

# פתח דבר

לתלמידים ולמורים

ספר זה מיועד לתלמידי פיזיקה אינטרניים ואקסטרניים, המתכוננים לגשת לבחינת הבגרות בחשמל, מועד קיץ 2024, שאלון מספר 036371, וכן למורים הזקוקים למאגר של בחינות מתכונת מעודכנות. תוכן הספר מעודכן לתוכנית הלימודים של משרד החינוך בהתאם למיקוד החומר לבחינה כפי שהתפרסם בנובמבר 2023, וכולל את עיקרי חומר הלימוד לפי הפרקים השונים, כולל דוגמאות והסברים המוגשים לקורא באופן נוח ללימוד עצמי. כמו כן בספר בחינות מתכונת מעודכנות, בהתאם למיקוד החומר לבחינה. לכל אחת מהשאלות שבבחינות המתכונת ניתן פתרון מלא ומנומק בהתאם לדרישות הפיקוח על הוראת הפיזיקה ובהתאם למחווים של הערכת הבחינות בשנים האחרונות. השאלות פונות אל 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:

- לשוקי זכאי על הערותיו החכמות.
- לאשתי מיכל וילדיי על הסבלנות.
- לתלמידיי במשך השנים שמהם למדתי יותר מכולם

רון הדר



# מיפוי המבחנים והשאלות

מבחן 6		
1	אלקטרוסטטיקה	שדה ופוטנציאל
2	אלקטרוסטטיקה	קווי שדה, ללא אנרגיה
3	מעגלי זרם ישר	כא"מ ומתח הדקים
4	מעגלי זרם ישר	ע. מ. ר. (אוריינות)
5	מעגלי זרם ישר	חיבור מעגל
6	שדה מגנטי	תנועה בורגית

מבחן 1		
1	אלקטרוסטטיקה	משטחים שויי פוטנציאל
2	אלקטרוסטטיקה	פוטנציאל
3	מעגלי זרם ישר	נורות
4	מעגלי זרם ישר	כא"מ ומתח הדקים
5	מעגלי זרם ישר	ריאוסטט
6	שדה מגנטי	תנועה בשדה מגנטי

מבחן 7		
1	אלקטרוסטטיקה	השוואת פוטנציאלים
2	אלקטרוסטטיקה	ניסוי מיליקן
3	מעגלי זרם ישר	חיבור נגדים
4	מעגלי זרם ישר	כא"מ ומתח הדקים
5	שדה מגנטי	תנועה בשדה מגנטי
6	שדה מגנטי	תנועה בשדה מגנטי

מבחן 2		
1	אלקטרוסטטיקה	ללא אנרגיה
2	אלקטרוסטטיקה	תנועה בשדה חשמלי
3	מעגלי זרם ישר	ריאוסטט
4	מעגלי זרם ישר	כא"מ ומתח הדקים
5	מעגלי זרם ישר	נורות
6	שדה מגנטי	ניסוי חובה-סליל

מבחן 8		
1	אלקטרוסטטיקה	שדה ופוטנציאל
2	מעגלי זרם ישר	חיבור נגדים
3	מעגלי זרם ישר	חיבור נגדים
4	מעגלי זרם ישר	חיבור נגדים
5	מעגלי זרם ישר	חוקי קירכהוף
6	שדה מגנטי	תנועה בשדה מגנטי

מבחן 3		
1	אלקטרוסטטיקה	תנועה בשדה חשמלי
2	אלקטרוסטטיקה	שני לוחות
3	מעגלי זרם ישר	התנגדות סגולית
4	מעגלי זרם ישר	ריאוסטט ופוטנציומטר
5	מעגלי זרם ישר	כא"מ ומתח הדקים
6	שדה מגנטי	ניסוי Unseen

מבחן 9		
1	אלקטרוסטטיקה	שדה ופוטנציאל
2	מעגלי זרם ישר	חיבור נגדים
3	מעגלי זרם ישר	כא"מ ומתח הדקים
4	מעגלי זרם ישר	חיבור נגדים
5	שדה מגנטי	תנועה בשדה מגנטי, זוהר הקוטב
6	שדה מגנטי	תנועה בשדה מגנטי

מבחן 4		
1	אלקטרוסטטיקה	ללא אנרגיה
2	אלקטרוסטטיקה	מוליך ומבדד
3	מעגלי זרם ישר	כא"מ ומתח הדקים
4	מעגלי זרם ישר	חיבור נגדים
5	מעגלי זרם ישר	ריאוסטט
6	שדה מגנטי	תנועה בשדה מגנטי

מבחן 10		
1	אלקטרוסטטיקה	מטען מראה
2	מעגלי זרם ישר	ריאוסטט
3	מעגלי זרם ישר	התנגדות של תיל
4	מעגלי זרם ישר	חיבור אמפרמטרים
5	שדה מגנטי	כוח על תיל נושא זרם
6	שדה מגנטי	סילונית

מבחן 5		
1	אלקטרוסטטיקה	מטען נקודתי
2	אלקטרוסטטיקה	קליפה, שני לוחות
3	מעגלי זרם ישר	אופיין של נגד ושל נורה
4	מעגלי זרם ישר	ניסוי קצר ונתק
5	מעגלי זרם ישר	התנגדות של תיל
6	שדה מגנטי	מאוזני זרם



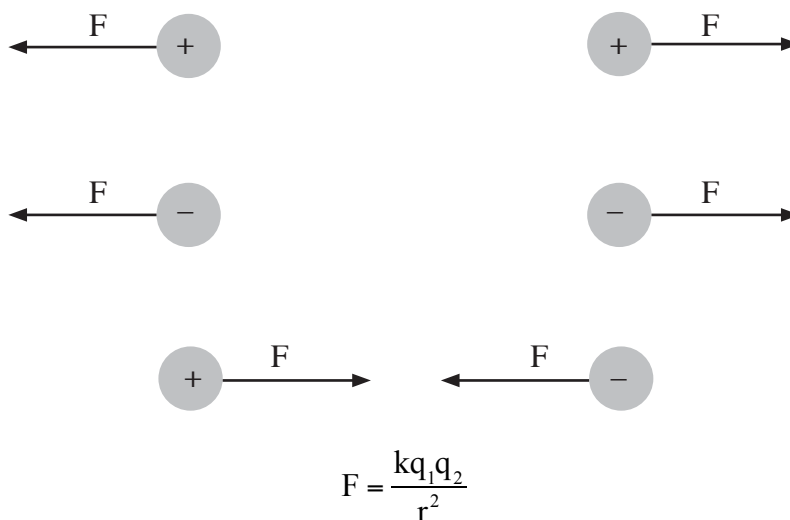
## פרק 1 - חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי

### 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:

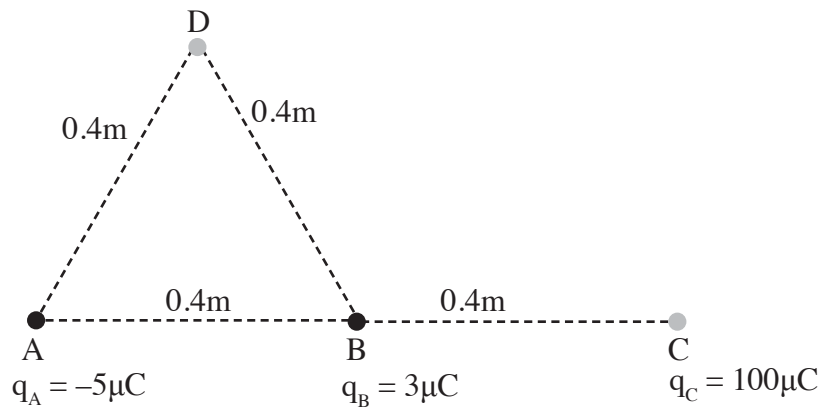


כאשר:

- $F$  - 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:

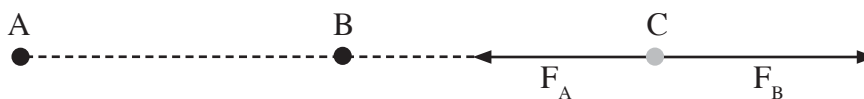
בנקודות A ו-B ניצבים שני מטענים,  $q_A = -5\mu\text{C}$  ו  $q_B = 3\mu\text{C}$ , בהתאמה. המרחקים נתונים בתרשים שלפניכם (הסימן  $\mu$ , מיקרו, מייצג מיליונית, כלומר  $1\mu\text{C} = 10^{-6}\text{C}$ ):



- 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.
- 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  $q_B$ .

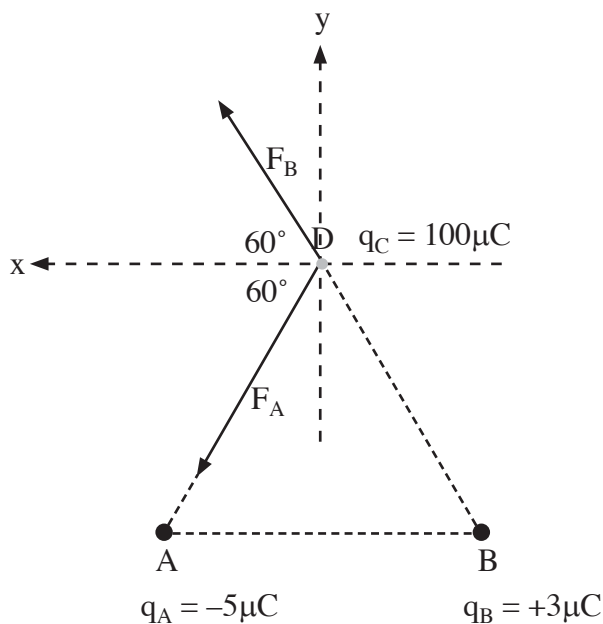


$$\Sigma F = |F_B| - |F_A| = \frac{kq_B q_C}{r_{BC}^2} - \frac{kq_A q_C}{r_{AC}^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0.4^2} - \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0.8^2}$$

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

גודלו של הכוח השקול הוא 9.85N, וכיוונו ימינה.

2. נוסף מערכת צירים, ונקבע את כיווני הכוחות:



נחשב את רכיבי הכוח השקול:

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

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

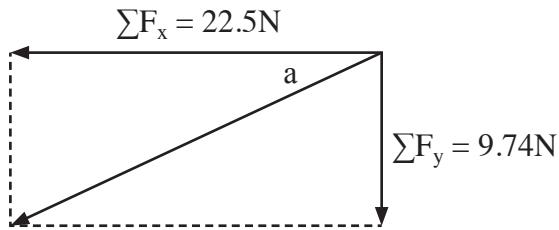
$$\Sigma F_y = 8.44 + 14.06 = 22.5 \text{ N}$$

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

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

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

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  $23.4^\circ$  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.

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

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  $\vec{E}$  הוא:  $\vec{F} = q\vec{E}$

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:

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

$$\vec{F} = -e\vec{E} = -1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 500 = -8 \cdot 10^{-17} N$$

משמעות סימן המינוס היא שכיוון הכוח מנוגד לכיוון השדה, לכן גודל הכוח הוא  $8 \times 10^{-17} N$  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:



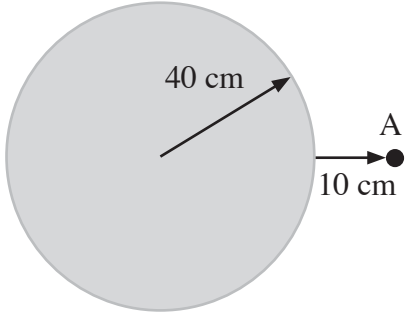
## שדה חשמלי מחוץ לגוף כדורי טעון

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'. To the right of the sphere, a point labeled 'A' is marked with a black dot. An arrow points from the right edge of the sphere to point A, 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.

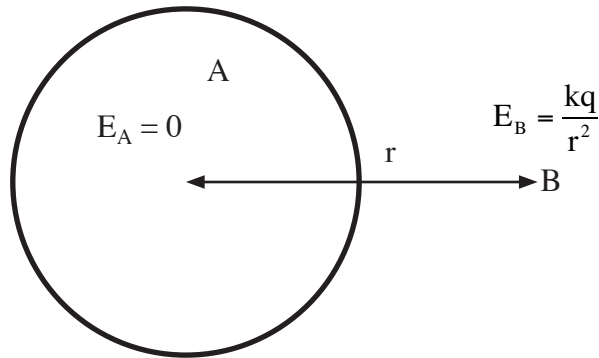
2. המטען Q שלילי, לכן כיוון הכוח הפועל עליו מנוגד לכיוון השדה, כלומר שמאלה. נחשב את גודל הכוח:

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

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

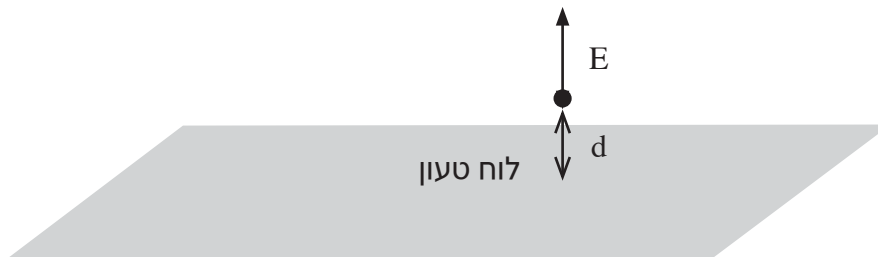
## שדה חשמלי של קליפה כדורית טעונה

- 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  $\sigma$  הוא:

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

כאשר:

$\sigma$  - 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  $\epsilon_0$ , 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)

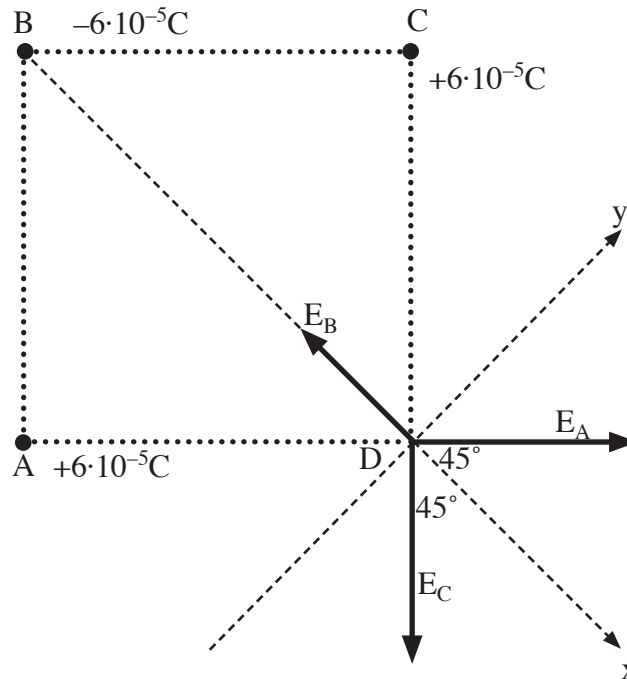
כאשר מספר מטענים יוצרים שדה בנקודה מסוימת, השדה שנוצר באותה נקודה הוא הסכום הווקטורי של השדות שיוצרים המטענים.

### 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.

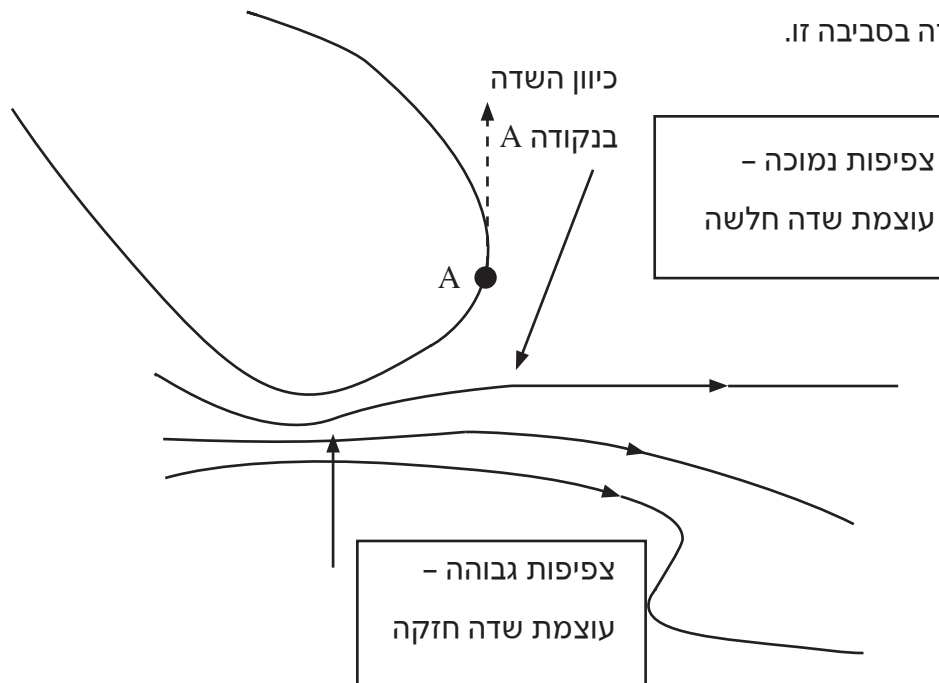
$$\Sigma E_x = E_A \cdot \cos 45^\circ + E_C \cdot \cos 45^\circ - E_B = 2 \cdot 3.375 \cdot 10^6 \cdot \cos 45^\circ - 1.6875 \cdot 10^6 = 3.09 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

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

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

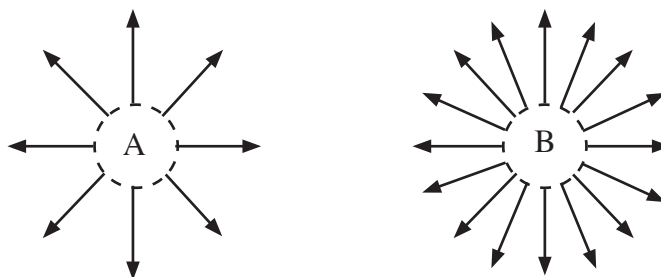
### מיפוי שדה חשמלי באמצעות קווי שדה

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:

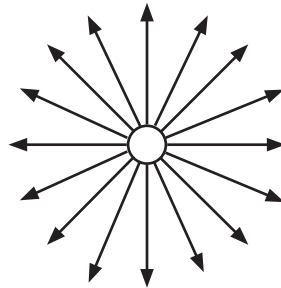
1. קו שדה חשמלי מתחיל במטען חיובי או מאינסוף.
2. קו שדה חשמלי מסתיים במטען שלילי או באינסוף.
3. קווי שדה חשמלי אינם נחתכים.
4. מספר הקווים המתחילים במטען חיובי או מסתיימים במטען שלילי, מייצג את כמות המטען בערכה המוחלט. ראו דוגמה בתרשים שלפניכם: ממטען A יוצאים 8 קווי שדה, וממטען B יוצאים 16 קווי שדה.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



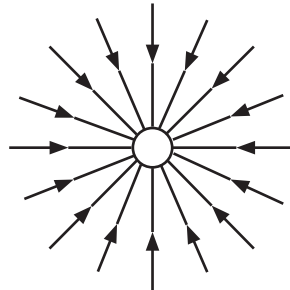
מקרים נפוצים של שדה חשמלי  
שדה אחיד - קווים ישרים ומקבילים:



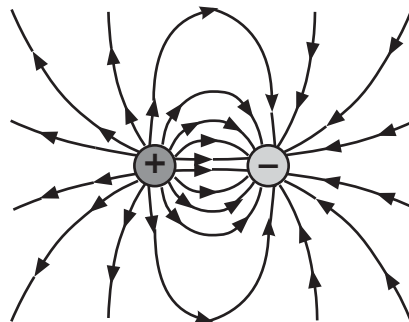
שדה של מטען נקודתי חיובי:



שדה של מטען נקודתי שלילי:



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



העתקה ו/או צילום מספר זה הם מעשה לא חינוכי, המהווה עברה פלילית.