

## פרק 1: חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי

שעות	הנושא
4	1.1 תופעות חשמליות
4	1.2 חוק קולון
6	1.3 השדה האלקטרוסטטי, המושג "שדה" בפיזיקה
1	1.4 חוק גאוס, הקשר בין חוק גאוס לחוק קולון
15	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הדגמה: כוחות דחייה ומשיכה בין לוחיות פלסטיק משופשות.</li> <li>- הדגמה: מוליכות חשמלית של חומרים, למשל: מעבר מטענים בין אלקטרוסקופים.</li> <li>- הדגמה: מבנה אלקטרוסקופ, השראה אלקטרוסטטית, טעינה באמצעות שפוף וטעינה באמצעות השראה.</li> <li>- הדגמה: הדלקת נורת ניאון בקרבת מחולל אלקטרוסטטי.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- שני סוגי מטען חשמלי והכוחות הפועלים ביניהם.</li> <li>- מוליכים ומבדדים - מבוא על המבנה החשמלי של חומרים.</li> <li>- השראה אלקטרוסטטית.</li> <li>- המושג "שיווי-משקל אלקטרוסטטי": הימצאות המטען העודף של המוליך על פני המוליך והצטופותו באזורי חודים.</li> <li>- תנועת מטענים במעבר בין מצבים של שיווי-משקל אלקטרוסטטי - "זרמים חשמליים חולפים".</li> <li>- שימור המטען החשמלי.</li> </ul>	1.1 תופעות חשמליות (הצגה איכותית בלבד)
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ניתוח סרט וידאו או הדמיה של חוק קולון.</li> <li>- הדגמה: טעינה ע"י הפרדה של מטענים.</li> </ul>	$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- "חוק קולון" - חוק הכוח בין מטענים חשמליים נקודתיים.</li> <li>- המושג "מטען חשמלי נקודתי".</li> <li>- קולון - יחידת המטען החשמלי.</li> <li>- קיום מטען יסודי (אלמנטרי).</li> <li>- השוואה בין כוחות חשמליים וכוחות כבידה.</li> <li>- "עקרון הסופרפוזיציה" של כוחות חשמליים.</li> </ul>	1.2 חוק קולון

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הדגמה של מיפוי של שדות חשמליים בעזרת כדור בוחן או הדמיה של מיפוי של שדות חשמליים.</li> <li>- הדגמה: קווי שדה ומיפוי של שדות חשמליים עם "מצפנים חשמליים".</li> </ul>	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ $\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- שדות בתחומים שונים של הפיזיקה.</li> <li>- השדה החשמלי (האלקטרוסטטי) הנוצר ע"י מטען נקודתי - הגדרה ויחידות.</li> <li>- עקרון הסופרפוזיציה והשימוש בו לחישוב שדות חשמליים.</li> <li>- תיאור שדות חשמליים בעזרת קווי שדה.</li> </ul>	1.3 השדה האלקטרוסטטי, המושג "שדה" בפיזיקה
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הדגמה: סיכון חשמלי ו"דלי פארדי".</li> </ul>	$\phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$ $\phi_E = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$ <p>(דרך משטח סגור)</p> $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- המושג "שטף חשמלי".</li> <li>- חוק גאוס והקשר עם חוק קולון.</li> <li>- חישוב של שדות חשמליים בעזרת חוק גאוס במקרים פשוטים: <ul style="list-style-type: none"> <li>• סביב מטען נקודתי.</li> <li>• בתוך ומחוץ לקליפה טעונה.</li> </ul> </li> <li>- השדה החשמלי האחיד בין לוחות קבל (ללא הוכחה).</li> </ul>	1.4 חוק גאוס, הקשר בין חוק גאוס לחוק קולון

# חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

## 1.1 תופעות חשמליות (4 שעות)

### מבוא

א. רצוי להתחיל את לימודי האלקטרוסטטיקה בהקדמה איכותית מקיפה העוסקת בנושא "תופעות חשמליות". ההקדמה תתבסס בעיקר על הדגמות וניסויים ועל מודלים פשוטים המסבירים אותם.

ב. בשלב זה עדיין אין להשתמש בנוסחאות. הבנת התופעות והסקת המסקנות תתבסס על התפיסה האינטואיטיבית, שלפיה הכוח החשמלי בין שני מטענים נקודתיים קטן כשהמרחק ביניהם גדל.

### שני סוגי מטען חשמלי והכוחות ביניהם

א. ניסויים (או הדגמות) של כוחות דחייה ומשיכה בין לוחיות משופשפות מצביעים על קיומם של שני סוגי מטען חשמלי.

ב. הכוח האלקטרוסטטי מקורו בתכונה הקרויה "מטען חשמלי". זאת, בדומה לכוח הכבידה המוכר מלימודי המכניקה, שמקורו בתכונה הקרויה "מסה כבידתית".

ג. השמות שניתנו לשני סוגי המטען החשמלי הם שרירותיים (כלומר, היה אפשר לתת להם גם שמות אחרים). בשלב מאוחר יותר של הלימוד, כדאי להצביע על הנוחות בקביעה שרירותית זו, המתבטאת בחוק שימור המטען החשמלי ובניטרליות של רוב החומרים.

ד. חשוב להציג את קיומו של כוח משיכה בין גוף ניטרלי לגוף טעון ולהסביר כוח זה באמצעות המבנה החלקיקי של החומר.

### מוליכים ומבודדים - מבוא על המבנה החשמלי של חומרים

א. רצוי להזכיר לתלמידים שבאטומים מצויים פרוטונים (בגרעין) ואלקטרונים הנעים סביבם. יש לציין שמטען האלקטרון שווה (בערכו המוחלט) למטען הפרוטון, ומכיוון שבאטום מצויים מספרים שווים של פרוטונים ואלקטרונים - האטום ניטרלי מבחינה חשמלית. מטענו של גוף טעון הוא כפולות שלמות של מטען האלקטרון ("המטען היסודי"). דיון מקיף ומעמיק יותר במבנה האטום והחומר יתקיים בעת לימוד הנושא "קרינה וחומר".

ב. נושא המוליכות החשמלית יידון בפרק זה באופן איכותי, רצוי בליווי הדגמות. המסרים המרכזיים יהיו אלה:

- במבדדים, כמעט כל האלקטרוניים קשורים היטב לאטומים ולמולקולות ואינם יכולים לנוע בחופשיות.
- במתכות, אלקטרון אחד או אלקטרוניים אחדים בכל אטום הם 'אלקטרוניים חופשיים'. אלקטרוניים אלה אינם קשורים עוד לאטום מסוים, אלא שייכים למתכת כולה. לפיכך ניתן להתייחס למתכות כאל חומרים המורכבים מיונים חיוביים, הקבועים פחות או יותר במקומם, ומאלקטרוניים הנעים בחופשיות בין היונים בכל חלקי המתכת.
- בתמיסות אלקטרוליטיות (מוליכות), נושאי המטען הם יונים.
- הערה: קיימים גם חומרים הנקראים מוליכים למחצה, והם בעלי תכונות ביניים - בין התכונות של מוליכים (מתכות) לתכונות של מבדדים. הולכה ובידוד אינן תכונות מנוגדות, אלא רמות שונות של אותה תכונה. בתכנית לימודי האלקטרומגנטיות, אין מעמיקים יותר בתכונותיהם ובשימושיהם של המוליכים למחצה באלקטרוניקה ובטכנולוגיה המודרנית.

### **השראה אלקטרוסטטית**

השראה אלקטרוסטטית היא הפרדת מטענים (קייטוב) הנוצרת בגוף כתוצאה מנוכחותו של גוף טעון בקרבתו. עקב כך פועלים כוחות משיכה בין הגוף הטעון לגוף הלא-טעון (בגלל תלות הכוח האלקטרוסטטי במרחק שבין המטענים). הודות לניידותם הרבה של האלקטרוניים החופשיים, תופעת ההשראה האלקטרוסטטית חזקה בהרבה במוליכים מתכתיים מאשר במבדדים. אחת השיטות לטעינת גופים מוליכים היא באמצעות השראה אלקטרוסטטית.

### **מוליך טעון בשיווי-משקל אלקטרוסטטי**

- א. המטענים העודפים במוליך טעון נמצאים על פני המוליך. מצב של שיווי-משקל אלקטרוסטטי, הוא מצב שבו אין תנועה של מטענים במוליך, כלומר שקול הכוחות החשמליים הפועלים על המטענים החופשיים מתאפס.
- ב. בשלב זה ראוי לציין כי אם במוליך קיים זרם חשמלי, לא קיים שיווי-משקל אלקטרוסטטי, דהיינו שקול הכוחות החשמליים הפועלים על נושאי המטען החופשי בתוכו אינו מתאפס.
- ג. כשנוצר קשר מוליך בין מערכת מוליכים טעונה לבין כדור הארץ ("האדמה"), יש תנועת מטענים ביניהם עד להתאפסות פוטנציאל המערכת - הארקה.
- ד. השלמת ההסבר האיכותי לתופעת ההארקה תובא בפרקים הבאים, כאשר יידונו המושגים "פוטנציאל", "קיבול" וכן השתוות הפוטנציאלים של מוליכים שמחוברים ביניהם בקשר מוליך. בשלב זה של הלימוד, ניתן להסתפק בהסבר חלקי: המטענים החופשיים 'שואפים' להתרחק זה מזה ככל האפשר בגלל כוחות הדחייה הפועלים ביניהם.

## קיום זרמים חולפים באלקטרוסטטיקה

באלקטרוסטטיקה אין עוסקים רק במערכות של מטענים הנמצאים במנוחה מתמדת. מעברים בין מצבים שונים של שיווי-משקל אלקטרוסטטי מלווים בתנועות של מטענים המהוות "זרמים חשמליים חולפים" (טרנזיאנטים). חשוב מאוד להתייחס לזרמים אלה, ובמידת האפשר אף להדגים. תהיה בכך תרומה משמעותית להקטנת הנתק בין הפרקים "אלקטרוסטטיקה" ו"זרם חשמלי".

### שימור המטען החשמלי

- א. יודגש כי בטבע קיים "חוק שימור המטען החשמלי". בתהליכים של טעינת גופים לא נוצרים מטענים יש מאין. בדרך כלל מדובר בהפרדת מטענים בלבד. התהליך של הפרדת מטענים כרוך בעבודה, לכן דרוש מקור אנרגיה כדי לבצעו. קיימים ניסויים פשוטים רבים המדגימים את חוק שימור המטען החשמלי. חשוב ביותר לבצעם, ובמידת האפשר לתת לתלמידים לבצעם.
- ב. למדידה ישירה של כמות מטען, מותר להשתמש במכשירים המאפשרים ביצוע מדידה כזו (קולונמטרים) גם בלי שמבינים את אופן פעולתם. בשלב זה, מכשירים אלה מהווים 'קופסאות שחורות'. מאוחר יותר, כשיכירו התלמידים את המושגים "מתח" ו"קיבול חשמלי", יוסברו להם העקרונות הפיזיקליים שעליהם מבוססת פעולתם של מכשירים אלה.

## 1.2 חוק קולון (4 שעות)

### מבוא

באלקטרוסטטיקה, כאשר עוברים מניסויים איכותיים לניסויים כמותיים, נוצרת בדרך כלל בעיה של דליפת מטענים מגופים טעונים בגלל לחות גבוהה באוויר. ניתן להקטין בעיה זו על-ידי ביצוע הדגמות (במקום ניסוי תלמידים) בחדר מעבדה ממוזג. הסיכוי להצלחת ההדגמות גדל אם הן נערכות בראשית השיעור (כלומר זמן קצר בלבד אחרי שהתלמידים נכנסו לחדר המעבדה). יש יתרון לביצוע או להדגמה טובה של ניסויים בסיסיים כמו "חוק קולון". אולם אם תנאי המעבדה אינם מאפשרים זאת, ניתן להדגים את הניסויים באמצעים אחרים, כגון הדמיות או סרטי וידאו.

## חוק קולון, המושג "מטען נקודתי", יחידת המטען החשמלי, קיום מטען יסודי (אלמנטרי)

- א. יודגש כי חוק קולון הוא 'חוק הכוח' הפועל בין מטענים נקודתיים, בדומה לחוק הכבידה של ניוטון שהוא 'חוק הכוח' הפועל בין מסות נקודתיות. חשוב לציין כי בשני החוקים, הכוח משתנה ביחס הפוך לריבוע המרחק.
- ב. המטענים ה'נקודתיים', או המסות ה'נקודתיות', אינם בהכרח זעירים ביותר. מושג הנקודתיות הוא אידאליזציה, והכוונה היא לגופים או לחלקיקים שממדיהם קטנים מאוד ביחס למרחק המפריד ביניהם. אם מטענים אינם נקודתיים, אך התפלגותם במרחב אחידה וכדורית, אפשר להתייחס אליהם כאל מטענים נקודתיים המצויים במרכזי הכדורים.
- ג. בניסוי "חוק קולון", יש להסביר שניתן לקבוע את גודל הכוח כתלות בכמויות המטען ( $q_1$  ו- $q_2$ ) גם אם לא מכירים עדיין שיטה למדידה ישירה של כמויות מטען. עושים זאת בעזרת רעיון החלוקה השווה של מטענים - מטעמי סימטריה - בין כדורים מוליכים בעלי רדיוסים שווים. יחידת כמות המטען - הקולון - תוגדר באמצעות חוק קולון (הכוח הפועל בין שני מטענים שגודלם קולון אחד והנמצאים במרחק מטר אחד הוא  $1/4\pi\epsilon_0$ ). מאוחר יותר, לאחר שהתלמידים יכירו את הגדרת האמפר, ניתן להגדיר את יחידת המטען באמצעות האמפר.
- ד. מכיוון שהקולון הוא יחידה 'ענקית', יש לאזכר את היחידות הנגזרות מיקרוקולון ( $10^{-6} = \mu C$ ) וננוקולון ( $10^{-9} = nC$ ) ולהשתמש בהן.
- ה. קיומו של מטען חשמלי יסודי יצוין בשלב זה **כעובדה**, וכן יצוין שכל מטען חשמלי הוא כפולה שלמה של המטען היסודי.

### השוואה בין כוחות חשמליים וכוחות כבידה

חשוב לציין את הדמיון והשוני בין חוק קולון לחוק הכבידה ולהדגיש את ההבדל העצום בעצמה שבין הכוחות החשמליים לכוחות הכבידה. כמו כן, כוחות הכבידה הם כוחות משיכה בלבד, בעוד שהכוחות החשמליים הם כוחות משיכה ודחייה.

### עקרון הסופרפוזיציה של כוחות חשמליים

על סמך ניסויים למדים כי עקרון הסופרפוזיציה קיים לגבי כוחות חשמליים, כשם שהוא קיים לגבי כוחות אחרים. משמעותו: הכוח בין שני מטענים נקודתיים אינו מושפע מנוכחותו של מטען נוסף.

### 1.3 השדה האלקטרוסטטי, המושג "שדה" בפיזיקה (6 שעות)

#### מבוא

- א. המושג "שדה", שהוא רב-חשיבות בפיזיקה, הוא מושג מופשט, ורוב התלמידים מתקשים להבינו. עם זאת, קרוב לוודאי שהתלמידים כבר עסקו בו במסגרת לימודי המכניקה בפרק "כבידה" ועל המורה לנצל זאת לעריכת אנלוגיה בין השדה האלקטרוסטטי לשדה הגרביטציוני.
- ב. ללימוד מעמיק יחסית של הנושא "שדה" בפיזיקה, דרוש ידע מסוים בחשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי. ההנחה היא שבשלב שבו עוסקים בנושא זה, אין לתלמידים הידע הנדרש. לפיכך אין צורך לדון בשלב זה במושג "הקפה של שדה" או חישוב שטף באמצעות אינטגרציה. לפיתוח נוסחאות, ניתן להיעזר בהדמיות או בפעילויות בגיליון אלקטרוני. על פי רמת התלמידים והיקף הזמן העומד לרשותו, יחליט המורה אם להשתמש במתמטיקה מסובכת, ובאיזו מידה.

#### המושג "שדה" בפיזיקה

- א. כדי להקל על התלמידים את הבנת המושג "שדה" בפיזיקה, רצוי להזכיר את קיומם של שדות בתחומים שונים של הפיזיקה. דוגמאות לכך הן שדה הכבידה, שדה הקרינה של מקור אור נקודתי או זרימה של נוזל שניתן לתארה על-ידי שדה וקטורי - שדה המהירויות של הנוזל.
- ב. כדאי לציין שמושגים שונים המשמשים לתיאור שדות וקטוריים, לקוחים מתיאור זרימה של נוזלים (המושג "שטף", למשל).

#### השדה החשמלי (האלקטרוסטטי) - הגדרה ויחידות

- א. במבוא כדאי לציין שבנושא הפעולה ההדדית של מטענים חשמליים הנמצאים במנוחה, תיאורי פעולת הכוחות ממרחק ופעולה באמצעות שדה חשמלי 'מתווך' הם אקוויוולנטיים.
- ב. שדות חשמליים הנקראים "אלקטרוסטטיים", הם שדות הנוצרים על-ידי מטענים הנמצאים במנוחה.
- ג. כאשר מצבם ההדדי של מטענים משתנה עם הזמן, דרוש זמן כדי להעביר 'הודעה' על השינוי. תופעה זו מעניקה לשדה משמעות פיזיקלית: השדה נושא תנע ואנרגיה.
- ד. להגדרת השדה החשמלי, חשוב שמטען חשמלי הבא לבדוק ולמדוד את השדה יהיה קטן במידה כזו שהכנסתו לתוך השדה לא תשפיע על השדה ולא תשנה אותו במידה משמעותית. (מטען כזה נקרא "מטען בוחן").
- ה. השדה החשמלי הוא **שדה וקטורי**, זאת אומרת שבכל נקודה במרחב יש לשדה החשמלי גודל (הנקרא "צממת השדה") וכיוון. מאחר שתלמידים נוטים להתבלבל בין כיוון הכוח לכיוון השדה,



רצוי להביא מגוון דוגמאות שבהן מציגים כיווני שדה או כוח הפועלים על מטענים בעלי סימנים שונים, ויש למצוא את הגודל החסר.

### עקרון הסופרפוזיציה והשימוש בו לחישוב שדות חשמליים

- א. עקרון הסופרפוזיציה של שדות חשמליים נובע מהעיקרון המוכר בדבר סופרפוזיציה של כוחות. רצוי להדגים על-ידי ניסויים מתאימים בעזרת כדור הבוחן, המשמש מד-E.
- ב. על-ידי שימוש בכל הידוע על שדה חשמלי של מטען נקודתי ובעקרון הסופרפוזיציה, אפשר לחשב שדות חשמליים הנוצרים על-ידי מספר מטענים נקודתיים הקבועים במקומם.
- ג. כבר בשלב זה כדאי לציין כעובדה, שפרט לשדות החשמליים הקבועים בזמן, הנוצרים על-ידי מטענים חשמליים הנמצאים במנוחה (שדות "אלקטרוסטטיים"), קיימים גם שדות חשמליים הנוצרים בתהליך אחר (שדה מגנטי המשתנה עם הזמן). בשדות מסוג זה נעסוק בשלב מאוחר יותר של הלימוד.

### תיאור שדות חשמליים בעזרת קווי שדה

יש לציין בפני התלמידים שקיימות אפשרויות שונות לייצוג ולתיאור של שדות וקטוריים, בכלל, ושל השדה החשמלי, בפרט. קיים מגוון של תוכנות מחשב והדמיות שבאמצעותן ניתן להדגים ייצוגים שונים של השדה החשמלי.

(1) **תרשים חצים**: לכל נקודה במרחב שיש בה שדה חשמלי, אפשר להתאים חץ שגודלו פרופורציוני לעצמת השדה וכיוונו ככיוון השדה בנקודה. אלא שהמרחב מלא נקודות, והתאמת חץ לכל נקודה היא אפוא משימה בלתי אפשרית; מסתפקים בציור של חצים אחדים בלבד, המייצגים את כל השאר. כל חץ יציור לפי קנה מידה אחיד, מתכונתי לעצמת השדה בנקודת מוצאו.

(2) **תרשים קווי שדה**: קווי שדה הם קווים דמיוניים, שכיוונם בכל נקודה (כלומר כיוון המשיק להם באותה נקודה) הוא ככיוון השדה החשמלי בנקודה. קווי השדה הם קווים רציפים וחלקים, היוצאים ממטענים חיוביים והמסתתימים במטענים שליליים או באין-סוף. קווי השדה אמנם מתארים את כיוונו של השדה, אך לא את עצמתו. ניתן להעריך את עצמת השדה לפי צפיפות קווי השדה.

עם זאת, חייבים כמובן להביא בחשבון מגבלה רצינית של שני התיאורים החזותיים הללו: הם דו-ממדיים, בעוד שהמרחב הוא תלת-ממדי. יש להדגיש שקווי השדה הם 'יצירת אדם', לנוחות הייצוג; אין ישות פיזיקלית כזאת במציאות.

## 1.4 חוק גאוס, הקשר בין חוק גאוס לחוק קולון (1 שעה)

### המושג "שטף חשמלי", חוק גאוס

- א. ניתן להיעזר בהדמיה ולהראות כי מספר קווי השדה החוצים משטח סגור הוא פרופורציוני לכמות המטען שבתוך המשטח. את המושג "מספר קווי השדה החוצים" יש לקשור למושג "השטף החשמלי" ולהשתמש במושגים אלו ל'הוכחה' איכותית של חוק גאוס. הוכחה מפורטת יותר ניתן ללמד במסגרת הרחבה והעמקה. לחלופין, ניתן לנצל הדגמה של דלי פארדיי כדי לאשר את העובדה שהשדה החשמלי בתוך מוליך במצב סטטי, מתאפס, והמטען העודף מצטבר על פניו כפי שנובע מחוק גאוס.
- ב. רצוי להצביע על כך שהמושג "שטף חשמלי" שאול מתורת הנוזלים, אף שבאלקטרוסטטיקה אין מייחסים לווקטור  $E$  משמעות של 'משהו זורם'.
- ג. חשוב מאוד להדגיש שההוכחה של חוק גאוס מבוססת על כך שהשדה של מטען נקודתי נמצא ביחס הפוך ל-  $r^2$  (כלומר, היא מבוססת על חוק קולון). לפיכך, חוק גאוס וחוק קולון אקוויולנטיים במובנים מסוימים.
- ד. כדאי להצביע על כך שבגלל התלות ב-  $r^2$ , חוק גאוס תקף גם לגבי כוחות הכבידה.

### חישוב של שדות חשמליים בעזרת חוק גאוס

- א. בכיתות טובות, מומלץ להראות כמה דוגמאות פשוטות של חישובי שדות חשמליים בעזרת חוק גאוס, כגון: השדה החשמלי סביב מטען נקודתי והשדה בתוך ומחוץ לקליפה כדורית טעונה. דוגמאות אלו עשויות לעזור לתלמידים להבין את הנושא, אך עם זאת לא מומלץ לגלוש לחישובים מסובכים.
- ב. מומלץ להסביר כי העובדה שהמטען החשמלי העודף במוליך טעון נמצא על פני המוליך, נובעת מהיותו בשיווי-משקל אלקטרוסטטי ומחוק גאוס (השדה החשמלי בתוך המוליך מתאפס).  
אין חובה להראות שהשדה החשמלי המאונך לפני המוליך שווה ל-  $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$ , כאשר  $\sigma$  היא צפיפות השטח של המטען על פני המוליך (באזור קטן סביב הנקודה שבה נמדד השדה), אף על פי שעובדה זו מסייעת להבהרת המושג "אפקט החודים".

## פרק 2: פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים

שעות	הנושא
8	2.1 פוטנציאל והפרש פוטנציאלים
6	2.2 קיבול וקבלים
14	<b>סה"כ שעות</b>

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ניסוי או הדמיה : מדידת הפרש פוטנציאלים בקרבת כדור מוליך טעון.</li> <li>- ניסוי : מיפוי שדה חשמלי בעזרת משטחים שווי-פוטנציאל באמבט אלקטרוליטי או בנייר מוליך.</li> <li>- הדמיות מחשב להמחשת שדות ופוטנציאלים שונים.</li> <li>- ניסוי : הטיה חשמלית של אלומת אלקטרונים בשפופרת טלטרון.</li> <li>- הדגמה : האוסילוסקופ כמד-מתח.</li> </ul>	$V_{A,B} = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$ $V = \frac{W}{q}$ $V = \sum \left( \frac{kq}{r} \right)$ $E = -\frac{\Delta V}{\Delta r}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- המושגים "כוח משמר", "שדה משמר".</li> <li>- השדה האלקטרוסטטי כשדה משמר.</li> <li>- "אנרגיה פוטנציאלית" ו"הפרש פוטנציאלים" בשדה האלקטרוסטטי.</li> <li>- "וולט" - יחידת הפוטנציאל.</li> <li>- הפוטנציאל של מטען נקודתי ושל מערך מטענים נקודתיים.</li> <li>- חישוב הפרש פוטנציאלים.</li> <li>- פוטנציאל של כדור מוליך טעון.</li> <li>- "הארקה".</li> <li>- חיבור שני מוליכים טעונים.</li> <li>- משטחים שווי-פוטנציאל וקווי שדה.</li> <li>- הקשר בין הפרש פוטנציאלים ושדה חשמלי.</li> <li>- האצה של מטענים על-ידי שדות חשמליים.</li> <li>- הטיה של אלומת אלקטרונים בשדה חשמלי אחיד.</li> <li>- יישומים : "תותח אלקטרונים", אוסילוסקופ.</li> <li>- היחידה "אלקטרון-וולט" (eV).</li> </ul>	2.1 פוטנציאל והפרש פוטנציאלים
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ניסוי : מדידות קיבול של קבלים.</li> <li>- ניסוי או הדמיה : תלות הקיבול של קבל-לוחות בפרמטרים.</li> </ul>	$C = \frac{q}{V}$ $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$ $U = \frac{1}{2} qV$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- המושג "קיבול חשמלי".</li> <li>- "פרד" - יחידת הקיבול החשמלי.</li> <li>- המושג "קבל".</li> <li>- הקיבול של קבל-לוחות - תלות הקיבול בפרמטרים.</li> <li>- הקבוע הדיאלקטרי, הסבר איכותי לתכונות של דיאלקטרון.</li> <li>- חיבור קבלים במקביל ובטור.</li> <li>- האנרגיה של מוליך טעון.</li> <li>- דיון וטיפול איכותי בטעינה ופריקה של קבל.</li> <li>- שימושים של קבלים.</li> </ul>	2.2 קיבול וקבלים

# פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

## מבוא

המושגים "כוח משמר", "אנרגיה פוטנציאלית" ו"משפט עבודה-אנרגיה" ידועים לתלמידים מלימודי המכניקה. ניתן היה להניח שהדיון בכוח משמר נוסף (הכוח האלקטרוסטטי) יוכל לשמש חזרה פורייה, עם הרחבה והעמקה, על נושא מוכר. למעשה, מחקרים בהוראת הפיזיקה מראים שאנרגיה פוטנציאלית חשמלית, הקשר שלה לנקודת ייחוס והפרש פוטנציאלים – כל אלה הם מושגים מופשטים וקשים להבנה.

אנו ממליצים בפרק זה להרבות ולגוון באמצעים דידקטיים כדי לקרב את המושגים הקשים לעולמם של התלמידים.

## 2.1 פוטנציאל והפרש פוטנציאלים (8 שעות)

א. התלמידים מתקשים בהבנתו וביישומו של המעבר מכוח משמר ואנרגיה פוטנציאלית לשדה משמר ופוטנציאל.

ב. חייבים להדגיש שכשם שאין משמעות לאנרגיה פוטנציאלית בנקודה בשדה האלקטרוסטטי ללא הגדרת רמת ייחוס, גם אין משמעות לפוטנציאל חשמלי בנקודה בשדה האלקטרוסטטי ללא רמת ייחוס. בדרך כלל, נוח ומקובל לקבוע את ה"אין-סוף" כרמת הייחוס שבה הפוטנציאל החשמלי מתאפס. חשוב ביותר שתלמידים יבינו כי שינוי במקומה של רמת הייחוס, משנה את ערכו של הפוטנציאל החשמלי בכל נקודה בשדה אלקטרוסטטי, אך לא את ערכו של הפרש הפוטנציאלים בין כל שתי נקודות בשדה.

ג. הפרש הפוטנציאלים  $V_{A,B} = V_B - V_A$  בין שתי נקודות A ו-B בשדה אלקטרוסטטי מוגדר כמינוס העבודה ליחידת מטען שעובד השדה האלקטרוסטטי בהעבירו מטען חיובי מהנקודה A

$$\cdot V_{A,B} = V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

מקובל להשתמש גם בהגדרה האקוויולנטית: הפרש הפוטנציאלים  $V_B - V_A$  בין שתי נקודות A ו-B בשדה אלקטרוסטטי הוא העבודה ליחידת מטען שכוח חיצוני עובד נגד השדה, כאשר הוא מעביר מטען חיובי מנקודה A לנקודה B ללא שינוי בגודל המהירות.

ד. חשוב לציין שהמטען המועבר מ-A ל-B צריך להיות קטן עד כדי כך שלא ישנה את השדה האלקטרוסטטי שבו הוא נע.

ה. כדאי להדגיש שהפוטנציאל החשמלי הוא גודל סקלרי, בניגוד לשדה החשמלי שהוא גודל וקטורי. הפוטנציאל בנקודה A הנמצאת במרחקים  $r_1, r_2, \dots, r_n$  מ- n מטענים נקודתיים  $q_1, q_2, \dots, q_n$ ,

$$V_A = k \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

הוא הסכום האלגברי של הפוטנציאלים הנוצרים על-ידי כל מטען בנפרד:

ו. מומלץ לתרגל עם התלמידים מצבים שבהם נחוץ לחשב גם פוטנציאל וגם שדה באותה נקודה, למשל - חישוב השדה והפוטנציאל במרכז ריבוע שבקדקודיו מטענים זהים. כדאי להביא דוגמאות למצבים שבהם השדה מתאפס והפוטנציאל לא מתאפס, ולהפך.

ז. המסרים המרכזיים בנושא משטחים שווי-פוטנציאל ובנושא הקשר שבין הפרש הפוטנציאלים והשדה החשמלי הם אלה:

1. משטחים שווי-פוטנציאל הם משטחים שבהם הפוטנציאל שווה בכל הנקודות:  $V = \text{Const}$ .

בהקשר למשטחים שווי-פוטנציאל, כדאי להזכיר קווי גובה במפה טופוגרפית.

2. בהעברת מטען על פני משטח שווה-פוטנציאל מנקודה אחת לשנייה, לא נעשית עבודה.

3. מוליך טעון בשיווי-משקל אלקטרוסטטי הוא גוף שווה-פוטנציאל.

4. קווי השדה מאונכים למשטחים שווי-פוטנציאל.

5. חשוב מאוד לדון בקשר שבין הפרש הפוטנציאל ושדה חשמלי. כדאי להצביע על כך שבשדה

$$\Delta V = -E \Delta x$$

חשמלי אחיד מתקיים:

ח. במסגרת הפוטנציאל של מוליך טעון, אין צורך לדון אלא במקרה של כדור מוליך או של קליפה כדורית.

ט. כאן המקום להסביר באופן איכותי כי "הארקה" היא פריקת מטענו החשמלי של גוף טעון על-ידי חיבורו לכדור הארץ, עד שהגוף מפסיק להיות טעון חשמלית.

י. דיון במעבר מטען חשמלי בין שני גופים מוליכים בעלי קיבול או פוטנציאל שונה, יסייע לתלמידים להבנת הקשר שבין הפרשי פוטנציאלים והזרם החשמלי.

יא. כשדנים בהאצת חלקיקים טעונים בשדות חשמליים, יש להזכיר את המאיץ האלקטרוסטטי "ואן דה גראף".

יב. האוסילוסקופ הוא אחד היישומים החשובים ביותר של האצת אלקטרונים על-ידי "תותח אלקטרונים" והטייתם על-ידי שדות חשמליים אחידים בין לוחות קבל. פרט לכך שהאוסילוסקופ משמש מכשיר הדגמה מעולה בידי המורה, רצוי שמכשיר זה יופעל גם על-ידי התלמידים, שייוכחו לדעת שזהו מד-מתח רגיש ורב-שימושי.

יג. כבר בשלב זה של הלימוד, רצוי להצביע על מרכזיותה של יחידת האנרגיה אלקטרון-וולט בפיזיקה אטומית וגרעינית. חשוב שתלמידים ידעו שאנרגיות הקשר של אלקטרונים לאטומים הם בסדר גודל של אלקטרון-וולטים אחדים. כדאי לציין שאנרגיות הקשר של החלקיקים בגרעיני האטומים (פרוטונים וניוטרונים) הם בסדר גודל של MeV.

## 2.2 קיבול וקבלים (6 שעות)

- א. אף שדיון ראשון בקיבול חשמלי ובקבלים מתקיים כאן בפרקי האלקטרוסטטיקה, חשיבותם העיקרית של אלה מתגלה דווקא בפרקים מאוחרים יותר העוסקים בזרם חשמלי - זרם ישר וזרם חלופין.
- ב. יש לפתח את הנוסחאות לקיבול של קבל-לוחות בלבד.
- ג. אין צורך בהתייחסות לקבל הבנוי משתי קליפות כדוריות מוליכות.
- ד. יש להדגיש שהקיבול של קבל אינו תלוי במטען שלו ובמתח בין מרכיביו. הוא תלוי אך ורק בגאומטריה של רכיבי הקבל ובחומר המפריד בין המוליכים הטעונים, הנקרא דיאלקטרן או חומר דיאלקטרי.
- ה. בנושא קבל-לוחות, יש ללוות את הדיון התאורטי בניסויים מתאימים המדגימים את תלות הקיבול בפרמטרים השונים.
- ו. בנושא חומרים דיאלקטריים יש להסתפק בהסברים איכותיים, המסתמכים על היבטים מיקרוסקופיים של מבנה החומר. ניסוי עם קבל-לוחות יעזור לתלמידים בהבנת המושג "קבוע דיאלקטרי יחסי" וכמו כן בהבנת תפקידו של הדיאלקטרן.
- ז. להפרדת מטענים בין שני מוליכים המהווים קבל, דרושה עבודה (נגד כוח המשיכה הפועל בין המטענים המופרדים), ולכן נאגרת בקבל אנרגיה חשמלית (אלקטרוסטטית).
- ח. תלמידים נוטים לראות את מטענו של הקבל כשווה לאפס. יש להדגיש כי מדובר בערך המוחלט של המטען באחד הלוחות.
- ט. בנושא האנרגיה האגורה בקבל טעון, יש לפתח את הנוסחה וגם רצוי לבצע ניסוי מתאים.
- י. על חיבור קבלים בטור ובמקביל יש להתעכב בקצרה בלבד. התלמידים אינם מתבקשים לנתח מעגלים המכילים יותר משני קבלים בחיבור טורי או מקבילי.
- יא. בפרק זה יש לדון בתהליכי הטעינה והפריקה של קבל באופן איכותי בלבד. התיאור המתמטי והחישובים הכמותיים יידונו אחרי היכרות כמותית עם המושג "זרם חשמלי".

### פרק 3: מעגלי זרם ישר

שעות	הנושא
2	3.1 הזרם החשמלי ועצמת הזרם החשמלי
2	3.2 המתח החשמלי, חוק אום
2	3.3 התנגדות
3	3.4 כא"מ ומתח הדקים
4	3.5 טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל
3	3.6 הספק ואנרגיה במעגל חשמלי, נצילות
8	3.7 מעגלים חשמליים
1	3.8 מכשירי מדידה
25	סה"כ שעות



שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2		$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ $I = nqAv *$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הגדרת הזרם החשמלי ועצמתו.</li> <li>- תופעות לוואי של הזרם החשמלי.</li> <li>- הזרם הרגעי כשיפוע גרף מטען-זמן.</li> <li>- המטען כשטח שמתחת לגרף זרם-זמן.</li> <li>- יחידת עצמת הזרם והקשר בין עצמת הזרם החשמלי למהירות הסחיפה של האלקטרונים.</li> </ul>	3.1 הזרם החשמלי ועצמת הזרם החשמלי
2	- ניסוי: אופייני נגד ונורת להט.	$V = RI$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הגדרת המתח החשמלי.</li> <li>- חוק אום.</li> </ul>	3.2 המתח החשמלי וחוק אום
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ניסוי או הדמיה: תלות ההתנגדות בפרמטרים.</li> <li>- ניסויים בעזרת נייר מוליך.</li> <li>- ניסוי: גילוי תוכנה של קופסה סגורה (שני הדקים).</li> </ul>	$R = \rho \frac{l}{A}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- תלות ההתנגדות בפרמטרים שונים.</li> <li>- נגד משתנה, חיבור כראוסטט וכפוטנציומטר.</li> </ul>	3.3 התנגדות
3	- תלות מתח ההדקים בזרם.	$\varepsilon = V + rI$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- מקור מתח.</li> <li>- הגדרת כא"מ ומתח הדקים.</li> <li>- התנגדות פנימית.</li> <li>- הקשר בין כא"מ ומתח הדקים.</li> </ul>	3.4 כא"מ ומתח הדקים
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הדגמת טעינה ופריקה של קבל גדול דרך נורה.</li> <li>- ניסוי טעינה ופריקה של קבל.</li> </ul>	$I = I_0 e^{-t/RC}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הגדרת RC.</li> <li>- גרפי המתח והזרם כתלות בזמן בפריקה וטעינה.</li> <li>- השטח מתחת גרף הזרם כתלות בזמן.</li> </ul>	3.5 טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל

\* הנוסחה אינה נכללת בחומר החובה.

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
3	- ניסוי או הדגמה : אנרגיה בקבל טעון (פריקת קבל דרך נגד הנמצא בקלורימטר).	$P = VI$ $W = VIt$ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$	- אנרגיה חשמלית והספק חשמלי. - יחידות אנרגיה והספק, ה- kWh. - נצילות של תהליך המרת אנרגיה. - הפסדי אנרגיה חשמלית.	3.6 הספק ואנרגיה במעגל חשמלי, נצילות
8	- ניסוי : גילוי תוכנה של קופסה סגורה (ארבעה הדקים).	$R = \sum_{i=1}^n R_i$ $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ $\sum I = 0$ $\sum \varepsilon = \sum RI$	- חיבור נגדים. - חיבור מקורות. - חוקי קירכהוף (רק עבור מעגלים עם 2 צמתים).	3.7 מעגלים חשמליים
1	- הדגמה : הצגה של גליונומטר.		- מד-זרם ומד-מתח אידאליים. - השפעת מכשירים לא אידאליים על המעגל.	3.8 מכשירי מדידה

## מעגלי זרם ישר: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

בפרק זה יש להדגיש יותר את הצדדים הפיזיקליים ופחות את התרגול הטכני.

### 3.1 הזרם חשמלי ועצמת הזרם החשמלי (2 שעות)

- א. "זרם חשמלי" הוא מושג המתאר מטענים חשמליים בתנועה מכוונת. בכל מקרה שבו מטען חשמלי עבר מגוף אחד לגוף אחר, אנו אומרים כי זרם חשמלי.
- ב. על מנת להסביר את תופעת הזרם החשמלי במוליך, יש להשתמש במושגים שהוצגו לתלמידים באלקטרוסטטיקה. השדה החשמלי בתוך מוליך, מפעיל כוח על נושאי המטען במוליך בכיוון מסוים. נושאי המטען החיוביים נעים בכיוון זה, וזהו כיוונו של הזרם החשמלי במוליך (כיוון הזרם החשמלי במוליך ככיוון השדה החשמלי שבו).
- ג. מאחר שכיוון השדה האלקטרוסטטי הוא מהפוטנציאל הגבוה לנמוך, כיוון הזרם החשמלי, בכל קטע של המעגל, הוא מהפוטנציאל הגבוה לנמוך. בסוללה קיים מנגנון ההופך אנרגיה לא חשמלית (כימית, למשל) לאנרגיה חשמלית, מנגנון הגורם להעברת מטענים מהפוטנציאל הנמוך לפוטנציאל הגבוה.
- ד. כדי לחזק את הקשר בין המודל המיקרוסקופי למודל המקרוסקופי, מומלץ להביא את הנוסחה -  $I = nqAv$  ולהסביר את הפרמטרים שלה. חשוב להדגיש את ההבדל שבין "מהירות הסחיפה" לעצמת הזרם. בכיתות חזקות כדאי לפתח את הנוסחה.
- ה. האפיון הכמותי של הזרם החשמלי הוא על-ידי עצמת הזרם החשמלי, המוגדרת על-ידי  $I = \frac{dq}{dt}$ .
- יש להראות כי עצמת הזרם מתארת מבחינה מתמטית את שיפוע הגרף מטען-זמן (עצמת הזרם כנגזרת המטען בזמן), ואילו כמות המטען ניתנת על-ידי ה'שטח' שמתחת לגרף זרם-זמן. בשלב זה אין צורך בתרגול.
- ו. בעזרת תיאור גרפי של זרם כתלות בזמן, ניתן להציג את המושגים: "זרם ישר", "זרם קבוע", "זרם משתנה", "זרם חלופי".
- ז. יש לציין את התחממות המוליך שזורם בו זרם וכן שהעברת זרם בתמיסה אלקטרוליטית גורמת להתפרקות התמיסה. בשלב זה של הלימוד, רצוי להתייחס לקשר שבין עצמתן של תופעות חשמליות (כגון סטיית מחט מצפן) לעצמת הזרם.
- ח. חשוב לציין כי זרם חשמלי במוליך הוא תוצאה של תנועת אלקטרונים, ואילו בתמיסות אלקטרוליטיות הזרם נוצר כתוצאה מתנועת יונים.

### 3.2 המתח החשמלי וחוק אום (2 שעות)

- א. את הקשר בין מתח לזרם במוליך רצוי להראות בעזרת ניסוי. בשלב זה, חשוב להראות שתלות זו ייחודית למוליך, וזאת על-ידי השוואה בין אופייני נגד ונורת להט (ואולי אף דיודה תרמיונית).
- ב. תלמידים נוטים לחשוב שהמתח על הנגד נגרם על-ידי הזרם העובר דרכו. למעשה, המושג הראשוני הוא השדה החשמלי בחומר, המפעיל כוח על המטענים ויוצר זרם חשמלי. (אם פרק זה נלמד לאחר הוראת האלקטרוסטטיקה, ניתן לעמוד על הקשר שבין השדה החשמלי במוליך ובין עצמת הזרם במעגל). ה"שדה החשמלי" ו"הפרש הפוטנציאלים" ("מתח") הם מושגים הנגזרים זה מזה. קיומו של הפרש פוטנציאלים מעיד על קיומו של שדה חשמלי הגורם לזרם.
- ג. המתח בין שתי נקודות במעגל לאורכו של מוליך הומוגני, נמצא ביחס ישר למרחק ביניהן. ניתן להראות כי מעובדה זו נובע שהשדה החשמלי במוליך הומוגני הוא אחיד.
- ד. הנגד הופך אנרגיה חשמלית לחום. כאשר מטען נע בנגד, העבודה שביצע עליו השדה החשמלי שווה לכמות החום שנפלטת בנגד. תנועת המטען החשמלי בנגד היא תוצאה של כוח שמפעיל השדה החשמלי בנגד. יש לציין שללא התנגדות החומר, המטען היה יכול לשמור על מהירותו ללא עבודה (על מוליך).
- ה. עבודת השדה החשמלי ליחידת מטען מוגדרת כמתח על הנגד.

### 3.3 התנגדות (2 שעה)

- א. יש להדגיש את תלות ההתנגדות בגדלים גאומטריים של אורך הנגד ושטח-החתך שלו. כן תלויה ההתנגדות בסוג החומר. מומלץ לבצע ניסוי הממחיש תכונות אלו.
- ב. נגד משתנה מהווה יישום של אפשרות שינוי התכונות הגאומטריות.
- ג. יש להסביר בקצרה מהו חיבור פוטנציומטרי ומהו חיבור ריאוסטטי. הסבר מפורט יותר יינתן בעת הדיון במעגלים חשמליים.

### 3.4 כא"מ ומתח הדקים (3 שעות)

- א. יש להתייחס למושג "כא"מ" בהיבט האנרגטי: האנרגיה שהסוללה מעניקה ליחידת מטען (אפשר לומר גם: כא"מ – כמות אנרגיה למטען).
- ב. אפשר למדוד את הכא"מ בעזרת אלקטרומטר (אלקטרוסקופ מכויל), או בעזרת וולטמטר אידאלי.

ג. יש להדגיש שמתחם ההדקים הוא פונקציה של הזרם במעגל, לעומת הכא"מ וההתנגדות הפנימית שהם קבועים ומאפיינים את מקור המתח.

### 3.5 טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל (4 שעות)

א. מומלץ לפתוח את הנושא בהדגמה בעזרת קבל גדול מאוד (סדר גודל של IF) הנטען ונפרק דרך נורה, או בניסוי ממוחשב. אם אין לתלמידים רקע בנושא הפונקציה המעריכית, יידחה הטיפול הכמותי לשלב מאוחר יותר. גם אז, אין צורך לפתור את המשוואה הדיפרנציאלית, אולם יש להציג את משוואת הזרם כפתרון שלה. לא נדרש שימוש בפונקציה  $\ln(i)$ .

ב. למדידה בעזרת חיישנים המחוברים למחשב מספר יתרונות:

- ביצוע הניסוי מהיר יותר, ולכן מסגרת הזמן מאפשרת לבחון את השפעת שינויי המתח, ההתנגדות והקיבול על זמני הטעינה והפריקה.
- ניתן לחשב בקלות את השטח מתחת לגרף הזרם כתלות בזמן ( $\int Idt$ ), ולבחון מה הם הגורמים המשפיעים על המטען המצטבר בקבל.

ג. הטעם העיקרי לטיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל הוא שזוהי הפעם הראשונה שהתלמידים נתקלים ביישום מדעי של הפונקציה המעריכית. לכן חשוב לציין כי קיימים תהליכים נוספים בטבע המתנהגים לפי פונקציה זו. כמו כן, תהליך הטעינה והפריקה של קבל ממחיש את העובדה שהתהליך שבו המעגל מגיע למצב עמיד אינו מתרחש באפס זמן.

### 3.6 הספק ואנרגיה במעגל חשמלי, נצילות (3 שעות)

א. רצוי להציג את האנרגיה החשמלית כאחד מסוגי האנרגיה השונים ולנצל את הידע שהתלמידים רכשו בנושא בתחומים אחרים.

ב. התלמידים יתבקשו להביא דוגמאות של תהליכי המרת אנרגיה כאשר אחת משתי האנרגיות המעורבות היא חשמלית.

ג. יש להדגיש את ההבדל בין אנרגיה לבין הספק: האנרגיה היא גודל מצטבר לאורך הזמן, ואילו ההספק מבטא את האנרגיה ביחידת זמן. לכן נכון יהיה להשוות בין מכשירי חשמל רק לפי הספקיהם ולא לפי האנרגיה שהם צורכים.

ד. ההספק הרשום על כל מכשיר חשמלי נכון רק בתנאי שהמכשיר מחובר למתח הרשום עליו. אחרת ההספק ישתנה ביחס ישר לריבוע המתח.

- ה. כאן גם המקום להזכיר את היחידה המקובלת למדידת אנרגיה חשמלית במשק החשמל – הקילוואט-שעה (kWh).
- ו. מומלץ לדון עם התלמידים בתלותה של הנצילות ביחס שבין ההתנגדות החיצונית של המעגל להתנגדות הפנימית שלו.
- ז. כבר בשלב זה ניתן לדון עם התלמידים ביתרון שבהעברת אנרגיה למרחק במתח גבוה ובזרם נמוך.

### 3.7 מעגלים חשמליים (7 שעות)

- א. בחיבור נגדים יש להסביר את משמעותו של המושג "התנגדות שקולה".
- ב. חיבור מקורות במקביל יתייחס רק למקורות זהים.
- ג. כדאי להביא דוגמאות לחיבורים שונים של נגדים לוויסות מתח או זרם במכשירי חשמל. כאן המקום לדון בהבדל שבין החיבור הראוסטטי לבין החיבור הפוטנציומטרי.
- ד. אין צורך לדון במעגלים מורכבים המכילים יותר משני צמתים ושני מקורות כא"מ (הוספת מכשירי מדידה או מתגים לא תחשב כהוספת צמתים).
- ה. חשוב להדגיש את חוקי קירכהוף כמקרים פרטיים של חוק שימור המטען ("חוק הצומת") ושל חוק שימור האנרגיה ("חוק העניבה").

### 3.8 מכשירי מדידה (1 שעה)

- א. יש לציין את הדרישות ממכשיר מדידה אידאלי.
- ב. יש להסביר את אופן חיבור מכשירי המדידה במעגל ואת השפעתם על המעגל. במסגרת הדיון האיכותי, יש לדון בהשפעת מכשירי מדידה לא אידאליים על הגדלים הנמדדים.
- ג. אין צורך בדיון כמותי בשינוי תחומי המדידה.

## פרק 4: השדה המגנטי

שעות	הנושא
2	4.1 שדות מגנטיים של מגנטים וזרמים
3	4.2 השפעת השדה המגנטי על זרם, עצמת השדה המגנטי
5	4.3 הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו - בקרבת תיל ארוך מאוד, במרכז כריכה מעגלית, בסילוניית
2	4.4 כוח בין זרמים מקבילים, הגדרת האמפר
4	4.5 כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי
3	4.6 יישומים של הכוח המגנטי
19	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	- הדגמת מיפוי שדות מגנטיים בעזרת מצפן.		- האופי הווקטורי של השדה המגנטי. - זיהוי השדה המגנטי בנקודה. - השוואה בין קווי השדה המגנטי לבין קווי השדה האלקטרוסטטי. - השדה המגנטי של כדור הארץ.	4.1 שדות מגנטיים של מגנטים וזרמים
3	- ניסוי או הדמיית מחשב: תלות הכוח המגנטי בפרמטרים.	$F = Bil \sin \alpha$	- השדה המגנטי מפעיל כוח על מטענים נעים. - כיוון הכוח המגנטי. - תלות הכוח המגנטי בפרמטרים. - הגדרת עצמת השדה המגנטי והשוואה להגדרת עצמת השדה החשמלי.	4.2 השפעת השדה המגנטי על זרם, עצמת השדה המגנטי
5	- ניסוי: מדידת השדה המגנטי בתוך סילוני (מאזני זרם). - ניסוי: גליונומטר טנגנטי.	$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$ $B = \frac{\mu_0 NI}{l}$	- הזרם כמקור השדה המגנטי. - חוק אמפר. - הקשרים בין השדות המגנטיים והזרמים בקרבת תיל ישר ארוך, במרכז כריכה מעגלית, בסילונית.	4.3 הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו - בקרבת תיל ארוך מאוד, במרכז כריכה מעגלית, בסילונית
2	- הדגמה: כוח בין שני תילים נושאי זרם.	$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$	- הגדרת האמפר. - כיוון הכוח ביחס לכיוון הזרמים.	4.4 כוח בין זרמים מקבילים, הגדרת האמפר
4	- ניסוי או הדמיית מחשב: מדידת e/m. - הדמיית מחשב: הדגמת תנועת מטען במרחב.	$F = qvB \sin \alpha$ $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}^*$	- מעבר מכוח הפועל על תיל נושא זרם לכוח הפועל על מטען נע (כוח לורנץ). - הכוח המגנטי אינו משנה את גודל המהירות (עבודתו אפס). - השוואה בין הכוח המגנטי והכוח החשמלי. - הצגת המכפלה הווקטורית.	4.5 כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי
3	- הדמיה: ספקטרוגרף מסות וציקלוטרון.		- בורר מהירויות. - ספקטרוגרף מסות. - ציקלוטרון.	4.6 יישומים של הכוח המגנטי

\* הנוסחה אינה נכללת בחומר החובה.



# השדה המגנטי: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

## מבוא

רוב המושגים הנלמדים באלקטרומגנטיות הם מופשטים ורחוקים מחיי היום-יום של התלמידים. די בעובדה זו לגרום להם קשיי הבנה. יתרה מזאת; לתלמידים רבים תפיסה מרחבית לקויה, והיות והבנת המושגים הקשורים במגנטיות מצריכה גם ראייה מרחבית, הם מתקשים מאוד בהבנת המושגים ובראיית הקשרים ביניהם. הדגמות, ניסויים והדמיות יסייעו כאן.

קיימות שתי גישות מרכזיות להגדרת כיוון השדה המגנטי, ושתיהן קובעות את סדר הוראת המושגים בפרק זה:

גישה א': כיוון השדה המגנטי ככיוון שלאורכו מסתדרת מחט מגנטית. לפי גישה זו, סדר הוראת הנושאים יכול להיות כדלהלן:

- **שדות מגנטיים** של מגנטים וזרמים (ללא התייחסות לתכונות המגנטיות של חומרים).
- השפעת השדה המגנטי על זרם, הגדרת עוצמת השדה המגנטי.
- הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו, דוגמאות: בקרבת תיל ארוך מאוד, במרכז כריכה מעגלית, בסילוניית.
- כוח בין זרמים מקבילים: הגדרת האמפר.
- כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי.
- יישומים של הכוח המגנטי, דוגמאות: אפקט הול, ספקטרוגרף המסות, ציקלוטרון ובורר מהירויות.

גישה ב': כיוון השדה המגנטי נגזר מהכוח שהשדה המגנטי מפעיל על מטען נע:  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ . זוהי הגדרה אופרטיבית, הדומה להגדרת כיוון השדה החשמלי ככיוון הכוח הפועל על מטען חיובי.

לפי גישה זו, ניתן להתחיל בשני הנושאים האחרונים בגישה א' (סעיפים 4.5 ו-4.6), ולהמשיך בקשר שבין השדה המגנטי למקורותיו.

ההערות והפירוט שבהמשך ערוכים לפי הגישה הראשונה, אולם כל מורה יכול לאמץ את הגישה הרצויה לו.

#### 4.1 שדות מגנטיים של מגנטים וזרמים (2 שעות)

- א. התלמידים יתוודעו לאופי הווקטורי של השדה המגנטי. חשוב להדגיש כי שדות מגנטיים מקיימים את עקרון הסופרפוזיציה וכלל החיבור שלהם הוא וקטורי. כיוון השדה המגנטי בנקודה זהה לכיוון מחט מגנטית באותה הנקודה.
- ב. ניתן לתאר שדה מגנטי באמצעות קווי שדה.
- ג. יש להדגיש שקווי השדה המגנטי הם תמיד קווים סגורים, בעוד שקווי השדה האלקטרוסטטי מתחילים במטען חיובי או באין-סוף ומסתיימים במטען שלילי או באין-סוף.
- ד. בשלב זה כדאי להציג ניסויים המנצלים את אופיו הווקטורי של השדה המגנטי הארצי להדגמת אופיו הווקטורי של השדה המגנטי.

#### 4.2 השפעת השדה המגנטי על זרם, עוצמת השדה המגנטי (3 שעות)

- א. רצוי לבצע ניסויים שונים (למשל, מאזני זרם) שידגימו את הכוח שהשדה המגנטי מפעיל על מטענים נעים, דהיינו על זרם חשמלי. בניסויים אלו ניתן לחקור את תלות הכוח בפרמטרים השונים: עוצמת השדה, עוצמת הזרם והזווית שבין כיוון השדה וכיוון הזרם.
- ב. יש להראות שכיוון הכוח המגנטי מאונך לכיוון השדה המגנטי ולכיוון תנועת המטענים.

#### 4.3 הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו (5 שעות)

- א. רצוי להתייחס לזרם החשמלי כאל אחד ממקורות השדה המגנטי.
- ב. הניסוי עם הגליונומטר הטנגנטי מדגים גם את העובדה שהשדה המגנטי הוא וקטור.
- ג. יש להדגיש כי הקוטב הצפוני של כדור הארץ הוא למעשה קוטב מגנטי דרומי (S).
- ד. כדאי להדגים מצפן אנכי, להסביר את המושג "רכינה" ולציין מניין היא נובעת.
- ה. כדאי להזכיר כי יש סטייה קטנה (כ- 2 מעלות) בין ציר הסיבוב של כדור הארץ ובין הקו המחבר בין הקטבים.
- ו. אין צורך להשתמש בחוק אמפר ובחוק ביו-סָוור בצורתם הכללית לחישוב השדה במרכז סילונית ובמרכז כריכה מעגלית. אימות נוסחאות אלו ייעשה באמצעות ניסוי.

#### 4.4 כוח בין זרמים מקבילים והגדרת האמפר (2 שעות)

- האמפר מצטרף ליחידות המדידה הבסיסיות ב-SI המוכרות מהמכניקה. האמפר, היחידה של עוצמת הזרם החשמלי, מוגדר בעזרת הכוח הפועל בין שני תילים מקבילים נושאי זרם.

## 4.5 כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי (4 שעות)

- א. בדיון הראשוני בכוח המגנטי, עוסקים בשדה מגנטי קבוע בזמן. בהקשר זה יש להדגיש כי מאחר שהכוח המגנטי מאונך תמיד לכיוון תנועת המטען הנע בשדה המגנטי, עבודתו על המטען היא אפס. שדה מגנטי, קבוע בזמן, אינו משנה את האנרגיה הקינטית של המטען. משמעות מסקנה זו היא שלא ניתן להשתמש בשדה מגנטי בלבד לשינוי גודל מהירות המטענים. על אף שקיים שדה מגנטי המשתנה עם הזמן, המלווה שדה חשמלי המסוגל להאיץ מטענים, לא מומלץ להזכירו בשלב זה. הדיון בנושא יהיה בשלב מאוחר יותר.
- ב. הסיבה לכך שחלקיק טעון הנכנס לשדה בניצב לכיוון השדה, נע בתנועה מעגלית - אינה רק הכוח הפועל עליו המכוון במאונך למהירות, אלא העובדה שגודל הכוח הוא קבוע, אם השדה אחיד.
- ג. אפשר להציג את הכוח המגנטי  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  כמכפלה וקטורית.
- ד. כדאי להשוות בין הכוח על מטען הנע בשדה מגנטי:  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  ובין הכוח בשדה האלקטרוסטטי  $\vec{F} = q\vec{E}$ . חשוב שהמורה יהיה מודע לאנלוגיה מוטעית העלולה להיווצר בין שני כוחות ושדות אלה - החשמלי והמגנטי, ועליו להדגיש את הדומה והשונה ביניהם.

כוח מגנטי	כוח חשמלי
- פועל על מטען נע.	- פועל גם על מטען נע וגם על מטען נח.
- כיוונו על מטען חיובי הוא מאונך למישור שנוצר על-ידי וקטור השדה המגנטי ווקטור המהירות של המטען.	- כיוונו על מטען חיובי הוא ככיוון השדה החשמלי.
- אינו עושה עבודה.	- עושה עבודה.

- ה. קיימת נטייה להדגיש במיוחד תנועה במסלול מעגלי בשדה מגנטי, וזאת על חשבון דיון בתנועה במסלולים אחרים ודיון בתנאים הדרושים לקיומה של תנועה זו. נטייה זו עלולה ליצור אצל התלמידים את הרושם כאילו תנועה במסלול מעגלי היא התנועה הבלעדית האפשרית בשדה מגנטי. כדאי לנתח איכותית תנועות במסלולים אחרים ולהצביע על שני רכיבי המהירות - המאונך לשדה המגנטי והמכוון לאורך קו השדה. בהקשר זה אפשר להזכיר את חגורות ון-אלן.

#### **4.6 יישומים של הכוח המגנטי (3 שעות)**

כיישום פשוט של הכוח המגנטי, ניתן להזכיר כאן מכשירים פשוטים, כמו ממסרים אלקטרומגנטיים, רשמי-זמן ומנופים אלקטרומגנטיים. כיישומים מתקדמים של הכוח המגנטי, ניתן לדון בספקטרוגרף המסות, בציקלוטרון ובמאיצי חלקיקים מעגליים.

## פרק 5: השראה אלקטרומגנטית

שעות	הנושא
10	5.1 כא"מ מושרה, חוק פארדיי וחוק לנץ
3	5.2 יישומים טכנולוגיים
2	5.3 השראה עצמית
2	5.4 משוואות מקסוול
17	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- הדגמת זרם מושרה בסליל הנע בקרבת מגנט.</li> <li>- הדגמות בעזרת אוסצילוסקופ.</li> <li>- הדגמה: מדידת B בעזרת סליל בוחן.</li> <li>- ניסוי: כא"מ במנוע מרים משא.</li> <li>- ניסוי: בלימת מנוע מרים משא.</li> <li>- הדגמה: מגנט נופל בתוך צינור אלומיניום.</li> </ul>	$\varepsilon = B \ell v \sin \alpha$ $\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- כא"מ הנוצר בין קצות מוליך הנע בשדה מגנטי אחיד - הסבר בעזרת כוח לורנץ.</li> <li>- כא"מ הנוצר בלולאה כתוצאה מתנועתה יחסית לשדה מגנטי.</li> <li>- שטף מגנטי דרך משטח.</li> <li>- חוק פארדיי.</li> <li>- כא"מ הנוצר בלולאה כתוצאה משינוי בזמן של השדה המגנטי.</li> <li>- חוק לנץ וקביעת כיוון הזרם המושרה.</li> <li>- חוק לנץ כנובע משימור אנרגיה.</li> </ul>	5.1 כא"מ מושרה, חוק פארדיי וחוק לנץ
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ניסויים במערכת שנאי מתפרק.</li> </ul>	$\varepsilon = -\omega NBA \sin \omega t$ $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- גנרטור AC - הכא"מ המושרה בסליל הטבעתי המסתובב בשדה מגנטי.</li> <li>- מתח וזרם אפקטיביים.</li> <li>- שנאי אידאלי.</li> <li>- העברת אנרגיה.</li> </ul>	5.2 יישומים טכנולוגיים
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ניסויים במערכת שנאי מתפרק.</li> <li>- הדגמה: הדלקת נורה בהשהיה.</li> </ul>	$\varepsilon = -L \frac{di}{dt}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- המושג "השראות".</li> <li>- התנהגות משרן במעגל זרם ישר (דיון איכותי).</li> </ul>	5.3 השראה עצמית
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- סרט בסדרה: "מעבר ליקום המכני" (או"פ).</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- הצגת המשוואות ללא פיתוח כסיכום לנושא האלקטרומגנטיות.</li> </ul>	5.4 משוואות מקסוול

\* הנוסחה אינה נכללת בחומר החובה.

# השראה אלקטרומגנטית: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

## מבוא

- הכא"מ המושרה הוא תוצאה של הפרדת מטענים, שנוצרה מפעולת כוח לורנץ על נושאי המטען החופשיים או משדה חשמלי הנוצר משדה מגנטי משתנה בזמן.
- השדה החשמלי הנוצר מהפרדת מטענים הוא משמר, בניגוד לשדה החשמלי הנוצר משדה מגנטי המשתנה בזמן.
- חשוב להראות כי העבודה החשמלית המתפתחת במעגל, שווה לעבודת הכוח החיצוני הדרוש לשמירת מהירות קבועה של הלולאה.

## 5.1 כא"מ מושרה, חוק פארדיי וחוק לנץ (10 שעות)

- ראוי לשים לב שבתהליכים המתוארים בהמשך נוצר תמיד כא"מ מושרה ולא בהכרח זרם מושרה. כדי שייוצר זרם מושרה, המעגל צריך להיות סגור.  
הערה: גם במעגל הפתוח, בשלב הפרדת המטענים, יש תנועה רגעית של נושאי המטען, המהווה זרם חשמלי רגעי.
- בעת השתנותו של השטף המגנטי דרך המעגל החשמלי, נוצר כא"מ מושרה במעגל. הכא"מ המושרה מזרים במעגל סגור זרם מושרה, המעכב את סיבתו יצירתו (חוק לנץ).
- שינוי השטף המגנטי דרך המעגל יכול להיגרם על-ידי תהליכים שונים, כגון:
  - קיימת תנועה יחסית בין המעגל ובין השדה המגנטי; בתהליך זה הכא"מ המושרה הוא תוצאה של כוח לורנץ, הפועל על המטענים בחלקי המעגל הנמצאים בתנועה ביחס לשדה המגנטי.
  - המעגל נמצא במנוחה ביחס לשדה המגנטי, אולם השדה המגנטי משתנה - בעצמתו או בכיוונו או בשניהם. בתהליך זה, חלק מהמטענים במעגל מצויים באזור שהוא כולו מחוץ לשדה המגנטי, ולכן אי-אפשר לראות בכוח לורנץ את הגורם להיווצרות הכא"מ המושרה. מכאן שהכוח הפועל על המטענים נגרם על-ידי שדה חשמלי, הנוצר על-ידי השדה המגנטי המשתנה.
  - על אף אופיים השונה מאוד של התהליכים, מפתיע לגלות כי הכא"מ המושרה, הנוצר על-ידי כל אחד מהם, מוצא את ביטויו באותה נוסחה מסכמת:  $\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$ . במילים אחרות, הכא"מ המושרה שווה לקצב שינוי השטף המגנטי דרך המעגל, בלי להיות תלוי באופן שבו מושג שינוי השטף. (אין צורך לדון במצבים כדוגמת "דיסקת פארדיי" שבהם הכא"מ המושרה נוצר על-ידי אחת מהסיבות שהוזכרו, אך לא ניתן להסבירו על-ידי חוק פארדיי.)

- ה. עיקר השימוש בחוק לנץ הוא בקביעת כיוון הזרם המושרה.
- ו. יש להדגיש את חשיבות חוק לנץ מבחינת שימור האנרגיה.
- ז. ניתן להדגים את חוק לנץ בצורה יפה בעזרת ניסויים כגון:
- מערכת מנוע מרים משא - הסל היורד נבלם ברגע שנוצר זרם מושרה במעגל המנוע.
  - מגנט הנופל בצינור אלומיניום.
- ח. יש להדגיש כי ההספק המתפתח במעגל שבו זורם זרם מושרה, הוא תוצאה של עבודה חיזונית.

## 5.2 יישומים טכנולוגיים (3 שעות)

- א. יש לנמק, בצורה איכותית בלבד, את הנוסחה  $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$  (יחס השנאה), בנימוק המסתמך על שימור אנרגיה וכא"מ מושרה.
- ב. יש להסביר כיצד נוצר כא"מ מושרה בלולאה או בסליל המסתובבים בשדה מגנטי בהקשר של מחולל (גנרטור).
- ג. זה הזמן להציג לפני התלמידים את המושג "זרם חלופין" ולדבר באופן איכותי על ערכים אפקטיביים של מתח וזרם במעגל AC. על התלמידים לדעת שהערך האפקטיבי של מתח וזרם חלופין הוא הערך של מתח וזרם קבועים שעבורם מתפתח אותו הספק.
- ד. יש ללמד על השנאי בהקשר של העברת אנרגיה למרחקים.

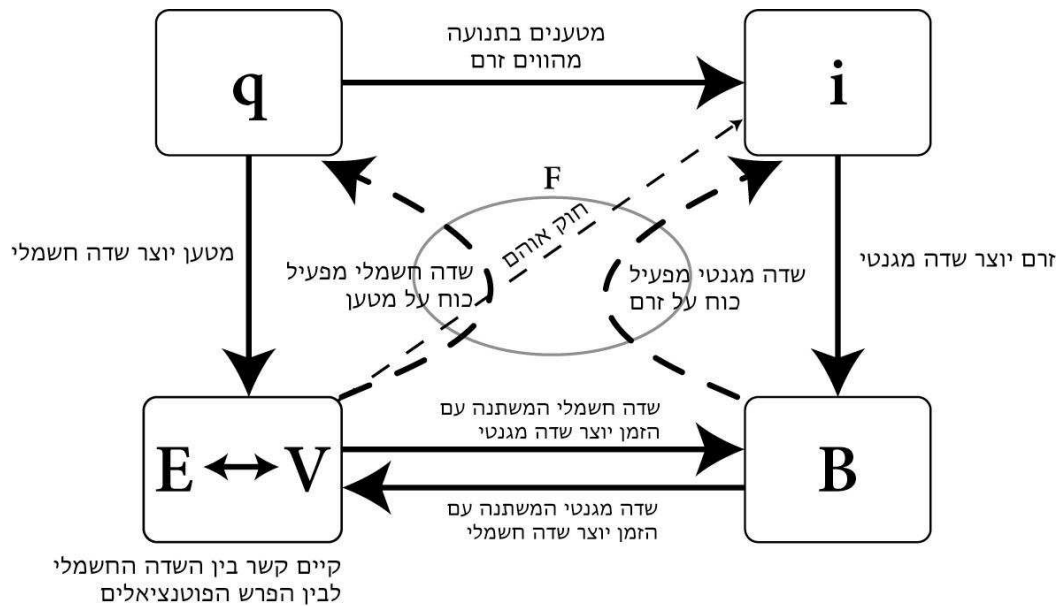
## 5.3 השראה עצמית (2 שעות)

- א. מומלץ לבצע הדגמה של תופעת ה"השראות העצמית" (נורה מחוברת בטור למשרן) ותלותה האיכותית בפרמטרים השונים.
- ב. מומלץ לקיים דיון איכותי על השפעת המשרן על עצמת הזרם הישר במעגל בעת ההדלקה או הכיבוי. ניתן לראות בהשראות תכונה המבטאת 'התמדה' (אינרציה) של המטענים.
- ג. ניתן להציג התקנים המבוססים על משרן למתחים גבוהים בפרקי זמן קצרים, כגון: 'סטרטר' של פלורנסנט, סליל הצתה של מכונית.



## 5.4 משוואות מקסוול (2 שעות)

- א. באמצעות מפת המושגים המופיעה להלן ניתן להסביר כיצד ארבע המשוואות הקרויות על שם מקסוול מסכמות את כל ההיבטים של האלקטרומגנטיות, שנלמדו במסגרת נושא זה.
- ב. חשוב להראות לתלמידים שלמרות המראה הלא מוכר של הביטויים המתמטיים היוצרים את משוואות מקסוול, המשמעות הפיזיקלית שלהן מוכרת להם.
- ג. התלמידים לא יידרשו לבצע כל פעילות מתמטית הקשורה למשוואות מקסוול.
- ד. מומלץ להיעזר גם בטבלה שבעמוד הבא כדי להבין את המשמעות הפיזיקלית של משוואות מקסוול.



- ה. חשוב לציין את המשמעות ההיסטורית של משוואות מקסוול: משוואות אלה משלימות את חוקי ניוטון, המפרשים את עולם המכניקה, ובעזרתן חשבו הפיזיקאים של תחילת המאה ה-20 שניתן להסביר כמעט את כל התופעות בעולם הטבע. מומלץ לנצל את הוראת הנושאים "גלים אלקטרומגנטיים" ו"משוואות מקסוול" להרחבת אופקי התלמידים ולהקניית היבטים היסטוריים הנוגעים להתפתחות הפיזיקה.

משמעות	החוק	ביטוי מתמטי	משוואת מקסוול*
מטענים יוצרים שדות אלקטרוסטטיים. קווי השדה מתחילים ומסתיימים במטענים.	חוק גאוס באלקטרוסטטיקה	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{\Sigma q}{\epsilon_0}$	1
אין מונופולים מגנטיים. קווי השדה נסגרים בעצמם.	חוק גאוס במגנטיות	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	2
שטף מגנטי משתנה יוצר כא"מ.	חוק פארדיי וחוק לנץ	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt}$	3
זרם ושדה חשמלי המשתנה בזמן יוצרים שדה מגנטי.	חוק אמפר הכולל את זרם ההעתק	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \Sigma I + \mu_0 \epsilon \frac{d\phi_E}{dt}$	4

\* משוואות מקסוול אינן נכללות בחומר החובה.