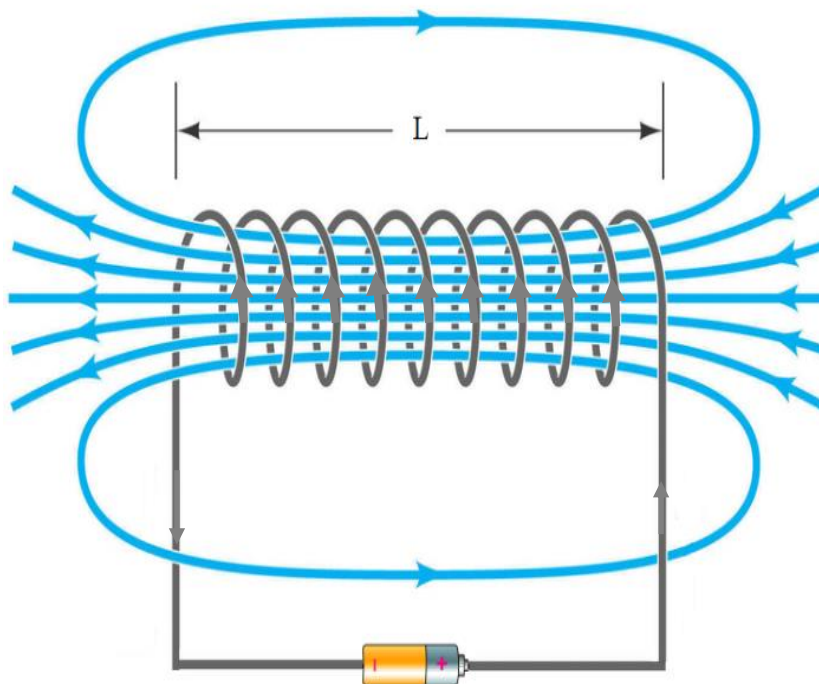


## מגנטיות

שדה מגנטי הנוצר על ידי זרם  
(תיל, סליל דק וסילונית)



◀ יצירת שדות מגנטיים על ידי זרמים חשמליים:

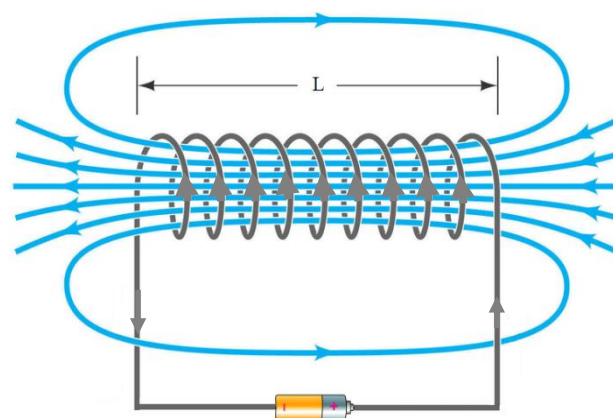
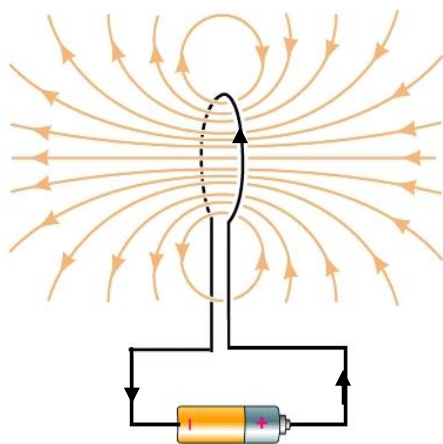
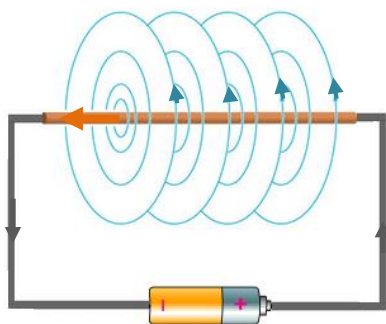
- השדה המגנטי שנוצר על ידי זרם חשמלי בתיל ישר וארוך
- השדה המגנטי שנוצר על ידי זרם חשמלי בסליל מעגלי דק
- השדה המגנטי שנוצר על ידי זרם חשמלי בסילונית

◀ כוחות מגנטיים בין זרמים מקבילים

בשיעור הקודם עסקנו בכוח שמפעיל שדה מגנטי על תיל נושא זרם.

ראינו שבאמצעות מאזני זרם ניתן לחשב את עוצמת השדה המגנטי  $B$  על ידי מדידת הכוח הפועל על התיל. אולם, יש אפשרות לחשב שדות מגנטיים גם באופן תאורטי. נראה זאת עבור שלושה מקרים:

1. בקרבת תיל ישר וארוך ("אינסופי").
2. במרכזו של סליל מעגלי דק (קצר) (בעל רדיוס  $R$  ו- $N$  כריכות, אורכו  $L \gg R$ )
3. במרכז סילונית ארוכה (בעלת אורך  $L$  ו- $N$  כריכות, רדיוס  $L \gg R$ ).



# עוצמת השדה המגנטי בקרבת תיל ישר וארוך (אינסופי)

כפי שהזכרנו קודם, הנס כריסטיאן ארסטד (מדנמרק) היה הראשון שגילה את קיומו של שדה מגנטי סביב תיל נושא זרם. בהסתמך על ניסויים שתיארנו באחד השיעורים הקודמים, ראינו שהשדה המגנטי סביב תיל נושא

זרם הינו ביחס ישר לעוצמת הזרם וביחס הפוך למרחק מהתיל.

$$B \propto \frac{I}{r}$$

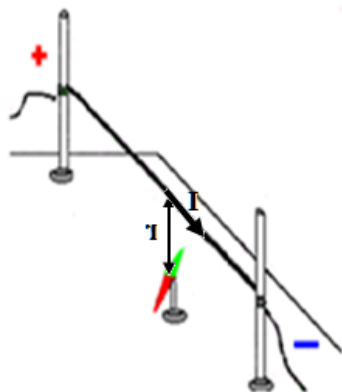
קווי השדה המגנטי יוצרים מעגלים קונצנטריים סביב התיל במישור ניצב לתיל. כדי לעבור מיחס הפרופורציה ליחס של שוויון יש להכפיל בקבוע.

במקרה זה, מקובל לבחור את הקבוע כ-

$$\frac{\mu_0}{2\pi}$$

כאשר  $\mu_0$  הוא "מקדם פרמאביליות (permeability - חלחלות) של הריק" (נקרא בעברית לעיתים גם "חדירות"), והוא שווה ל-

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right]$$



זהו גודל פיזיקלי, שמתאר את מידת המיגנוט של חומר (תווך) בהשפעת שדה מגנטי.

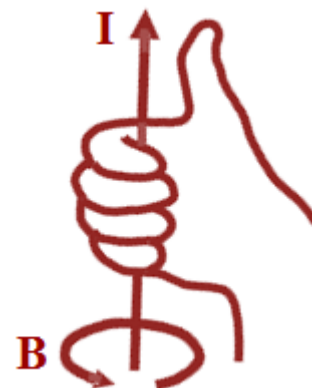
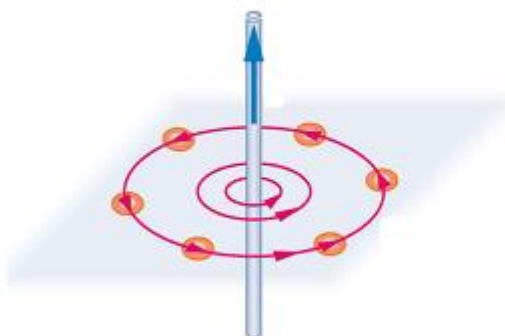
מכאן, גודלו של השדה המגנטי שיוצר תיל ארוך:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{r}$$

# כיוון השדה המגנטי של תיל נושא זרם

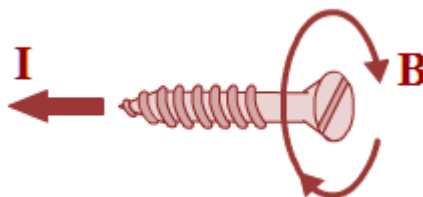
לצורך פתרון בעיות הקשורות **למציאת כיוון** השדה המגנטי, נשתמש בכלל הקרוי **כלל היד הימנית**:

מניחים את יד ימין כך, שהאצבעות סוגרות על התיל נושא הזרם, והאגודל מופנה בכיוון הזרם. האצבעות מראות את כיוון השדה המגנטי, הנוצר על ידי הזרם.



**כלל דומה נקרא "כלל הבורג הימני"**:

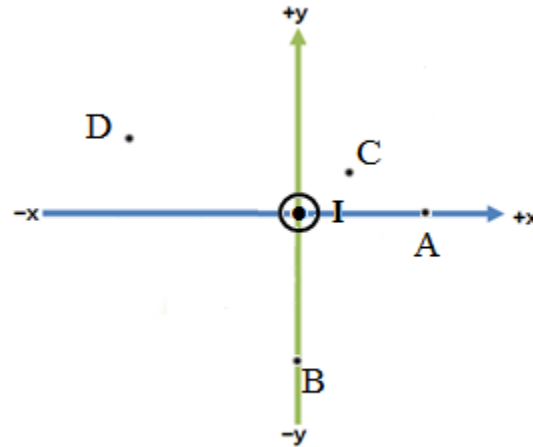
אם כיוון הזרם בתיל הוא בכיוון ההתקדמות של בורג רגיל (ימני), קווי השדה יהיו במגמת סיבובו של הבורג.



# דוגמא 1: מציאת גודל וכיוון השדה המגנטי

א. התיל שבתרשים הוא ארוך מאוד וזורם בו זרם שעוצמתו  $I=2[A]$  בכיוון החוצה מהדף.

מצאו את גודל וכיוון השדה המגנטי בכל אחת מהנקודות: A, B, C, D.



A(2,0)

B(0,-4)

C(1,1)

D(-3,2)

ב. התיל שבתרשים הוא ארוך מאוד וזורם בו זרם שעוצמתו  $I=4[A]$  בכיוון ימינה.

מצאו את גודל וכיוון השדה המגנטי בכל אחת מהנקודות: A, B.

A •

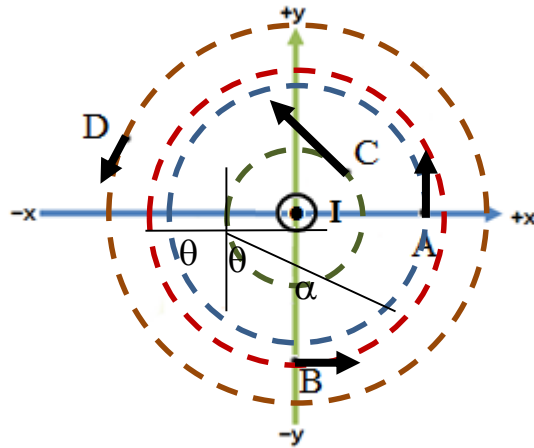
A(0,4)

B(0,-3)



# פתרון דוגמא 1: מציאת גודל וכיוון השדה המגנטי

א. קווי השדה הם מעגלים שמרכזם בציר התיל. על פי כלל יד ימין:



$$B_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r_A} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2}{2} = 2 \cdot 10^{-7} [T]$$

$$B_B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r_B} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2}{4} = 10^{-7} [T]$$

$$B_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r_C} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = 2.82 \cdot 10^{-7} [T]$$

בזווית של  $45^\circ$  מעל לציר ה-x השלילי

$$\tan \alpha = \frac{2}{3} \Rightarrow \alpha = 33.69^\circ$$

$$B_D = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r_D} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{3^2 + 2^2}} = 1.09 \cdot 10^{-7} [T]$$

$$\vartheta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 33.69 = 56.3^\circ$$

בזווית של  $56.3^\circ$  מתחת לציר ה-x השלילי.

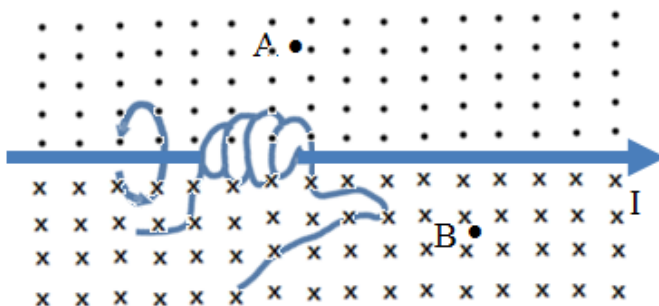
ב.

$$B_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r_A} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{4}{4} = 2 \cdot 10^{-7} [T]$$

החוצה מהמסך

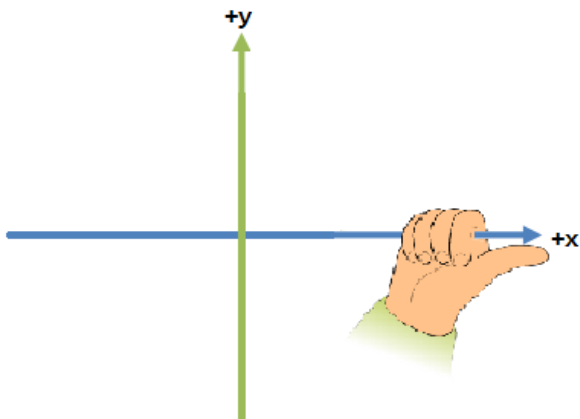
$$B_B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r_B} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{4}{3} = 2.66 \cdot 10^{-7} [T]$$

פנימה אל תוך המסך

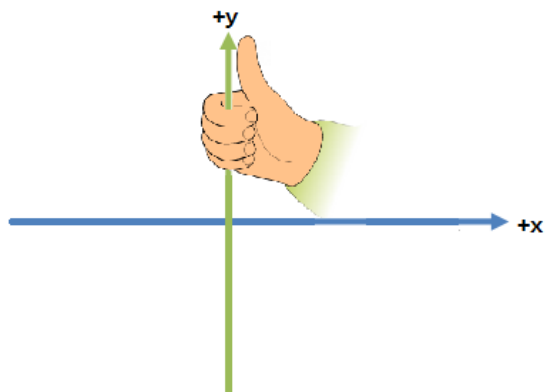


## דוגמה

יש למצוא את כיוון השדה המגנטי בכל רביע באמצעות כלל היד הימנית:  
1. כשהזרם I בתיל בכיוון ציר ה- $x$  החיובי.

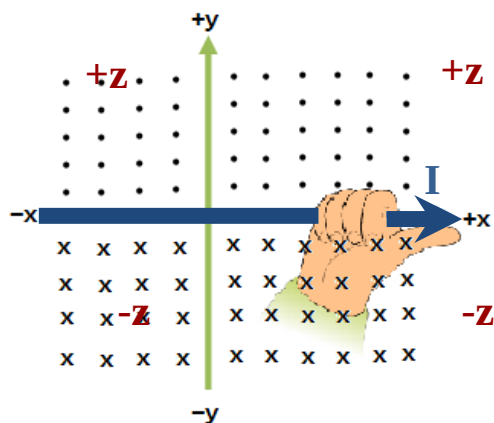


2. כשהזרם I בכיוון ציר ה- $y$  החיובי.



## פתרון דוגמא 2: מציאת כיוון השדה מגנטי במרחב

נמצא את כיוון השדה המגנטי בכל רביע באמצעות כלל היד הימנית:



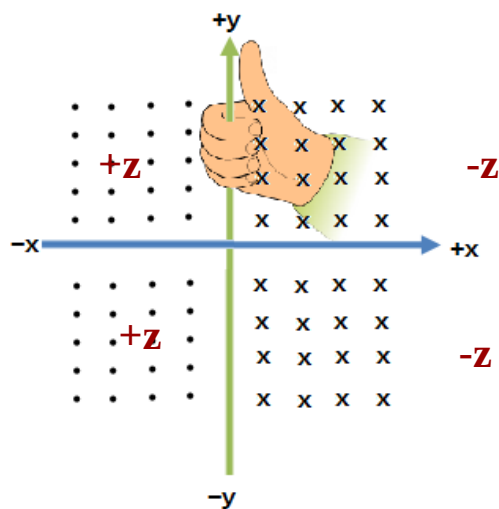
1. רביע ראשון : החוצה מהמסך ( $+z$ )

2. רביע שני : החוצה מהמסך ( $+z$ )

3. רביע שלישי : פנימה לתוך המסך ( $-z$ )

4. רביע רביעי : פנימה לתוך המסך ( $-z$ )

2. כשהזרם  $I$  בכיוון ציר ה- $y$  החיובי.



1. רביע ראשון : פנימה לתוך המסך ( $-z$ )

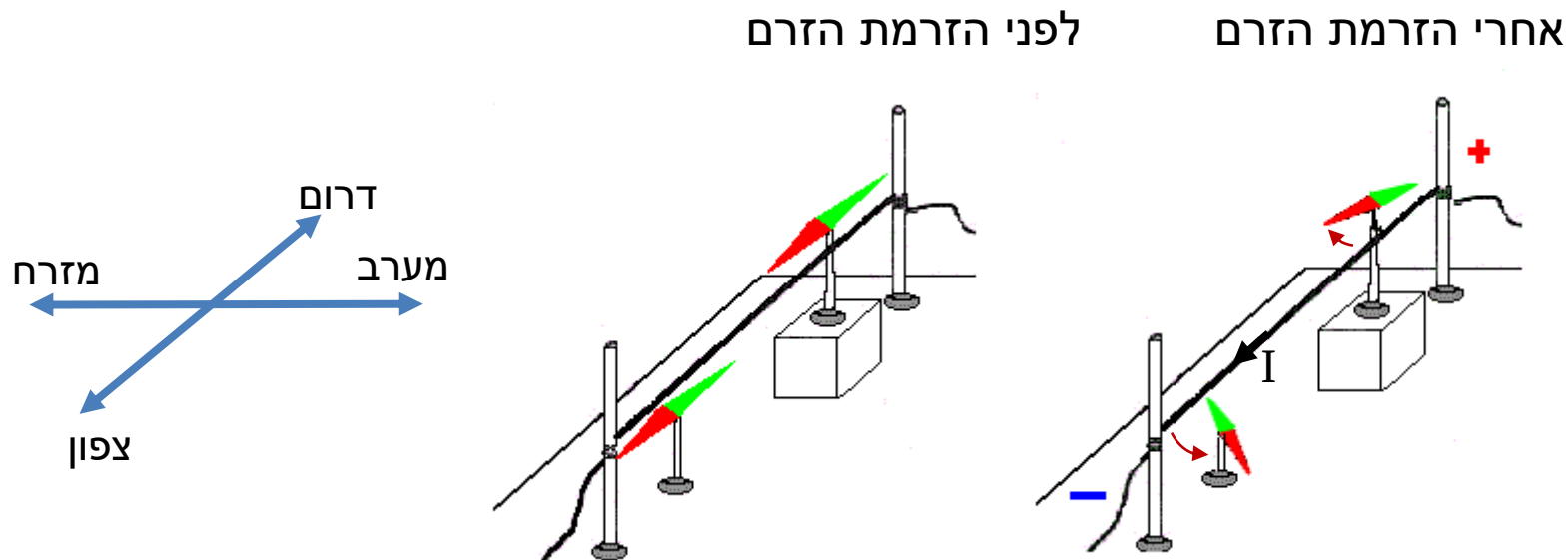
2. רביע שני : החוצה מהמסך ( $+z$ )

3. רביע שלישי : החוצה מהמסך ( $+z$ )

4. רביע רביעי : פנימה לתוך המסך ( $-z$ )

# מציאת הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי

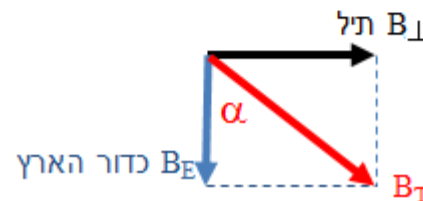
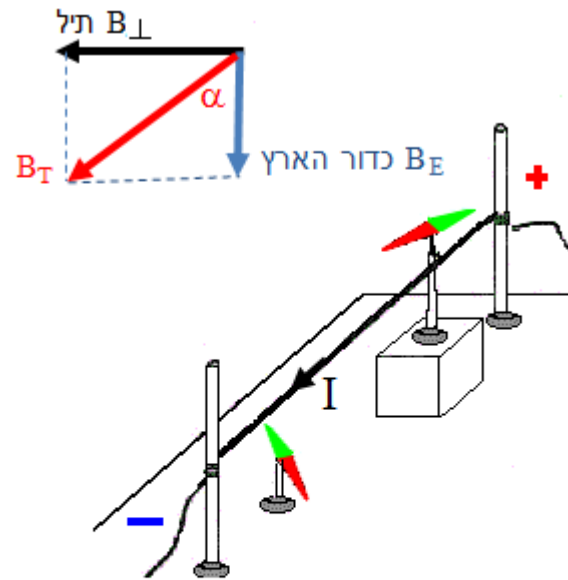
מה יהיה הכיוון של השדה המגנטי במקום בו קיימים שני שדות מגנטיים שונים?



נניח מצפן אחד מעל תיל ומצפן שני מתחת לתיל. במצב זה שני המצפנים מצביעים על הכיוון צפון-דרום. כאשר נזרים זרם קטן בתיל בכיוון צפונה סוטה המחט שמעל לתיל מזרחה, והמחט שמתחת לתיל סוטה מערבה.

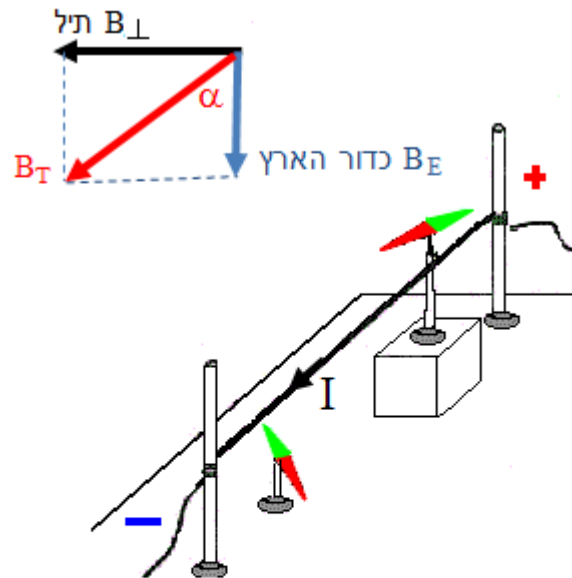
# המשך מציאת הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי

על המחט העליונה פועל הרכיב האופקי של השדה הארצי  $B_E$  והשדה שנוצר בשל הזרם הזורם בתיל  $B_{\perp}$  (ניצב לתיל) מזרחה (לפי כלל יד ימין), על המחט התחתונה פועל הרכיב האופקי של השדה הארצי  $B_T$  (ניצב לתיל) מזרחה (לפי כלל יד ימין). המחטים תסתדרנה באיזה שהוא "כיוון ביניים" בין כיווני השדות כי המחט מוגבלת לתנועה אופקית בלבד, כלומר, מחט המצפן תתייצב בכיוון השדה מגנטי השקול  $B_T$ , היוצר זווית  $\alpha$  עם כיוון הצפון.



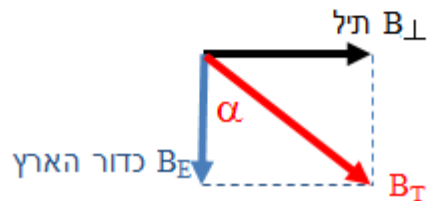
# המשך מציאת הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי

מניסויים בהם מודדים את זווית הסטייה של מחט המצפן מכיוון צפון כאשר הזרם קבוע והמרחק משתנה, או לחילופין כאשר המרחק קבוע והזרם משתנה, ניתן למצוא את גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי.



$$\tan \alpha = \frac{B_{\perp}}{B_E}$$

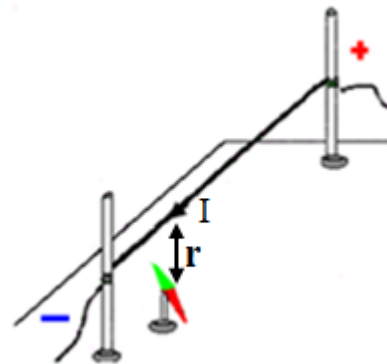
$$\tan \alpha = \frac{\frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}}{B_E} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r \cdot B_E}$$



## תרגיל 3: עצמת השדה המגנטי של תיל ארוך

תלמיד רצה למדוד את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ לשם כך הוא מתח על שולחן תיל ישר וארוך בכיוון צפון - דרום (המגנטי של הארץ). הוא חיבר בטור אל התיל נגד משתנה, אמפרמטר ומקור מתח, והזרים בתיל זרם שעוצמתו  $I = 3.7 \text{ [A]}$  וכיוונו מדרום לצפון. התלמיד הציב מצפן בגובה  $r$  מעל התיל, ומדד את זווית הסטייה של מחט המצפן מכיוון צפון. התלמיד שינה את  $r$  כמה פעמים, ובכל פעם מדד את זווית הסטייה. תוצאות המדידות רשומות בטבלה שלפניך, וכן רשומים ערכים של  $\tan \alpha$ .

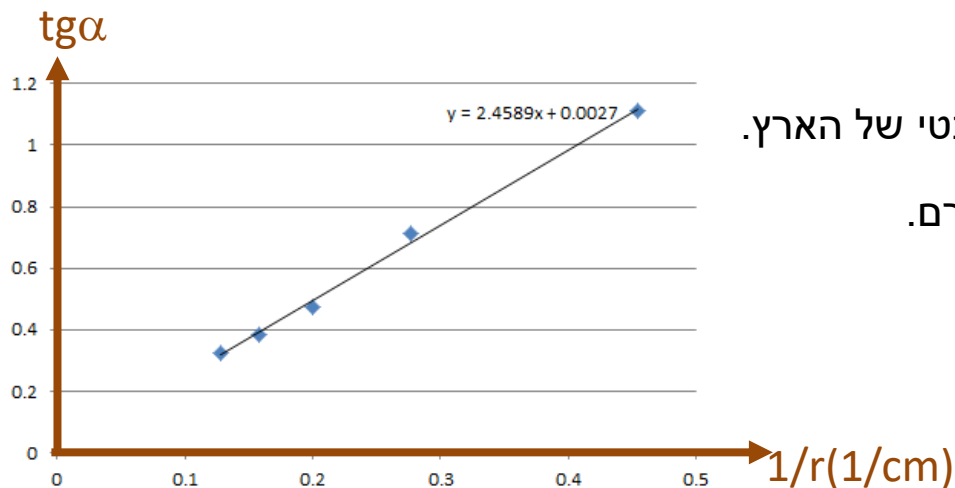
| $\tan \alpha$ | $1/r \left( \frac{1}{\text{cm}} \right)$ | $\alpha (^\circ)$ | $(\text{cm})r$ |
|---------------|------------------------------------------|-------------------|----------------|
| 1.11          | 0.454                                    | 48.5              | 2.2            |
| 0.714         | 0.277                                    | 36                | 3.6            |
| 0.476         | 0.2                                      | 26                | 5              |
| 0.384         | 0.158                                    | 21                | 6.3            |
| 0.322         | 0.128                                    | 18                | 7.8            |



- סרטט גרף של  $\tan \alpha$  כפונקציה של  $1/r$ .
- סרטט את מחט המצפן ואת הכיוונים של כל אחד מהשדות המגנטיים הפועלים עליה ואת הזווית  $\alpha$ .
- (1) פתח ביטוי ל-  $\tan \alpha$  כפונקציה של  $1/r$ .
- (2) חשב בעזרת הגרף, ששרטטת בסעיף א, את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ.

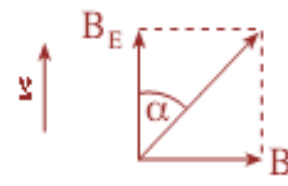
# פתרון תרגיל 3: עצמת השדה המגנטי של תיל ארוך

א.



ב.  $B_E$  - הרכיב האופקי של השדה המגנטי של הארץ.

$B_+$  - השדה המגנטי הנוצר על ידי הזרם.



ג.

$$B_I = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad \text{שדה מגנטי סביב תיל ישר:}$$

ד.

מהתרשים בסעיף ב':

$$\tan \alpha = \frac{B_I}{B_E} \quad \tan \alpha = \frac{\frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}}{B_E} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot B_E} \cdot \frac{1}{r}$$

שיפוע הגרף שווה ל:

$$\frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot B_E}$$

השיפוע מהגרף:

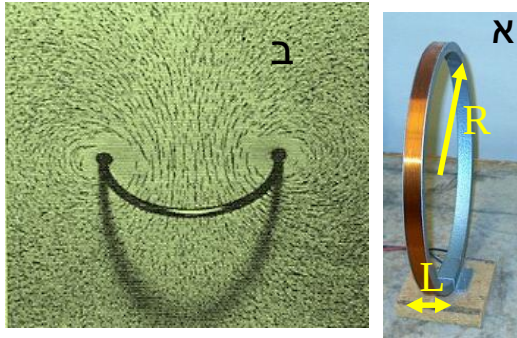
$$\frac{1.11 - 0.322}{0.454 - 0.128} \cong 2.4 [cm]$$

$$0.024 = \frac{1.257 \cdot 10^{-6} \cdot 3.7}{2\pi \cdot B_E}$$

$$B_E \cong 3 \cdot 10^{-5} [T]$$

לקן:

# השדה המגנטי במרכז סליל מעגלי דק נושא זרם ("כריכה")



נבחן כעת מקרה נוסף חשוב: השדה המגנטי הנוצר על ידי סליל מעגלי דק נושא זרם, שהוא סליל בעל רדיוס  $R$  ו-  $N$  כריכות, שאורכו  $L$  קטן בהרבה מרדיוסו ( $R \gg L$ ) (תצלום א).

בתצלום ב' מוראה מבט-על של נסורת ברזל, המפוזרת על נייר שמונח במרכזה של טבעת מעגלית. ניתן לראות שצורת השדה מזכירה את השדה הנוצר בקרבת מגנט פרסה. צפיפות קווי השדה גבוהה ביותר במרכז הטבעת, כלומר שם עוצמת השדה מכסימלית. ניתן להראות שעוצמת השדה במרכז הטבעת הינה:

$$B_I = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$$

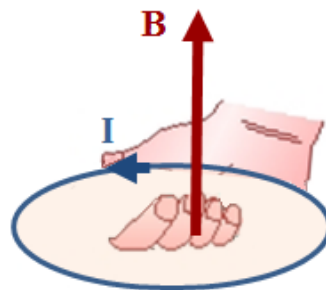
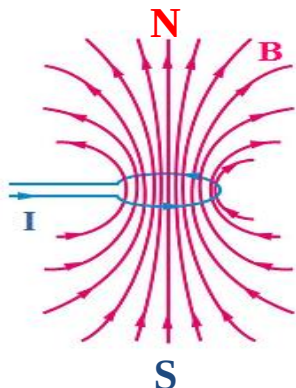
$R$ - רדיוס הטבעת.

כאשר ישנן  $N$  טבעות הכרוכות יחדיו, נוצר סליל מעגלי דק (הקרוי גם "כריכה"), שאורכו  $L$  קטן מאד מרדיוסו  $R$ . לפי עקרון הסופרפוזיציה, עוצמת השדה המגנטי במרכז הסליל היא:

$$B_I = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$$

# כיוון השדה המגנטי במרכז סליל מעגלי דק נושא זרם

לקביעת הכיוון של השדה המגנטי במרכז הסליל נשתמש שוב באותם הכללים בהם השתמשנו במקרה של תיל ישר מוזרם.



לעיתים, נוח יותר לקבוע את כיוון השדה המגנטי כאשר האצבעות והאגודל מחליפים תפקידים.

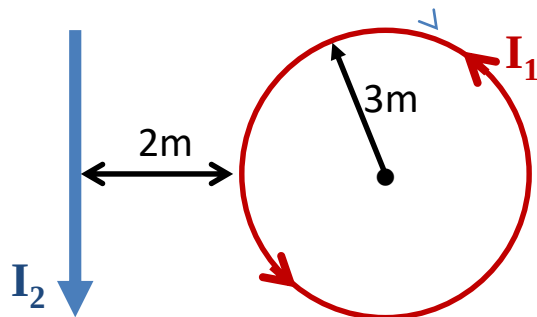
במקרה זה יופעל כלל ימין באופן הבא:

מניחים את יד ימין כך, שהאצבעות סוגרות על הכריכה בכיוון הזרם, והאגודל מופנה בכיוון השדה.



## דוגמא 4: גודל וכיוון שדה מגנטי במרכז סליל מעגלי דק

בכריכה המעגלית שבתרשים זורם בו זרם שעוצמתו  $I_1=2[A]$  בכיוון המתואר בתרשים. משמאלו של התיל נמצא תיל ארוך שזורם בו זרם שעוצמתו  $I_2=4[A]$ . התיל נמצא במישור הכריכה.



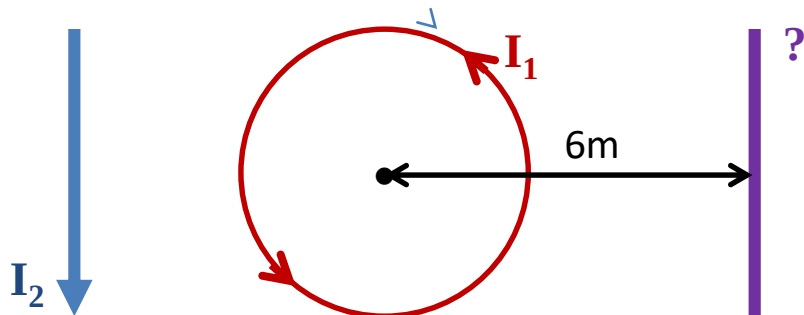
א. מצאו את גודל וכיוון השדה המגנטי שיוצר התיל במרכז הכריכה.

ב. מצאו את גודל וכיוון השדה המגנטי שיוצרת הכריכה במרכז.

ג. מוסיפים תיל ארוך נוסף מימין לכריכה ובמישור הכריכה (ראו תרשים)

מה צריך להיות גודל וכיוון הזרם בתיל הנוסף (מעלה או מטה) בכדי שהשדה השקול במרכז הכריכה

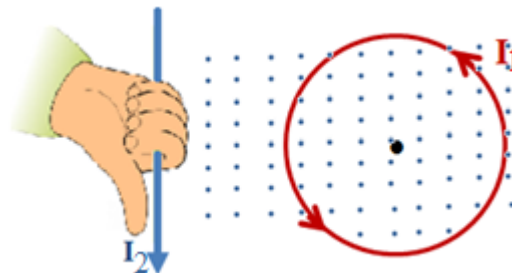
יהיה שווה אפס?



# פתרון דוגמא 4: מציאת גודל וכיוון שדה מגנטי במרכז סליל מעגלי דק

א. על פי כלל היד הימנית כיוון השדה המגנטי שיוצר התיל במרכז הכריכה הוא החוצה.

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{4}{5} = 1.6 \cdot 10^{-7} [T]$$



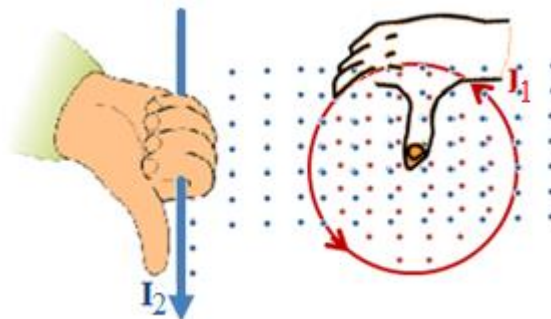
ב. על פי כלל היד הימנית כיוון השדה המגנטי שיוצרת הכריכה במרכז הוא החוצה.

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I_1}{R} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2} \cdot \frac{2}{3} = 4.188 \cdot 10^{-7} [T]$$



מכאן שכיוון השדה המגנטי השקול במרכז הכריכה הוא החוצה.

$$B_T = B_1 + B_2 = 4.188 \cdot 10^{-7} + 1.6 \cdot 10^{-7} = 5.788 \cdot 10^{-7} [T]$$

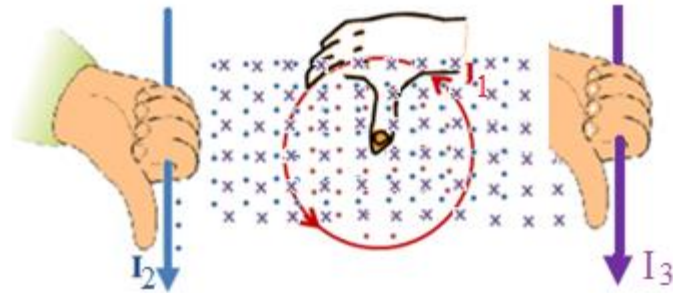


ג. התיל הארוך הימני צריך ליצור שדה בכיוון פנימה במרכז הכריכה המעגלית, בכדי שהשדה השקול במרכז הכריכה יהיה שווה אפס. לכן, על פי כלל יד ימין, כיוון הזרם בתיל הימני הוא בכיוון מטה. נחשב את גודלו:

$$B_3 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_3}{r} = B_T$$

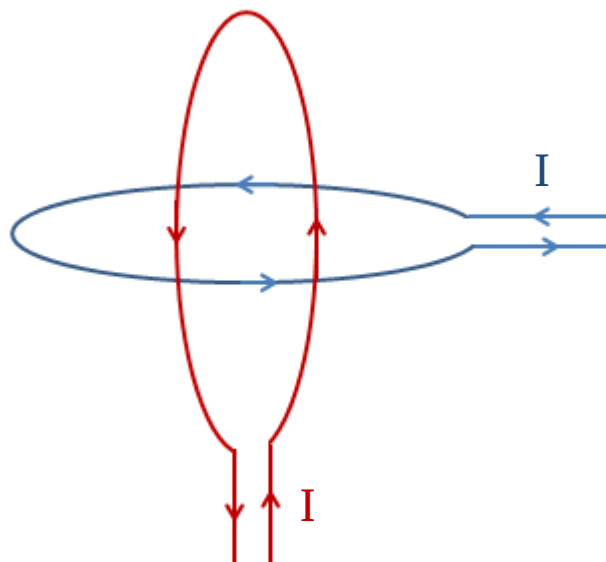
$$5.788 \cdot 10^{-7} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I_3}{6}$$

$$I_3 = 17.36 [A]$$



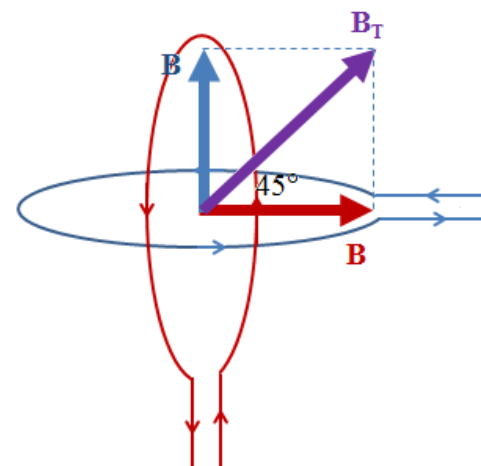
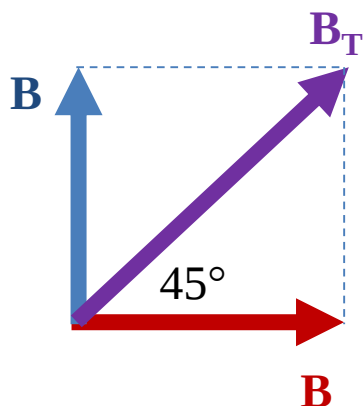
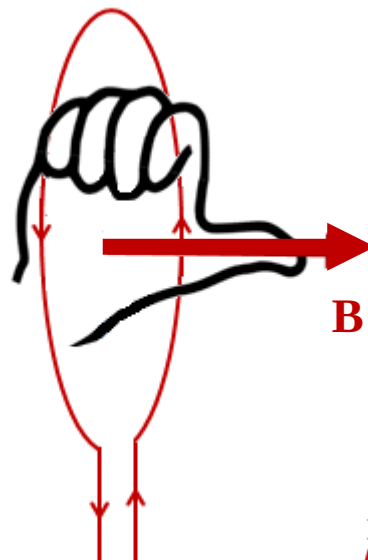
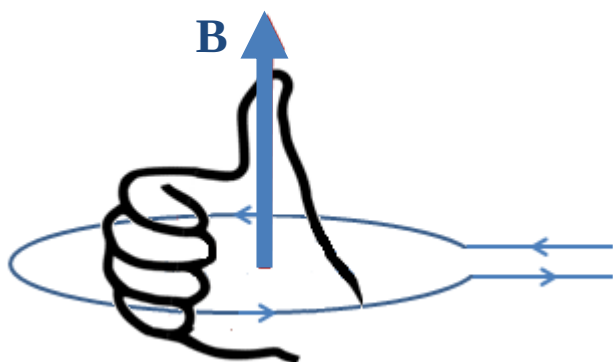
## דוגמא 5: כיוון השדה מגנטי במרכז שתי כריכות מעגליות

יש למצוא את כיוון השדה המגנטי במרכזן של שתי כריכות מעגליות זהות בעלות מרכז משותף, שמישוריהן ניצבים זה לזה, כאשר זורם בכל אחת מהן זרם שעוצמתו  $I$  (כמתואר בתרשים).



# פתרון דוגמא 5: כיוון השדה מגנטי במרכז שתי כריכות מעגליות

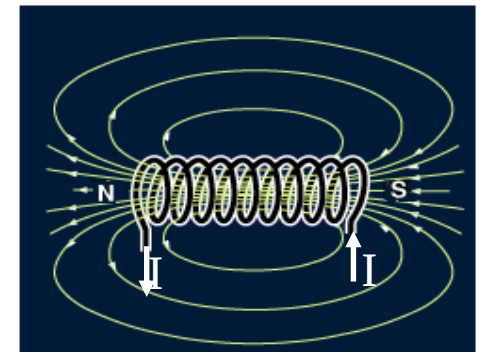
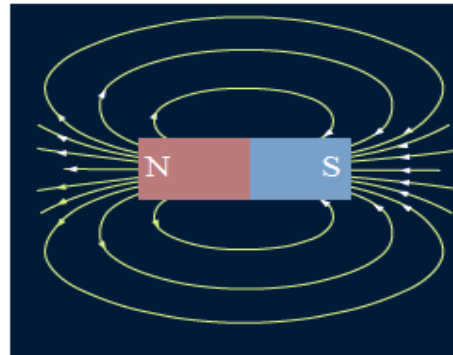
נמצא על פי כלל יד ימין את כיוון השדה המגנטי במרכזה של כל כריכה, מאחר וממרכז זה הוא משותף, נמצא את הכיוון של השדה השקול.



כיוון השדה השקול הוא בזווית של  $45^\circ$  ביחס לכל אחד ממישורי הכריכות.

## השדה המגנטי בתוך סילונית ארוכה נושאת זרם

מקרה אחר בעל חשיבות טכנולוגית רבה הוא השדה הנוצר על ידי סליל ארוך נושא זרם, הנקרא לעיתים **סילונית**. בהדגמה שבתצלום רואים (מלמעלה) נסורת ברזל המפוזרת על נייר, שמונח לאורך ציר הסליל, שדרכו מוזרם זרם. ניתן לראות שצורת השדה מזכירה את השדה הנוצר בקרבת מוט מגנטי. בתוך הסליל השדה המגנטי אחיד למדי, ומחוץ לסליל השדה חלש ככל שמתרחקים מהקטבים.



השדה המגנטי הכולל בנקודות שונות בסליל ומחוצה לו מתקבל על ידי חיבור וקטורי של השדות המגנטיים של כל אחת מהלולאות. בתוך הסליל הם מחזקים זה את זה, ומחוץ לסליל הם מחלישים זה את זה. ככל שמספר הליפופים גדול יותר, עוצמת השדה גדולה יותר.

עבור סילונית (שרדיוסה קטן ביחס לאורכה) השדה המגנטי בתוך הסליל ולא קרוב מידי לקטבים, הינו שדה אחיד (בקירוב), שגודלו נתון על ידי:

$$B_I = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot I$$

N – מספר הליפופים

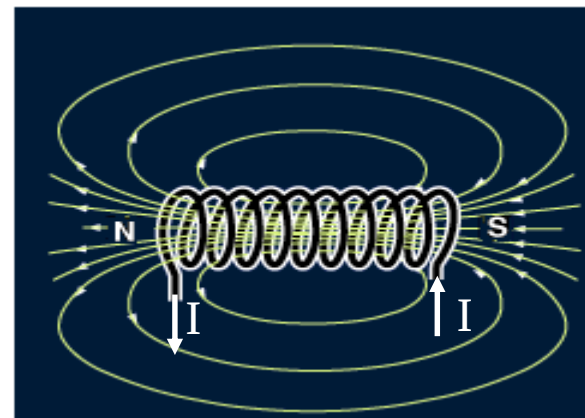
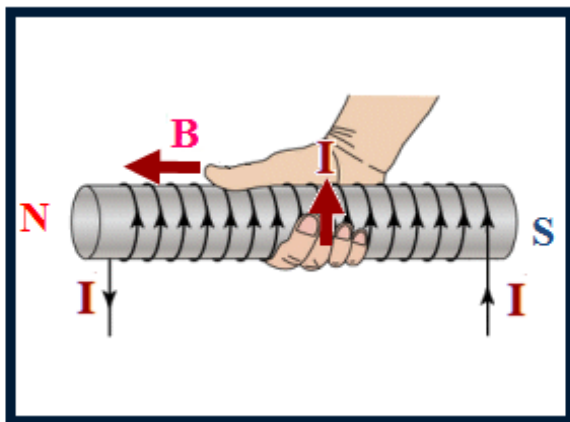
L – אורך הסליל

# כיוון השדה המגנטי לאורכו של סליל נושא זרם

לקביעת הכיוון של השדה המגנטי במרכז הסליל נשתמש שוב באותם הכללים בהם השתמשנו במקרה של תיל מוזרם בכריכה מעגלית.

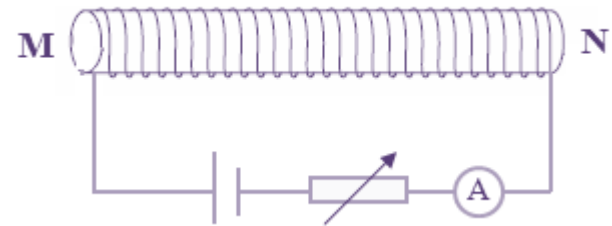
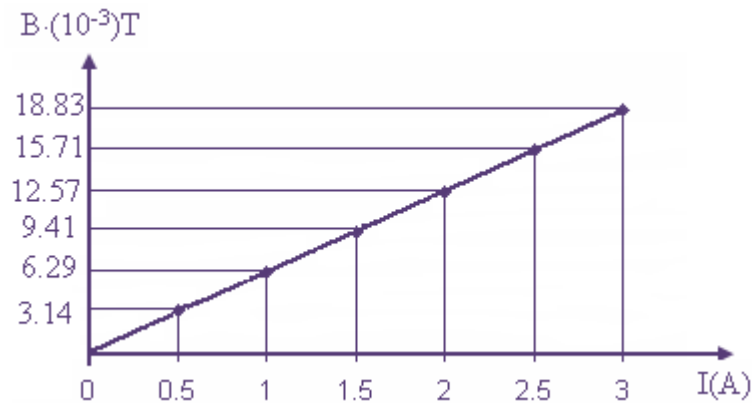
## כלל היד הימנית

מניחים את יד ימין כך, שהאצבעות סוגרות על הסליל בכיוון הזרם, והאגודל מופנה בכיוון השדה. הדבר נובע מכיוון השדה הנוצר מכריכה אחת.



## תרגיל 6: השדה המגנטי לאורכו של סליל נושא זרם

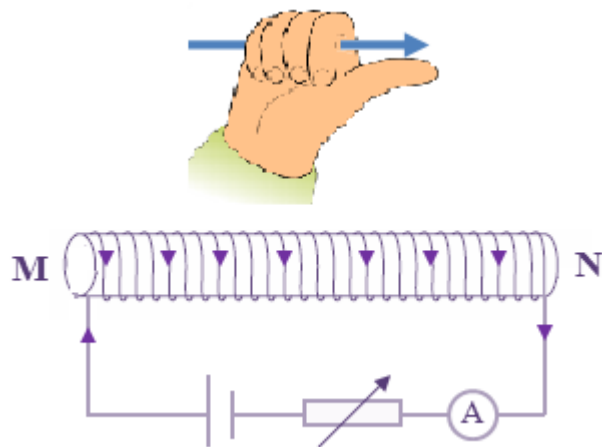
תלמיד חיבר למקור מתח סילונית שאורכה 0.4 מטר, נגד משתנה ואמפרמטר. הוא מדד את עוצמת השדה המגנטי במרכז הסילונית כפונקציה של עוצמת הזרם שעבר בה. התלמיד סרטט את הגרף הבא של עוצמת השדה המגנטי,  $B$ , כפונקציה של עוצמת הזרם,  $I$ , בסילונית.



- א. מה כיוון השדה המגנטי, מ-  $M$  ל-  $N$  או מ-  $N$  ל-  $M$  ?
- ב. איזה גודל מייצג שיפוע הגרף?
- ג. (1) מצא בעזרת הגרף את צפיפות הליפופים,  $N/L$ , (מספרם ליחידת אורך) בסילונית.  
(2) מהו מספר הליפופים  $N$  בסילונית?

# פתרון תרגיל 6: השדה המגנטי לאורכו של סליל נושא זרם

א. כיוון השדה המגנטי מ- M ל- N על פי כלל היד הימנית.



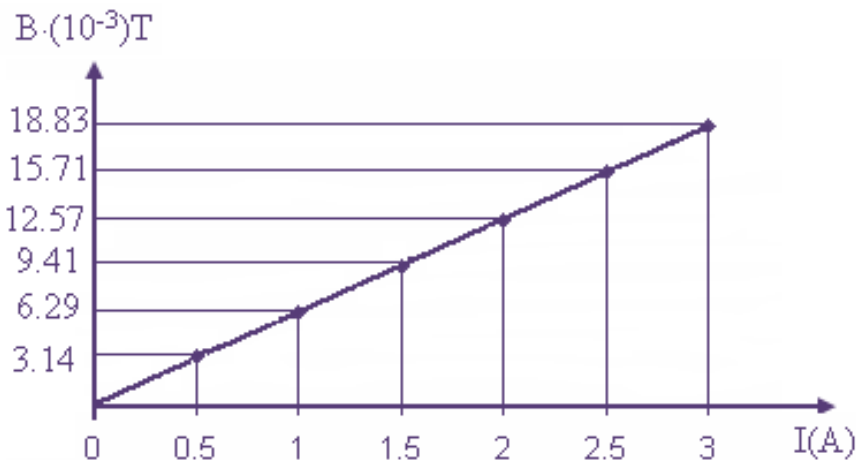
$$\frac{N}{L} = n$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{L} = \mu_0 \cdot n \cdot I$$

$$\frac{\Delta B}{\Delta I} = \frac{18.83 - 0}{3 - 0} = 6.27 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{T}{A} \right]$$

$$\frac{\Delta B}{\Delta I} = \mu_0 \cdot n \Rightarrow n = \frac{\Delta B}{\Delta I} = \frac{6.27 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0.5 \cdot 10^4 = 5000 [m^{-1}]$$

$$n = \frac{N}{L} \Rightarrow N = n \cdot L = 5000 \cdot 0.4 = 2000$$



ב. שיפוע הגרף הוא:

$$\frac{\Delta B}{\Delta I} = \mu_0 \cdot n$$

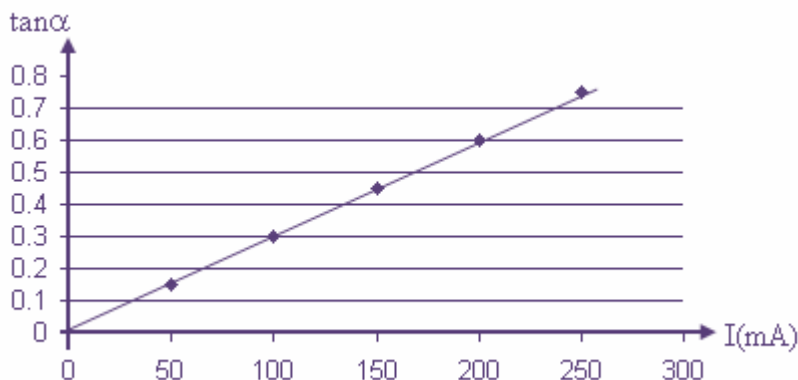
ג. 1. נחשב את השיפוע על פי 2 נקודות מהגרף:

תלמיד רוצה למדוד את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ לשם כך הוא בנה סילונית שבה צפיפות הליפופים (מספר הליפופים ליחידת אורך) היא  $\frac{N}{\lambda} = 79m^{-1}$ . הוא שם מצפן במרכז הסילונית, וסובב אותה עד שציר הסילונית היה בכיוון מאונך למחט המצפן. התלמיד חיבר בטור אל הסילונית נגד משתנה, אמפרמטר ומקור מתח. הוא הזרים זרמים שונים במעגל החשמלי, ובכל פעם מדד את עוצמת הזרם  $I$  (במיליאמפרים) ואת זווית הסטייה של מחט המצפן מכיוון צפון. תוצאות המדידות רשומות בטבלה שלפניך.

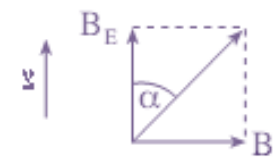
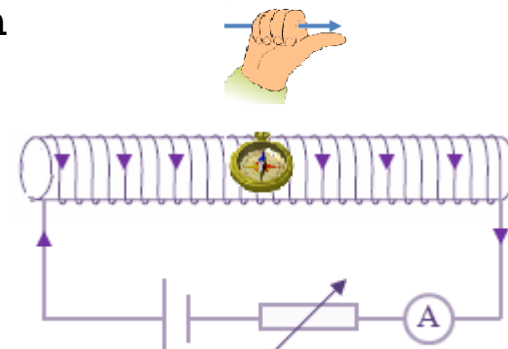
| $\tan \alpha$ | $\alpha(^{\circ})$ | $I(mA)$ |
|---------------|--------------------|---------|
| 0.14          | 8                  | 50      |
| 0.29          | 16                 | 100     |
| 0.44          | 24                 | 150     |
| 0.58          | 30                 | 200     |
| 0.73          | 36                 | 250     |

- סרטט תרשים של המעגל החשמלי.
  - סרטט גרף של  $\tan \alpha$  כפונקציה של  $I$ .
  - סרטט את כיווני השדות המגנטיים הפועלים על מחט המצפן (במצב שבו עובר זרם במעגל החשמלי). סמן בתו שים זה את הכיוון צפון ואת הזווית  $\alpha$ .
  - (1) פתח ביטוי ל  $\tan \alpha$  כפונקציה של  $I$ .
- (2) חשב בעזרת הגרף, סרטטת בסעיף ב, את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ.
- ה. התלמיד הציב את המצפן בקצה הסילונית והזרים בה זרם. זווית הסטייה של מחט המצפן מכיוון צפון הייתה שונה מזווית הסטייה שהייתה במצב שבו המצפן היה במרכז הסילונית. הסבר מדוע השתנתה זווית הסטייה של מחט המצפן.

# פתרון תרגיל 7: מציאת הרכיב האופקי בעזרת סילונית



א. ב.



ג.

ד. (1) על פי התרשים בסעיף הקודם:  $tg \alpha = \frac{B_I}{B_E}$ , עוצמת השדה בסילונית:

$$B_I = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

$$\tan \alpha = \frac{B_I}{B_E} = \frac{\mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}}{B_E} = \frac{\mu_0 \cdot N}{l \cdot B_E} \cdot I$$

(2) שיפוע הגרף:  $\frac{\mu_0 \cdot N}{\lambda \cdot B_E}$ ; נמצא את גודלו בעזרת שתי נקודות מהגרף:

$$\frac{0.58 - 0.29}{200 \cdot 10^{-3} - 100 \cdot 10^{-3}} = 2.9 [A^{-1}]$$

$$2.9 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 79}{B_E} \Rightarrow B_E = 3.4 \cdot 10^{-5} [T]$$

ה. בתוך הסילונית השדה המגנטי הוא בקירוב אחיד ובקצה הסילונית הוא שונה.

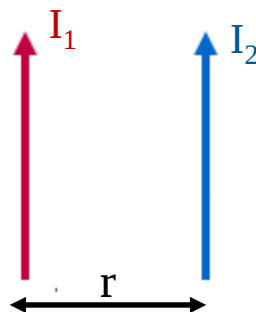
# הכוח הפועל בין שני תילים ארוכים נושאי זרם

צפינו בניסויים בהם כאשר מזרימים זרמים בשני תילים באותו כיוון, התילים מושכים זה את זה, וכאשר מזרימים זרמים בשני תילים בכיוונים מנוגדים התילים דוחים זה את זה.



עתה, לאחר שלמדנו כיצד לחשב את גודל וכיוון השדה המגנטי הנוצר על ידי תיל ישר ואורך נושא זרם, ולמדנו כיצד לחשב את גודל וכיוון הכוח המגנטי הפועל על תיל נושא זרם בשדה מגנטי, נוכל לחשב את גודלו וכיוונו של הכוח המגנטי הפועל בין שני תילים מקבילים.

נתבונן בשני תילים ארוכים, ישרים ומקבילים, שבהם זורמים הזרמים  $I_1$  ו-  $I_2$  באותו הכיוון. נמצא את כיוון הכוח, הפועל בין התילים, ואת גודלו של כוח זה.



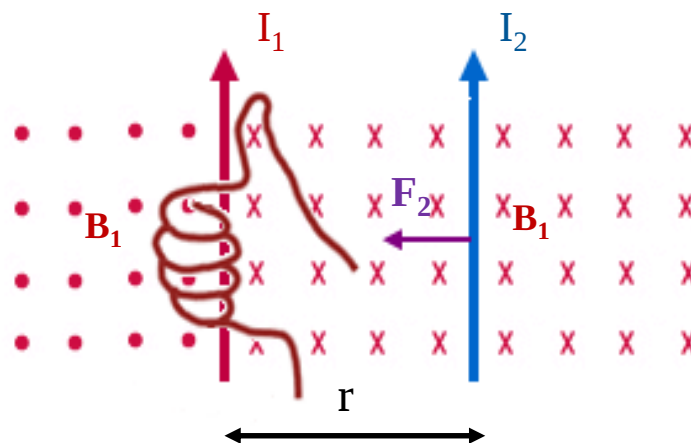
## הכוח הפועל בין שני תילים ארוכים נושאי זרם

כל אחד משני התילים נמצא בשדה המגנטי, הנוצר על-ידי התיל האחר. לכן, על כל תיל פועל כוח שכיוונו נקבע על פי כלל יד ימין. כדי למצוא את כיוון הכוח נמצא תחילה את כיוון השדה המגנטי שיוצר כל אחד מהתילים. תיל 1 יוצר שדה מגנטי שכיוונו על פי כלל יד ימין הוא אל תוך הדף מימין לו. גודלו של שדה מגנטי זה נתון על-ידי:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r}$$

תיל 2 נמצא בשדה המגנטי, הנוצר על ידי תיל 1. על פי כלל יד ימין הכוח הפועל על תיל 2 מכוון אל תיל 1 (שמאלה). לכן, גודל הכוח הפועל על קטע באורך  $L$  של תיל 2 הוא:

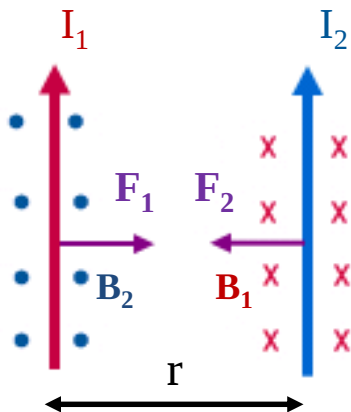
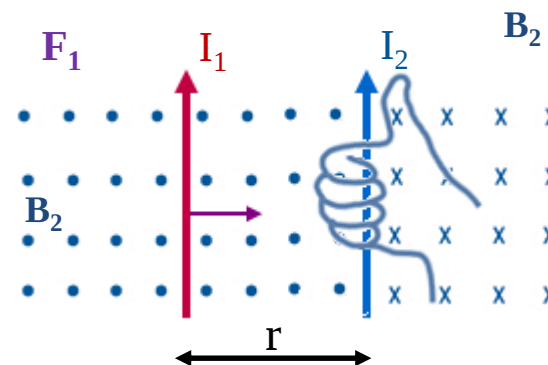
$$F_2 = I_2 \cdot L \cdot B_1 = I_2 \cdot L \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r}$$



מטעמי סימטריה אותו גודל כוח יפעל על קטע שאורכן  $L$  מהתיל הראשון, אך כיוונו הפוך כמובן.

תיל 1 נמצא בשדה המגנטי  $B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r}$ , הנוצר על ידי תיל 2. על פי כלל יד ימין הכוח הפועל על תיל 1 מכוון אל תיל 2 (ימינה). לכן, גודל הכוח הפועל על קטע באורך  $L$  של תיל 2 הוא:

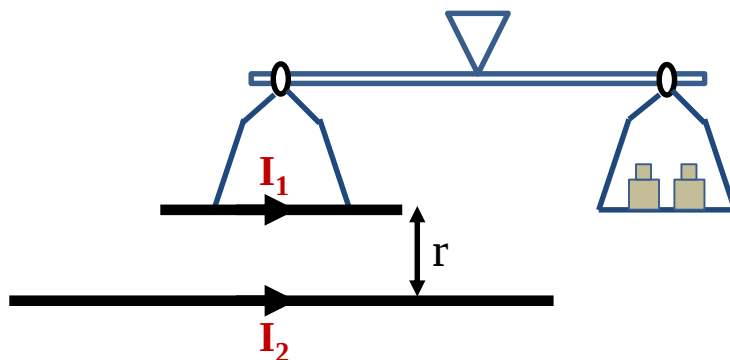
$$F_1 = I_1 \cdot L \cdot B_2 = I_1 \cdot L \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r}$$



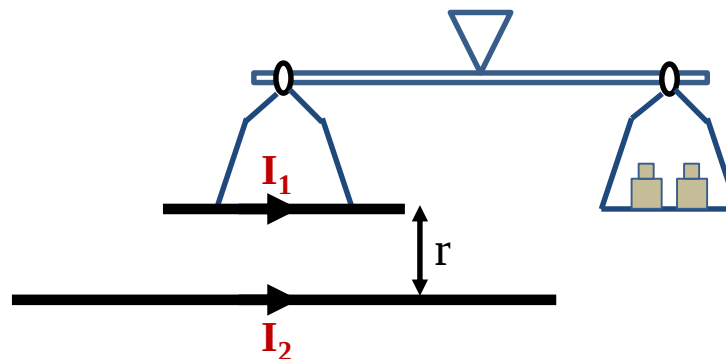
לעיתים, יש צורך לדעת את הכוח הפועל על יחידת אורך של התיל ואז מתקבל:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r}$$

מאזניים רגישים יכולים למדוד כוחות בדיוק רב מאוד ומאפשרים "לשקול" את הכוח המגנטי הפועל בין תילים מקבילים נושאי זרם. הנה תיאור סכמתי של מאזניים כאלו:



במקום הכף השמאלית במאזניים נמצא תיל שאורכו  $L$ . במקביל לתיל זה ובמרחק  $r$  ממנו. נמצא תיל אורך מאוד. כל אחד מהתילים הוא חלק ממעגל חשמלי, כך שבתילים זורמים הזרמים  $I_1$  ו-  $I_2$ . התילים מושכים זה את זה, ולכן התיל העליון נמשך כלפי מטה, וכתוצאה מכך מופר שיווי-המשקל של המאזניים. כדי להחזיר את שיווי-המשקל, מניחים משקלות הכף הימנית של המאזניים.



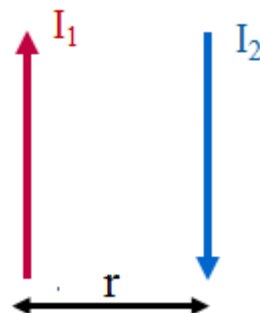
המשקל, הדרוש לאיזון המאזניים, שווה לכוח שבו מושך התיל הארוך את התיל באורך  $L$ . אפשר להשתמש בתופעה זו של משיכה (או דחייה) מגנטית בין שני תילים נושאי זרם, כדי להגדיר את יחידת הזרם החשמלי, באמצעות המשוואה:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r}$$

**אמפר** אחד הוא גודל הזרם, אשר אם יזרם בשני תילים מוליכים ישרים, מקבילים וארוכים מאוד, המצויים בריק במרחק של 1 מטר זה מזה, יפעל ביניהם כוח הדדי שגודלו  $2 \cdot 10^{-7}$  ניוטון למטר.

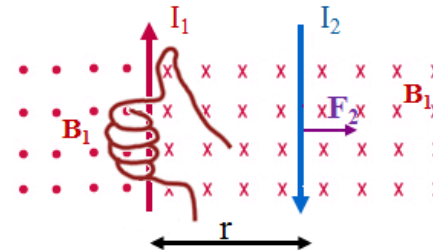
## תרגיל 8: זרמים בכיוונים מנוגדים בשני תילים מקבילים

מהו גודלו וכיוונו של הכוח המגנטי הפועל בין שני תילים מקבילים, כאשר מזרימים זרמים בשני התילים בכיוונים מנוגדים ?



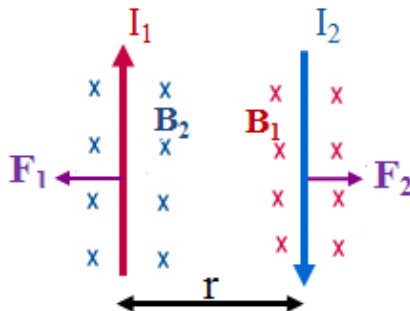
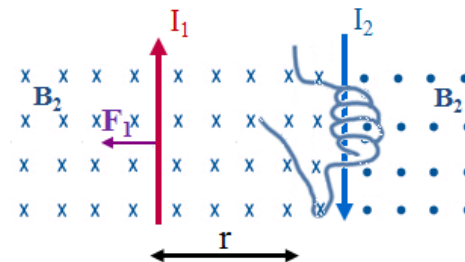
תיל 1 יוצר שדה מגנטי שכיוונו על פי כלל הבורג הוא אל תוך הדף מימין לו. גודלו של שדה מגנטי זה נתון על-ידי:  $B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r}$ . תיל 2 נמצא בשדה המגנטי, הנוצר על ידי תיל 1. על פי כלל יד ימין הכוח הפועל על תיל 2 מכוון ימינה. לכן, גודל הכוח הפועל על קטע באורך  $L$  של תיל 2 הוא:

$$F_2 = I_2 \cdot L \cdot B_1 = I_2 \cdot L \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r}$$



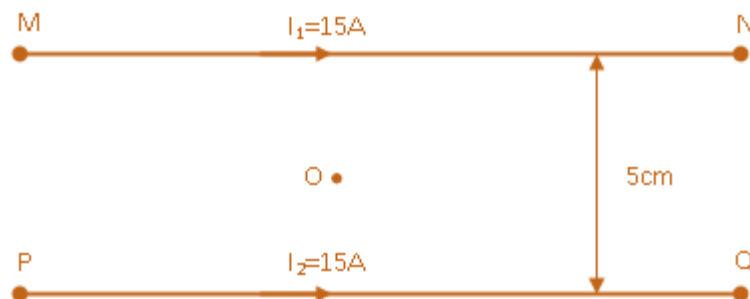
תיל 2 יוצר שדה מגנטי שכיוונו על פי כלל הבורג הוא פנימה אל תוך הדף משמאל לו. גודלו של שדה מגנטי זה נתון על-ידי:  $B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r}$ . תיל 1 נמצא בשדה המגנטי, הנוצר על ידי תיל 2. על פי כלל יד ימין הכוח הפועל על תיל 1 מכוון שמאלה. לכן, גודל הכוח הפועל על קטע באורך  $L$  של תיל 2 הוא:

$$F_1 = I_1 \cdot L \cdot B_2 = I_1 \cdot L \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r}$$



הכוחות הם שווים בגודלם והפוכים בכיוונם, במקרה זה הם דוחים זה את זה.

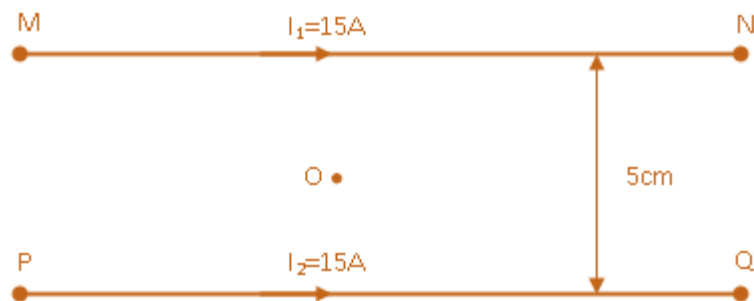
שני תילים ארוכים, MN ו- PQ, נמצאים במישור אחד. התילים מקבילים זה לזה, והמרחק ביניהם הוא 5 cm. דרך התילים MN ו- PQ עוברים זרמים  $I_1$  ו-  $I_2$  בהתאמה, הזרמים בכיוונם, ועוצמתו של כל אחד מהם היא 15 A.



- מהו כיוון הכוח המגנטי שהתיל MN מפעיל על התיל PQ? הסבר.
- מהו השדה המגנטי השקול לשדות המגנטיים הנוצרים על ידי הזרמים בתילים MN ו- PQ בנקודה O, הנמצאת במישור של שני התילים במרחק 2.5 cm מכל אחד מהם? נמק.

## פתרון תרגיל 9 : כוחות בין תילים

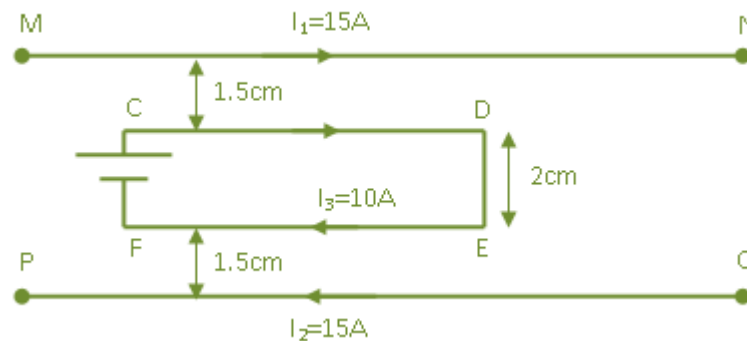
א. כיוון הכוח המגנטי הוא כלפי מעלה. על פי כלל יד ימין, השדה המגנטי באזור התיל PQ (בהשפעת הזרם הזורם בתיל MN) הוא פנימה במאונך למישור הדף. מאחר שבתיל זורם זרם מ- P ל- Q פועל על התיל כוח מגנטי שכיוונו מעלה על פי כלל הימנית.



ב. השדה השקול בנקודה O שווה לאפס.  
בהשפעת הזרם בתיל MN השדה המגנטי בנק' O הוא פנימה.  
בהשפעת הזרם בתיל PQ השדה המגנטי בנק, O הוא החוצה.  
מאחר והזרמים שווים בעוצמתם והם נמצאים במרחק שווה מהנקודה O השדות המגנטיים שיוצרים שני התילים מבטלים זה את זה.

שני תילים ארוכים, MN ו- PQ, נמצאים במישור אחד. התילים מקבילים זה לזה, והמרחק ביניהם הוא 5 cm. דרך התילים MN ו- PQ עוברים זרמים  $I_1$  ו-  $I_2$  בהתאמה, המנוגדים בכיוונם, ועוצמתו של כל אחד מהם היא 15 A.

במישור התילים ובדיוק באמצע ביניהם מוסיפים מסגרת מלבנית מוליכה CDEF, שאורכי צלעותיה הם  $CD = 10\text{cm}$  ו-  $DE = 2\text{cm}$ . הצלע CD והתיל MN מקבילים זה לזה, והמרחק ביניהם הוא  $L = 1.5\text{cm}$ . במסגרת זורם שזרם שזרם  $I_3 = 10\text{A}$ , כמתואר בתרשים.



א. הסבר מדוע במצב זה הכוח המגנטי השקול הפועל על המסגרת CDEF שווה לאפס.

ב. מסלקים את התיל PQ.

מהו הכוח המגנטי השקול (גודל וכיוון), הפועל על המסגרת CDEF בהשפעת הזרם הזורם בתיל MN?

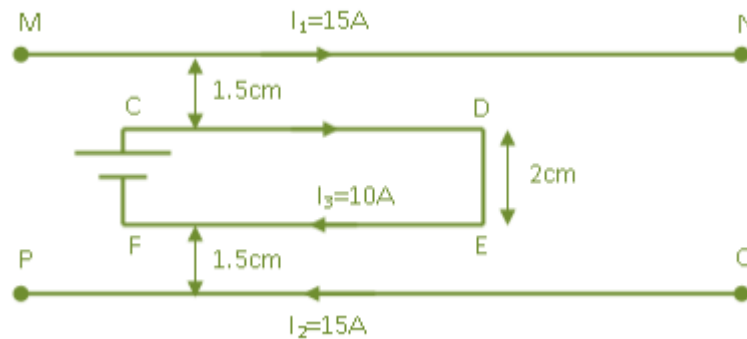
## פתרון תרגיל 10 : כוחות בין תילים

א. הכוח השקול על המסגרת שווה לאפס מכיוון ש-MN מושך את CD ו-PQ מושך את EF.

השקול שלהם שווה לאפס כי שני כוחות אלה שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

MN דוחה את EF ו-PQ דוחה את CD. גם הפעם השקול שלהם שווה לאפס כי שני כוחות

אלה שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.



ב. הכוח שהתיל MN מושך את CD:  $F_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_3 \cdot L}{2\pi r_1}$

הכוח שהתיל MN דוחה את FE:  $F_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_3 \cdot L}{2\pi r_2}$

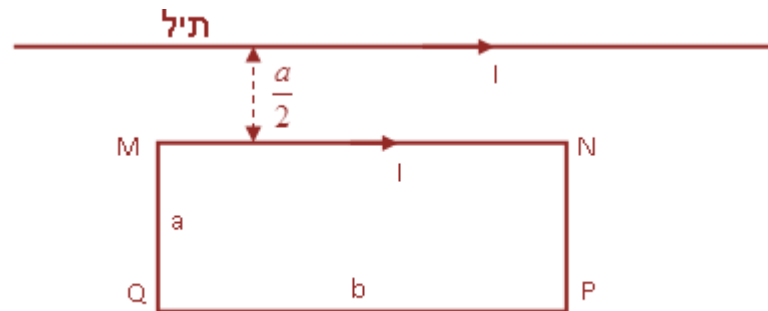
מאחר ו-  $r_1 < r_2$  מתקבל  $F_1 > F_2$  לכן הכוח השקול הוא כוח משיכה בכיוון מעלה וגודלו:

$$\sum F = F_1 - F_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_3 \cdot L}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\sum F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 15 \cdot 10 \cdot 0.1}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{0.015} - \frac{1}{0.035} \right)$$

$$\sum F = 1.143 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

מסגרת מוליכה מלבנית MNPQ מונחת על לוח אופקי. אורכי צלעות המסגרת הם  $a$  ו- $b$ . המסגרת מחוברת למקור מתח, באופן שזורם בה זרם  $I$ . תיל ישר וארוך שגם בו זורם זרם  $I$ , נמצא על הלוח במקביל לצלע MN של המסגרת, ובמרחק  $a/2$  ממנה. בתרשים שלפניך מתוארת באופן סכמטי המערכת ממבט על. נתון:  $b=18\text{cm}$ ,  $a=2\text{cm}$ ,  $I=30\text{A}$ .



- חשב את הכוח המגנטי השקול (גודל וכיוון) הפועל על המסגרת MNPQ.
- הסבר מדוע בחישוב הכוח המגנטי השקול בסעיף א אין צורך לחשב את הכוחות המגנטיים שהתיל מפעיל על הצלעות MQ ו-NP.
- הסבר מדוע בחישוב הכוח המגנטי השקול בסעיף א אין צורך להתחשב בכוחות המגנטיים שצלעות המסגרת מפעילות זו על זו.
- מצא את הגודל ואת הכיוון של הכוח המגנטי, שהמסגרת מפעילה על התיל.

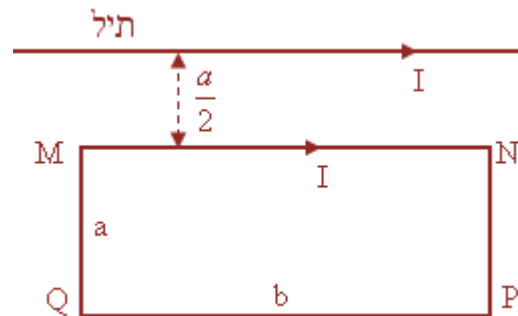
# פתרון תרגיל 11 : כוחות בין תילים

א. הכוח בין שני תילים נושאי זרם:  $F = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot L}{2\pi \cdot r}$

(בכיוון מעלה כלפי התיל)  $F_{MN} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 30 \cdot 0.18}{2\pi \cdot 0.01} = 3.24 \cdot 10^{-3} [N]$

(בכיוון מטה החוצה מהתיל)  $F_{PQ} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 30 \cdot 0.18}{2\pi \cdot 0.03} = 1.08 \cdot 10^{-3} [N]$

(בכיוון מעלה כלפי התיל)  $\sum F = F_{MN} - F_{PQ} = 3.24 \cdot 10^{-3} - 1.08 \cdot 10^{-3} = 2.16 \cdot 10^{-3} [N]$

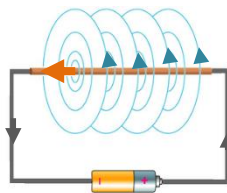


ב. בגלל המרחק השונה מהתיל נושא הזרם אל כל נקודה ונקודה לאורך התיל NP פועל כוח שונה בגודלו. כיוון הכוח הוא ימינה. לכל נקודה על התיל NP יש נקודה זהה במרחק, גם בתיל MQ, עליה פועל אותו כוח אבל בכיוון שמאלה, ולכן השקול שלהם הוא אפס.

ג. אין צורך להתחשב בכוחות המגנטיים שצלעות המסגרת מפעילות זו על זו כי הכוח השקול שלהם מתאפס היות והכוחות שווים זה לזה בגודל ושונים במגמה. (הכוחות בין התילים הם כוחות פנימיים).

ד. הכוח המגנטי שהמסגרת מפעילה על התיל הוא כגודל הכוח שהתיל מפעיל על המסגרת רק בכיוון מנוגד, על פי החוק השלישי של ניוטון.

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{r}$$

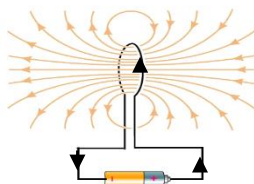


❖ גודלו של השדה המגנטי שיוצר תיל ארוך:

(הכיוון נקבע על פי כלל יד ימין)

❖ בסליל מעגלי דק הנושא זרם, שאורכו L בהרבה יותר קטן מרדיוסו R, עוצמת השדה במרכז הטבעת

$$B_I = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$$

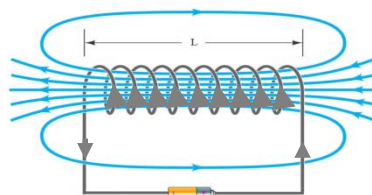


מכסימלית, וגודלה נתון על ידי:

(הכיוון נקבע על פי כלל יד ימין)

❖ עבור סילונית (שרדיוסה קטן ביחס לאורכה) השדה המגנטי בתוך הסליל ולא קרוב מידי לקטבים,

$$B_I = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot I$$

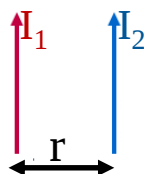


הינו שדה אחיד (בקירוב), שגודלו נתון על ידי:

(הכיוון נקבע על פי כלל יד ימין)

❖ הכוח ליחידת אורך הפועל בין שני תילים ארוכים, ישרים ומקבילים, שבהם זורמים הזרמים  $I_1$  ו-

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r}$$



שווה בגודלו ל:

$I_2$ .

◀ כאשר הזרמים בשני התילים הם בכיוונים זהים הם נמשכים זה אל זה.

◀ כאשר הזרמים בשני התילים הם בכיוונים מנוגדים הם דוחים זה את זה.