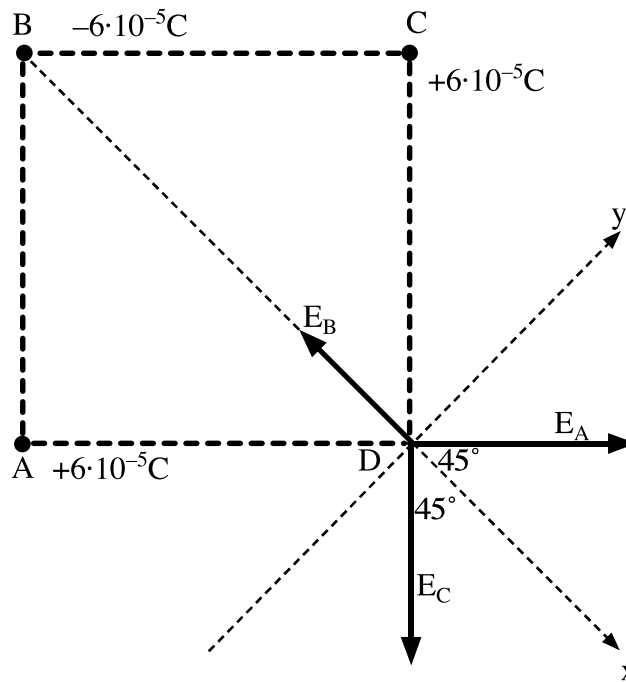
כאשר מספר מטענים יוצרים שדה בנקודה מסוימת, השדה שנוצר באותה נקודה הוא הסכום הווקטורי של השדות שיוצרים המטענים.

שאלה לדוגמה:

בשלושת קודקודיו של ריבוע ABCD, שצלעו 40 סנטימטרים, נמצאים שלושה מטענים:
 $q_A = q_C = +6 \cdot 10^{-5} \text{ C}$
 $q_B = -6 \cdot 10^{-5} \text{ C}$. מצאו את השדה בנקודה D.

הפתרון:

- נשרטט את מערכת המטענים, ונסמן את שלושת השדות.



- נחשב את גודל השדות. מכיוון שאת כיווני השדות כבר קבענו, נחשב את גודלם בערכים מוחלטים:

$$|E_A| = |E_C| = \frac{kq_A}{AB^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-5}}{0.4^2} = 3.375 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$|E_B| = \frac{k|q_B|}{BD^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-5}}{(0.4\sqrt{2})^2} = 1.6875 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

- נוסיף מערכת צירים: נבחר בציר ה-x לאורך אלכסון הריבוע (אם מצליחים לנחש את כיוון השדה השקול, כדאי לבחור במערכת הצירים, כך שאחד הצירים בכיוון השקול), ונחשב את רכיבי השדה השקול.

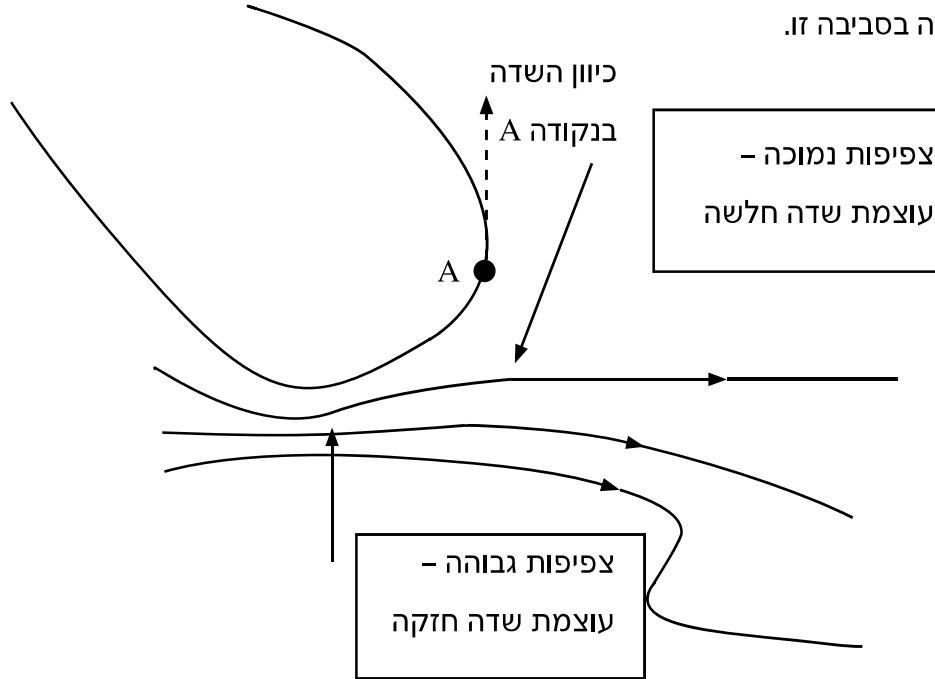
$$\Sigma E_x = E_A \cdot \cos 45^\circ + E_C \cdot \cos 45^\circ - E_B = 2 \cdot 3.375 \cdot 10^6 \cdot \cos 45^\circ - 1.6875 \cdot 10^6 = 3.09 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$\Sigma E_y = E_A \cdot \sin 45^\circ - E_C \cdot \sin 45^\circ = 0$$

גודל השדה בנקודה D הוא $3.09 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$, וכיוונו עם כיוון האלכסון BD.

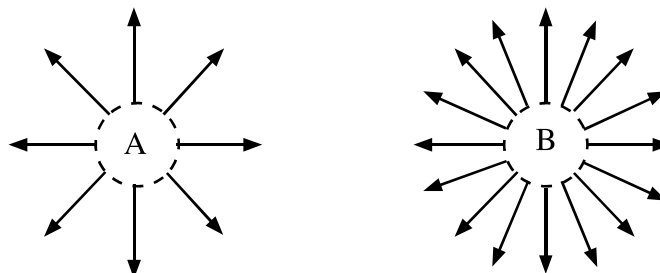
מיפוי שדה חשמלי באמצעות קווי שדה

בעזרת מודל של קווי שדה אפשר לתאר את השדה החשמלי במרחב. הכיוון שאליו פונה קו השדה בנקודה מסוימת, מייצג את כיוון השדה באותה נקודה. צפיפות קווי השדה בסביבה מסוימת מייצגת את עוצמת השדה בסביבה זו.

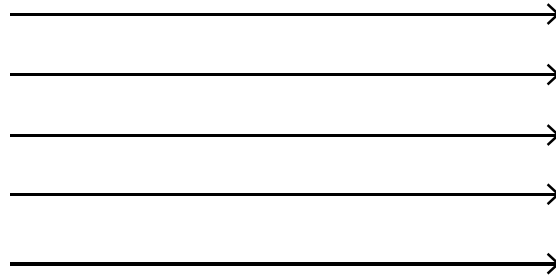


תכונות קווי השדה החשמלי:

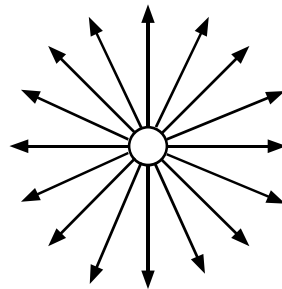
1. קו שדה חשמלי מתחיל במטען חיובי או מאינסוף.
2. קו שדה חשמלי מסתיים במטען שלילי או באינסוף.
3. קווי שדה חשמלי אינם נחתכים.
4. מספר הקווים המתחילים במטען חיובי או מסתיימים במטען שלילי, מייצג את כמות המטען בערכה המוחלט. ראו דוגמה בתרשים שלפניכם: ממטען A יוצאים 8 קווי שדה, וממטען B יוצאים 16 קווי שדה. לכן $q_B = 2q_A$.



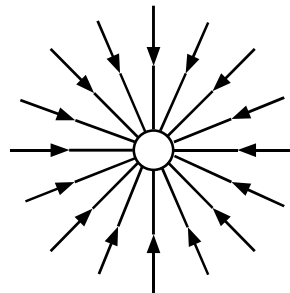
מקרים נפוצים של שדה חשמלי
שדה אחיד - קווים ישרים ומקבילים:



שדה של מטען נקודתי חיובי:



שדה של מטען נקודתי שלילי:



5. שדה של דיפול (זוג מטענים חיובי ושלילי) כאשר שני המטענים שווים בערכם המוחלט.

