

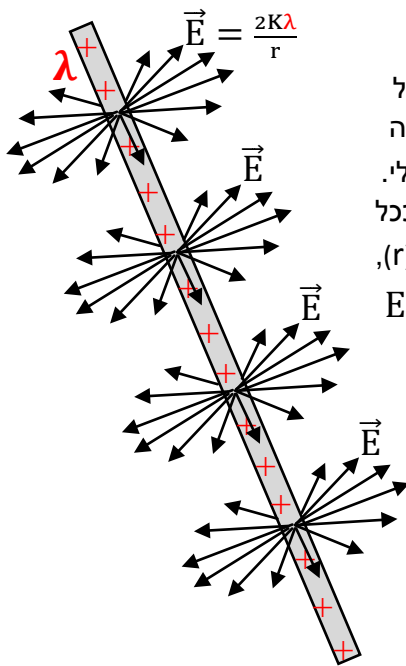
למדנו ששדה חשמלי נובע ממתען חשמלי.  
 (א) אם המתען נקודתי, הוא "יורה/שואב" קווים של שדה חשמלי בכל הכיוונים.  
 (ב) אם המתען אורכי אינסופי (ז"א בנוי ממתענים נקודתיים הסדורים לאורכו של תיל דק אינסופי) הוא "יורה/שואב" קווים של שדה חשמלי בכל הכיוונים המאונכים לתיל.  
 (ג) אם המתען משטחי (ז"א בנוי ממתענים נקודתיים הפזורים על פניו של משטח אינסופי) הוא "יורה/שואב" קווים של שדה חשמלי בשני הכיוונים המאונכים למשטח.  
 לא אמרנו מפורשות שבמקרים הנ"ל המתען החשמלי הינו סטאטי (נייח), אך הדבר השתמע במהלך הדיונים שערכנו.

וממה נוצר שדה מגנטי? **ממתען חשמלי בתנועה**, ז"א מזרם חשמלי ( $\vec{I}$ ). מבין שלושת המקרים שהוזכרו לעיל אנו נדון רק בשני, תחת התנאי שהמתען החשמלי נע לאורכו של התיל ולכן מייצר שדה מגנטי ( $\vec{B}$ ) במרחב שסביבו.

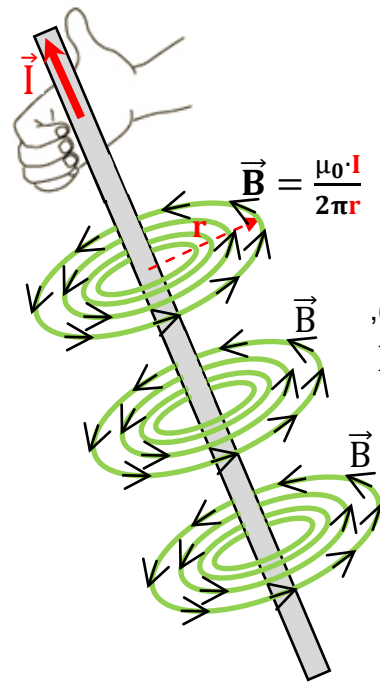
כמו השדה החשמלי, גם השדה המגנטי הוא ווקטור, ובמקרה דנן יהיה כיוונו משיקי לטבעות דמיוניות המקיפות את התיל **נושא הזרם** (איור א'). טוב ויפה, אבל ישנם שני כיוונים אפשריים למשיק, כיצד נדע לבחור בזה הנכון?

נפשוט את אגודל יד ימין בכיוון הזרם שבתיל, תוך ערסול שאר האצבעות סביב התיל. במצב זה האצבעות מורות על כיוונו הנכון של השדה המגנטי השורר מסביב לתיל. שימו לב לכך שאם יתהפך כיוון הזרם בתיל תתהפך גם כף היד ועימה כיוון החיצים השחורים, ז"א יתהפך כיוונו של השדה המגנטי. כמו כן שימו לב לכך שהטבעות צפופות בקרבת התיל ומתרווחות ככל שהמרחק מהתיל גדל.

**צפיפות הטבעות מייצגת את עוצמת השדה המגנטי** ממש כשם **צפיפות הקווים מייצגת את עוצמת השדה החשמלי** (הנובע מאותו המתען כשהוא סטאטי, איור ב'). **עוצמת השדה המגנטי (B) סביב תיל נושא זרם (I) היא  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$**  (המרחק מהתיל).



איור ב':  
 מתען סטאטי לאורכו של תיל אינסופי מחולל שדה חשמלי  $\vec{E}$  שכיוונו רדיאלי. קווי השדה מתרווחים ככל שגדל המרחק מהתיל ( $r$ ), ע"פ הנוסחה  $E = \frac{2K\lambda}{r}$

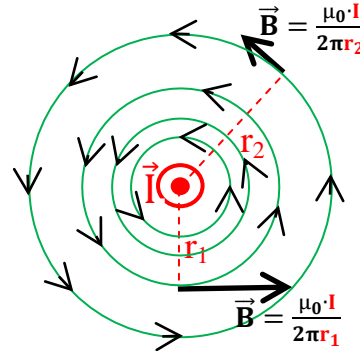
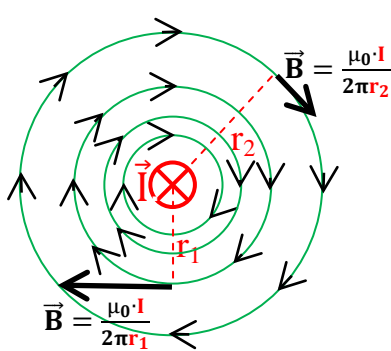


איור א':  
 מתען נע לאורכו של תיל אינסופי מחולל שדה מגנטי  $\vec{B}$  שכיוונו משיקי לטבעות דמיוניות. הטבעות מתרווחות ככל שגדל המרחק מהתיל ( $r$ ), ע"פ הנוסחה  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

- כלל הסופרפוזיציה (הרכבה) תקף לשדה המגנטי כשם שהוא תקף לשדה החשמלי, ז"א כאשר ישנם מספר מקורות (מספר תילים אינסופיים נושאי זרם למשל) המחוללים שדות מגנטיים, יתקבל בכל נקודה במרחב **שדה מגנטי שקול** שהינו **הסכום הווקטורי** של כל השדות המגנטיים בנקודה זו.
- השדה המגנטי והשדה החשמלי הם מהויות שונות. בנקודה כלשהי במרחב יכולים להיות נוכחים בו זמנית שדה מגנטי ושדה חשמלי, אך בשום אופן לא ניתן "לסכום" אותם.
- קווים של שדה מגנטי יוצרים תמיד מסלול סגור, בניגוד לקווים של שדה חשמלי.
- הסיבה לכך שאיננו דנים בשדה המגנטי שמחוללים **מתען נקודתי** בתנועה ו**מתען משטחי** בתנועה היא הסיבוכיות הגבוהה יחסית של ניתוח מקרים אלה. אנו נדון רק בשדה המגנטי שמחולל **מתען אורכי** בתנועה.
- $\mu_0$  "חלחלות" (Permeability) הינו קבוע המייצג את מידת היעילות של המרחב הריק (או המלא באוויר) ליצירת שדה מגנטי בתוכו. למרחב מלא בברזל חלחלות גבוהה פי 5000, ולכן מתקבל בו שדה חזק פי 5000 מזה שמתקבל בריק.
- כלל יד ימין שהוסבר לעיל מכונה לפעמים בפתרונות התרגילים **Closed Right Hand (CRH)** לשם הקיצור.

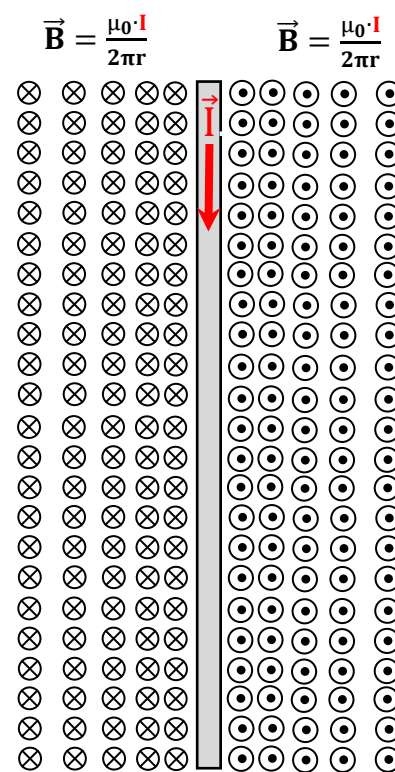
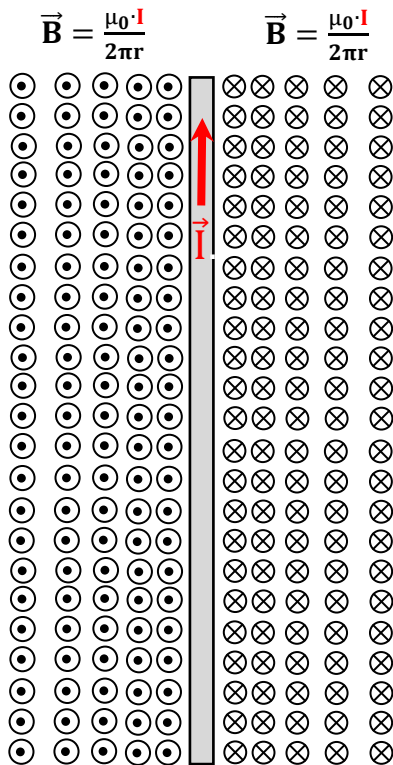
כאשר נתון סרטוט דו-מימדי בו התיל מאונך למישור הדף, מצוין כיוון הזרם בתיל באמצעות  $\otimes$  אם הוא "נכנס לדף" או באמצעות  $\odot$  אם הוא "יוצא מהדף". השדה המגנטי בכל נקודה במרחב מקביל למישור הדף ומסומן על הדף בחץ משיקי שכיוונו ככיוון השדה ואורכו מייצג את עוצמת השדה, כפי שמודגם באיור הבא:

הזרם (אדום) נכנס לדף ומחולל שדה מגנטי מקביל למישור הדף ועם כיוון השעון. ככל שגדל המרחק מהזרם (מהתיל) נחלש השדה המגנטי, ולכן מתקצרים חיצו הווקטור  $\vec{B}$ .

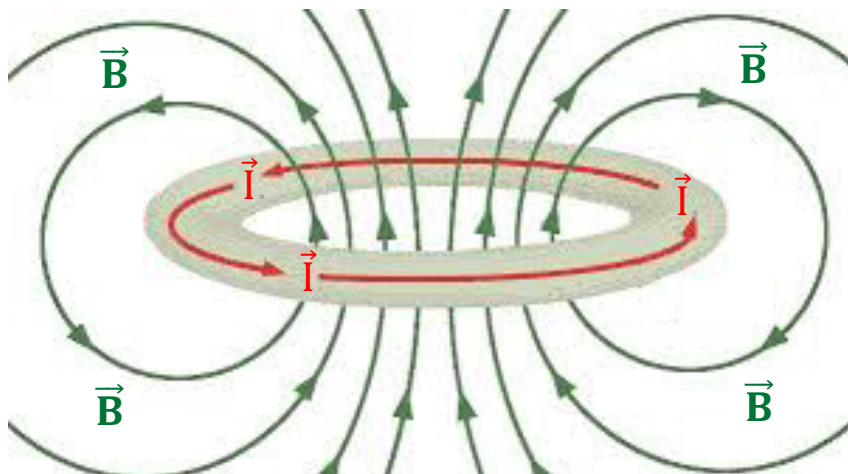


הזרם (אדום) יוצא מהדף ומחולל שדה מגנטי מקביל למישור הדף ונגד כיוון השעון. ככל שגדל המרחק מהזרם (מהתיל) נחלש השדה המגנטי, ולכן מתקצרים חיצו הווקטור  $\vec{B}$ .

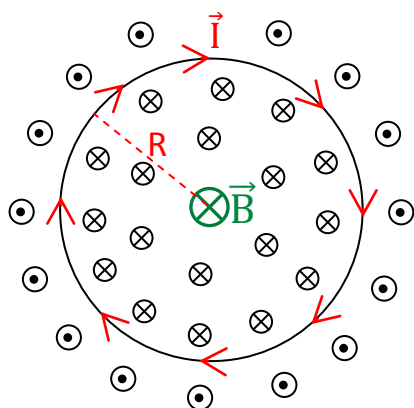
כאשר נתון סרטוט דו-מימדי בו התיל נמצא במישור הדף, מצוין כיוון הזרם שבתיל בחץ (אדום באיור) ואילו כיוון השדה המגנטי מצוין באמצעות  $\otimes$  אם הוא "נכנס לדף" או באמצעות  $\odot$  אם הוא "יוצא מהדף". צפיפות ה- $\otimes$  או ה- $\odot$  בכיוון המאונך לתיל מייצגת את עוצמת השדה, אם כי אין על כך הקפדה בד"כ. האיור הבא מדגים זאת:



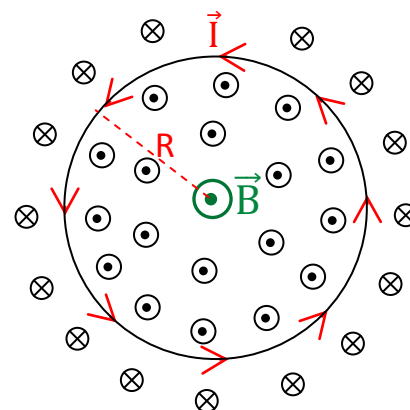
המקרה הבא בו נדון עוסק בטבעת נושאת זרם, כמתואר באיור הבא:



אפשר לראותה כתיל נושא זרם שכופף לצורת טבעת. הטבעות הדמיוניות עדיין מקיפות אותו כמקודם, אך כל "קבוצת טבעות" אינה מקבילה עוד לאחרות. השדה המגנטי בנקודה כלשהי במרחב הינו סכום ווקטורי של שתי הטבעות השונות העוברות בה. התוצאה המתקבלת מתוארת באיור שלעיל: טבעות אליפטיות ללא מרכז משותף החולפות דרך הטבעת נושאת הזרם. את כיוון ניתן לקבוע בעזרת "כלל יד ימין לקביעת כיוון השדה המגנטי סביב תיל נושא זרם" שהוסבר קודם. אנו נמקד את דיוננו בשדה המגנטי השורר **במישור הטבעת** נושאת הזרם, וליתר דיוק, **בשדה המגנטי השורר במרכזה**. מדוע? מכיוון שהשדה המגנטי השורר במישור הטבעת מאונך למישור זה כך שקל לקבוע את כיוונו, ובמרכז הטבעת קל גם לקבוע את עוצמתו על פי הנוסחה:  $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2R}$ , כאשר I הוא הזרם בטבעת ו-R הוא רדיוס הטבעת. בד"כ מונחת הטבעת נושאת הזרם על מישור הדף, ואז השדה המגנטי "יוצא מהדף" או "נכנס לדף" בהתאם לכיוון הזרם בטבעת:

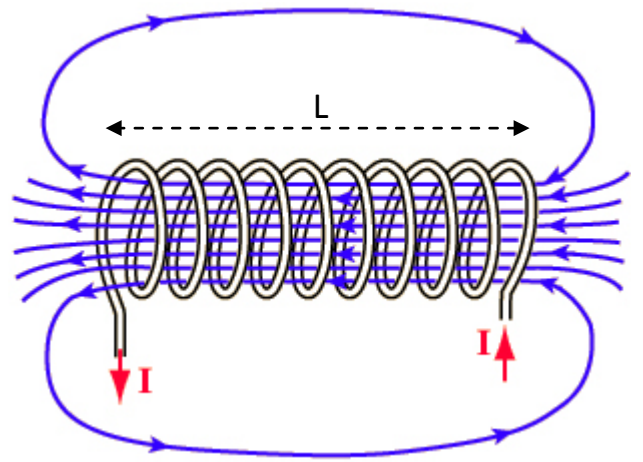


עוצמת השדה המגנטי במרכזה של טבעת שרדיוסה R והנושאת זרם I היא  $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2R}$  בעזרת כלל יד ימין ניתן לקבוע את כיוון השדה בכל נקודה על מישור הטבעת ובכלל זה במרכזה. חישוב עוצמת השדה בכל נקודה שאינה מרכז הטבעת מסובך ולכן לא נעסוק בו.

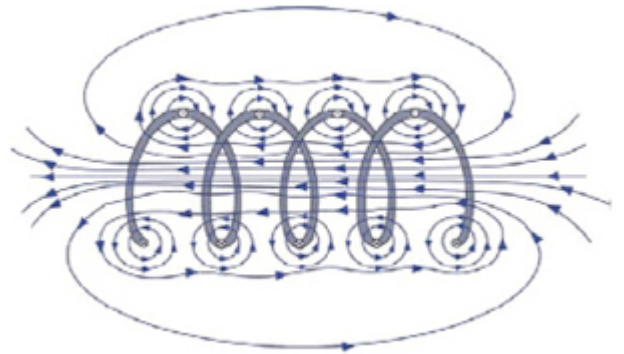


אם נצמיד זרם לזרם  $N$  טבעות כנ"ל אשר בכל אחת מהן זרם אותו הזרם I, נוכל לראותן כטבעת אחת (רחבה במקצת) הנושאת זרם חזק פי  $N$ , ולכן יהיה גם השדה המגנטי במרכזה חזק פי  $N$ :  $B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2R}$  מעשית יוצרים "רב טבעת" נושאת זרם אחד שכזו ע"י ליפופו בצפיפות של תיל נחושת דק סביב תבנית גלילית וחיבור קצותיו לסוללה. באופן זה מחוברות ה"טבעות" בטור זו לזו והזרם דרכן זהה בהכרח. מספר הכריכות בסליל שנוצר הוא  $N$ . כל עוד הסליל קצר יחסית לרדיוסו, ז"א כל עוד הוא "יותר טבעת מגליל", תקפה הנוסחה שלעיל בדיוק מניח את הדעת. כאשר הסליל אינו קצר בהרבה או ארוך בהרבה מרדיוסו, הופך חישוב עוצמת השדה במרכזו למסובך, אך הוא חוזר להיות פשוט כאשר הסליל ארוך בהרבה מרדיוסו, ז"א כאשר הסליל הוא "הרבה יותר גליל מטבעת". סליל כזה נקרא "סילונית ארוכה" והנוסחה לעוצמת השדה המגנטי בתוכו היא:  $B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{L}$  כאשר L הוא אורך הסילונית ו-N הוא מספר הכריכות בה. שימו לב לכך שקוטר הסליל ( $2R$ ) המופיע בנוסחה לטבעת הוחלף כאן באורך הסליל (L). כמו כן שימו לב לכך שהנוסחה תקפה לכל נקודה בחלל הסילונית ולא רק לציר האורך העובר במרכזה (ציר הסילונית). כיוון השדה המגנטי בכל נקודה בחלל הסילונית יהיה מקביל לציר האורך שלה, בהתאם לכיוון הזרם שבסליל.

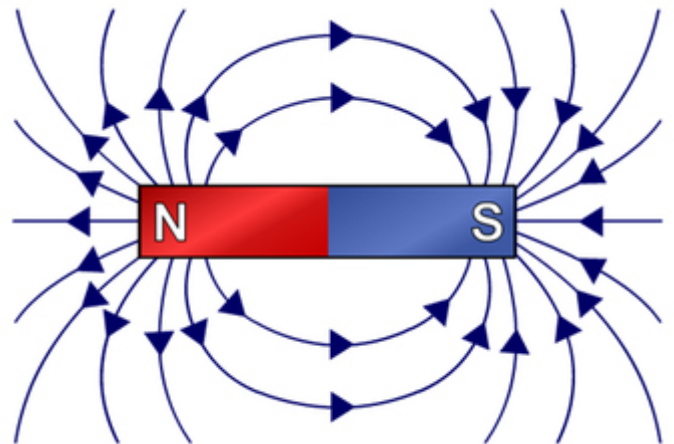
שדה מגנטי אחיד מופק בתוך סילונית ארוכה נושאת זרם. ככל שכריכות הסילונית צפופות יותר, מתקבל בתוכה שדה מגנטי אחיד יותר (באיור הכריכות מרווחות מתודית כדי לאפשר הסתכלות אל תוך הסילונית). עוצמת השדה האחיד נתונה בנוסחה  $B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{L}$  (N מספר הכריכות, L אורך הסילונית). מבטא את מספר הכריכות למטר אורך, ז"א את צפיפות הכריכות  $n$ , ולכן נכתבת הנוסחה הנ"ל גם כך:  $B = \mu_0 \cdot n \cdot I$



בסילונית זו הכריכות מרווחות, ולכן מתקבל בתוכה שדה מגנטי לא אחיד (למעט אולי בקרבת ציר הסילונית). מאיור זה קל יותר להבין את המכניזם אשר יוצר שדה מגנטי אחיד בסילונית צפופה כריכות: רכיבי השדה של הטבעות המגנטיות המקיפות את התיל בכריכות שכנות מבטלים זה את זה, למעט הרכיבים המקבילים לציר הסילונית אשר "משתפים פעולה" ומגבירים זה את זה. גם כאן ניתן לראות את המסלולים הסגורים תמיד של קווי השדה המגנטי.



השדה המגנטי של מגנט קבוע נוצר אף הוא מתנועה של מטען חשמלי - האלקטרונים הסובבים את האטומים. במגנט קבוע מסתכמים מיליוני השדות שמייצרים אלקטרונים אלה לכדי שדה מגנטי אחד חזק, בשל כיוונם הזהה. קווי השדה "יוצאים" מקצה אחד המכונה "הקוטב הצפוני של המגנט" ו"נכנסים" לקצה שני המכונה "הקוטב הדרומי של המגנט". במבני חומר אחרים שאינם מגנטיים קבועים מכוונים מיליוני השדות הנ"ל באופן אקראי ולכן מבטלים זה את זה.



כדור הארץ מוקף בשדה מגנטי הנובע כפי הנראה מזרמים חשמליים בליבתו המותכת והמסתחררת. באיור ניתן לראות כי הצפון הגיאוגרפי הוא דרום מגנטי ולהיפך. הקטבים המגנטיים של כדה"א קרובים לקטביו הגיאוגרפיים, אך אינם מתלכדים איתם. מחט המצפן היא מגנט קבוע, ולכן נמשך הצפון המגנטי שלה לדרום המגנטי של כדה"א, ז"א לצפון הגיאוגרפי שלו.

