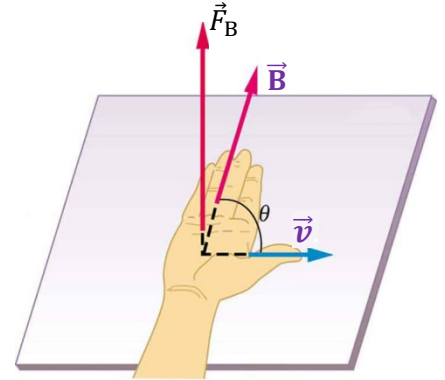


בשיעור הקודם דנו בשדה המגנטי. ראינו שהוא נוצר ממטען חשמלי בתנועה. בשיעור זה נדון בכוח הפועל על מטען חשמלי השרוי בשדה מגנטי. כזכור, מטען חשמלי חיובי/שלילי השרוי בשדה חשמלי חש כוח עם/נגד כיוון השדה, ללא קשר למצבו התנועתי. כשאותו מטען חשמלי שרוי בשדה מגנטי, הוא לא חש כוח כאשר הוא במנוחה או כאשר הוא נע עם/נגד כיוון השדה. מתי הוא חש כוח? כאשר הוא נע בכל כיוון אחר שאינו מקביל לקווי השדה המגנטי. אז הוא חש כוח הפועל עליו במאונך לכיוון תנועתו ולכיוון השדה המגנטי שבו הוא נע. את כיוון הכוח קל לקבוע לפי "כלל יד ימין לכיוון הכוח המגנטי":

פושטים את כף יד ימין כאשר האגודל בכיוון תנועת המטען ( $\vec{v}$ ) ושאר האצבעות בכיוון השדה המגנטי ( $\vec{B}$ ).

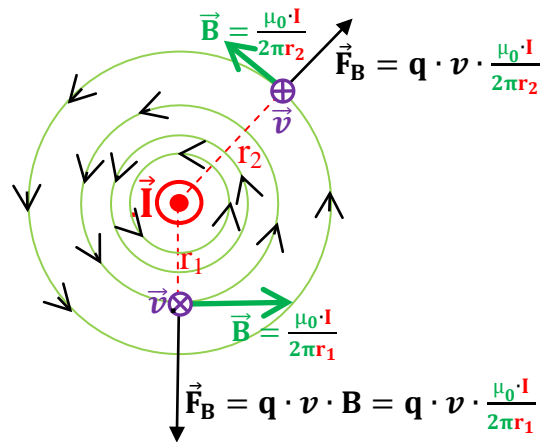
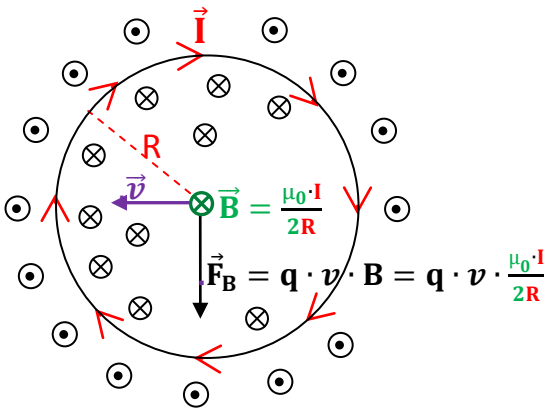
כיוון הכוח המגנטי ( $\vec{F}_B$ ) הוא "החוצה מכף היד" אם המטען חיובי, או "אל תוך כף היד" (החוצה מגב כף היד) אם המטען שלילי. את גודל הכוח מקבלים מהנוסחה:  $F_B = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta$ , כאשר  $\theta$  היא הזווית שבין כיוון תנועת המטען לכיוון השדה המגנטי. מנוסחה זו משתמע כי הכוח המגנטי הפועל על המטען הינו מרבי כאשר המטען נע במאונך לקווי השדה, ז"א כאשר  $\theta=90^\circ$ .

במצב זה נמקד את דיונינו הבאים, ולכן תיכתב בהם הנוסחה הנ"ל כך:  $F_B = q \cdot v \cdot B$



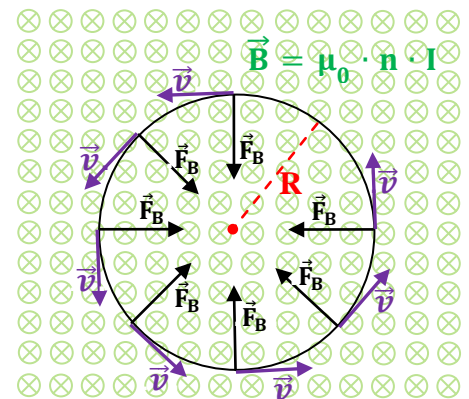
כלל יד ימין לכיוון הכוח המגנטי הפועל על מטען אשר נע בשדה מגנטי: כף היד פרושה כאשר האגודל בכיוון התנועה של המטען ( $\vec{v}$ ) ושאר האצבעות בכיוון השדה המגנטי ( $\vec{B}$ ). כלל זה יכולה לעיתים בקיצור **Open Right Hand (ORH)**. כיוון הכוח המגנטי ( $\vec{F}_B$ ) הוא "החוצה מכף היד" אם המטען חיובי, או "אל תוך כף היד" (החוצה מגב כף היד) אם המטען שלילי. גודלו של הכוח המגנטי ( $F_B$ ) מתקבל מהנוסחה:  $F_B = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta$ . כאשר  $\theta$  היא הזווית שבין כיוון תנועת המטען ( $\vec{v}$ ) לכיוון השדה המגנטי ( $\vec{B}$ ). ככל שהאגודל "מקביל יותר" לאצבעות האחרות, חלש יותר הכוח המגנטי. כאשר האגודל מאונך לאצבעות האחרות, הכוח המגנטי הינו מרבי.

בשני האיורים הבאים מתוארים השדה המגנטי סביב תיל נושא זרם (ימין) והשדה המגנטי במרכזת של טבעת נושאת זרם (שמאל). מתואר גם הכוח המגנטי  $\vec{F}_B$  הפועל על מטען חיובי  $+q$  אשר נע במהירות  $\vec{v}$  במאונך לשדה המגנטי. אם היה המטען שלילי, היה כיוון הכוח המגנטי הפוך.

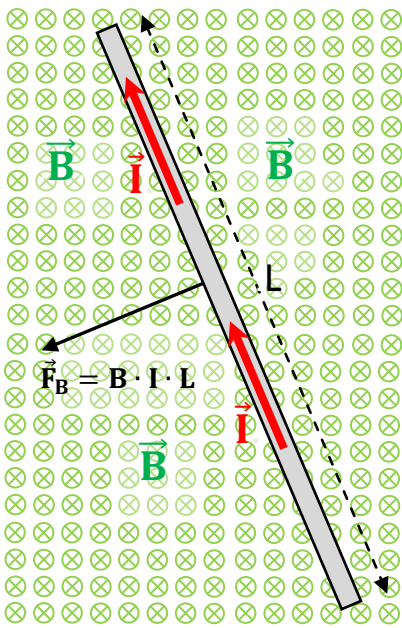


באיור הבא מתואר השדה המגנטי בחללה של סילונית ארוכה ומאונכת לדף - שדה מגנטי אחיד שכיוונו "לתוך הדף". מתואר גם הכוח המגנטי  $\vec{F}_B$  הפועל על מטען חיובי  $+q$  אשר נע במהירות  $\vec{v}$  בשדה המגנטי.

הכוח המגנטי ( $\vec{F}_B$ ) לעולם אינו משנה את גודל מהירותו של המטען, כי הוא פועל עליו במאונך לכיוון תנועתו. תנועת מטען בשדה מגנטי היא תמיד קשתית וקצובה! (תנועה קצובה בקו ישר אשר מתקבלת כאשר המטען נע במקביל לקווי השדה היא מקרה פרטי של תנועה קשתית קצובה - קשת שרדיוסה אינסופי). אם השדה המגנטי ( $\vec{B}$ ) אחיד, גודלו של הכוח המגנטי קבוע, והמטען נע בתנועה מעגלית קצובה (עוד מקרה פרטי של תנועה קשתית קצובה). אפשר להחיל אז את הכללים הרלוונטיים לתנועה מסוג זה:

$$\sum F_R = m \cdot a_R \Rightarrow q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad \text{או} \quad q \cdot v \cdot B = m \omega^2 \cdot R$$


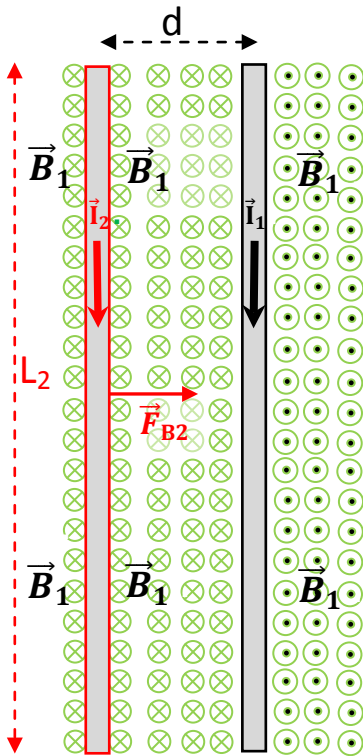
הכוח המגנטי על תיל נושא זרם השרוי בשדה מגנטי



זרם חשמלי (I) הוא תנועה סדורה של מטענים חשמליים (q), ולפיכך קל להבין מדוע פועל כוח מגנטי על תיל נושא זרם השרוי בשדה מגנטי (כל עוד התיל אינו מקביל לקווי השדה). הכוח הפועל על אלקטרון הנע לאורך התיל הוא  $F_B = q_e \cdot v_e \cdot B \cdot \sin\theta$  והוא פועל במאונך לכיוון התנועה (ז"א במאונך לזרם) ובמאונך לכיוון השדה המגנטי שבו חולף האלקטרון. אם התיל ישר ושרוי בשדה מגנטי אחיד, פועל כוח זה על כל האלקטרונים הנעים לאורכו, כך שהכפלת הכוח הפועל על אלקטרון אחד במספר האלקטרונים הנעים לאורך התיל ( $N_e$ ) תניב את הכוח הפועל על התיל כולו. אך כיצד נדע מהו  $N_e$  ומהי  $v_e$  (מהירות תנועתם של האלקטרונים לאורך התיל)? קל להראות ש-  $N_e \cdot q_e \cdot v_e = I \cdot L$  (L אורך התיל), ולפיכך הנוסחה לגודל הכוח המגנטי הפועל על תיל ישר נושא זרם השרוי בשדה מגנטי אחיד היא:  $F_B = I \cdot L \cdot B \cdot \sin\theta$ , כאשר  $\theta$  היא הזווית שבין כיוון הזרם לבין כיוון השדה המגנטי.

כיוון הכוח המגנטי מאונך לתיל ולשדה המגנטי שבו הוא שרוי וייקבע ע"פ כלל יד ימין לכיוון הכוח המגנטי שהוסבר קודם (ORH), כאשר האגודל מופנה בכיוון הזרם. גם כאן נתמקד במקרים שבהם  $\theta=90^\circ$ , ולכן תיכתב הנוסחה כך:  $F_B = B \cdot I \cdot L$ . שימו לב לכך שהתיל באיור נמצא על מישור הדף (למרות היותו נטוי) ואילו השדה המגנטי מאונך למישור זה, כך ש-  $\theta=90^\circ$ .

הכוח המגנטי בין תילים נושאי זרם ישרים ומקבילים



באיור מתואר השדה המגנטי  $\vec{B}_1$  אשר מיוצר ע"י הזרם כלפי מטה בתיל מס' 1 שהינו ארוך מאוד וישר. מעברו השמאלי של תיל מס' 1, היכן שממוקם תיל מס' 2 הנושא זרם  $\vec{I}_2$ , כיוונו של  $\vec{B}_1$  הוא "לתוך הדף" (ע"פ כלל יד ימין לכיוון השדה המגנטי סביב תיל נושא זרם - CRH) ועוצמתו היא  $B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot d}$  כאשר d הוא המרחק שבין שני התילים. לאור זאת גודלו של הכוח המגנטי הפועל על תיל מס' 2 הוא  $F_{B2} = B_1 \cdot I_2 \cdot L_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot d} \cdot I_2 \cdot L_2$  וכיוונו ימינה (ORH).

נוכל לחזור על התיאור שלעיל לגבי השדה  $\vec{B}_2$  אשר מיוצר ע"י הזרם כלפי מטה בתיל מס' 2, שכעת הוא ארוך מאוד וישר. מעברו הימני של תיל מס' 2, היכן שממוקם תיל מס' 1 הנושא זרם  $\vec{I}_1$ , כיוונו של  $\vec{B}_2$  הוא "החוצה מהדף" ועוצמתו היא  $B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot d}$ . גודלו של הכוח המגנטי הפועל על תיל מס' 1 יהיה לפיכך  $F_{B1} = B_2 \cdot I_1 \cdot L_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot d} \cdot I_1 \cdot L_1$  וכיוונו שמאלה (ORH).

שימו לב לכך שבשני המקרים קיבלנו כוחות שווים בגודלם והפוכים בכיוונם, כפי שמתבקש מהחוק השלישי של ניוטון "פעולה ותגובה". כמו כן, התיל ש"מייצר את השדה" חייב להיות ארוך מאוד וישר כדי שהשדה המגנטי שהוא מייצר יציית לנוסחה  $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}$ . התיל השני, זה ש"חש" את הכוח המגנטי, יכול להיות בכל אורך שהוא, אך כדי לשמר את הסימטריה נהוג להניח כי שני התילים הם אינסופיים. במצב זה אין עוד טעם לדבר על הכוח המגנטי שהם מפעילים זה על זה מפני שהוא אינסופי.

מדברים אז על "הכוח ליחידת אורך" שהם מפעילים זה על זה, ז"א "כמה ניוטון כוח פועלים על כל מטר אורך של תיל".

הנוסחה תהיה אז:  $\frac{F_B}{L} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot d}$ , ואם אחד התילים הוא בכל זאת סופי בעל אורך L, נוכל לכפול את שני האגפים ב-L ולקבל את הכוח המגנטי הכולל הפועל עליו (כתוצאה מפעולה ותגובה פועל גם על התיל השני, אפילו אם הוא אינסופי).

שימו לב גם לכך שתיל נושא זרם לעולם אינו חש כוח מגנטי כתוצאה מהשדה המגנטי שהוא עצמו מייצר, ממש כשם שמטען חשמלי הנע בשדה חשמלי/מגנטי לעולם אינו חש כוח חשמלי/מגנטי כתוצאה מהשדה החשמלי/מגנטי שהוא עצמו מייצר. הדבר נשמע אולי טריוויאלי, אך חשוב שיהא ברור.

טיפ חשוב לסיום: כאשר כיוון הזרמים בתיילים זהה (כפי שהיה לעיל) הם נמשכים זה לזה, וכאשר הזרמים הפוכים בכיוונם הם נדחים זה מזה. שיטה לזכירה: הפוך ממטענים חשמליים, הנמשכים זה לזה דווקא כשהם שונים ונדחים זה מזה כשהם זהים.