

חוק אוהם ועקומות אופייניות

א. מטרת הניסוי

- (1) ללמוד כיצד לבנות מעגלים חשמליים.
- (2) ללמוד כיצד לחבר מכשירי מדידה במעגל וכיצד להפעיל אותם.
- (3) לחקור את ההתנגדות של התקנים שונים, ואת תלות התנגדותם בזרם (בטמפרטורה), וזאת על ידי בניית עקומות אופייניות.
- (4) לבדוק תלות התנגדות תיל מוליך באורכו.

ב. רקע תיאורטי

הפוטנציאל החשמלי

הפוטנציאל החשמלי בנקודה מסוימת מוגדר כאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית ליחידת מטען בנקודה זו.

מסמנים את הפוטנציאל החשמלי באות V . כדי לחשב את הפוטנציאל החשמלי בנקודה P מסוימת, מניחים בנקודה זו מטען בוחן q' , מודדים או מחשבים, אם אפשר, את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שלו בנקודה זו, $U_{q'}$. הפוטנציאל החשמלי יהיה:

$$(1) \quad V = U_{q'} / q'$$

הערות:

1. הפוטנציאל החשמלי הוא גודל סקלרי, יחידת הפוטנציאל החשמלי היא יחידת אנרגיה המחולקת ביחידת מטען, ובשיטת היחידות SI יחידה זו היא J/C. יחידה זו נקראת "וולט" והיא מסומנת באות V:

$$(2) \quad [V] = J/C = 1V$$

2. אם בנקודה מסוימת שורר פוטנציאל שגודלו V וולטים, האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען שגודלו q קולונים הממוקם בנקודה זו תינתן על ידי:

$$(3) \quad U_q = qV$$

מתח חשמלי

הגדרה: כאשר מתקדמים מנקודה 1 לנקודה 2 בשדה חשמלי כלשהו, הפרש הפוטנציאלים בין נקודת ההתחלה 1 ונקודת הסיום 2 ($V_1 - V_2$), נקרא **מתח חשמלי** בין נקודות אלה (Voltage). גודל זה מסומן V_{12} . לעיתים מסתפקים באות V בלבד. יחידת המתח החשמלי הינה גם כן "וולט".

משמעות המתח החשמלי

על מנת להבין מהי משמעות המתח (החשמלי) בין שתי נקודות, נניח שמטען נקודתי q נע בהשפעת כוח חשמלי מנקודה 1 שבה הפוטנציאל החשמלי הוא V_1 אל נקודה 2 שבה הפוטנציאל החשמלי הוא V_2 . עבודת הכוח החשמלי המתבצעת בתנועה זו נתונה על ידי: $W(1 \rightarrow 2) = U_1 - U_2$. על פי הקשר (3), נקבל שעבודת הכוח החשמלי המתבצעת בהעברת המטען q מנקודה 1 לנקודה 2, נתונה על ידי:

$$W_q(1 \rightarrow 2) = q(V_1 - V_2)$$

מקשר זה נקבל:

$$V_1 - V_2 = \frac{W_q(1 \rightarrow 2)}{q}$$

על פי הקשר האחרון, המתח החשמלי בין הנקודות 1 ו-2 ($V_1 - V_2$) מבטא את עבודת הכוח החשמלי המושקעת בהעברת יחידת מטען (קולון אחד) מנקודה ההתחלה 1 אל נקודת הסיום 2. משמעות נוספת למתח החשמלי בין הנקודות 1 ו-2 מתקבלת על ידי הצבת $W_q(1 \rightarrow 2) = U_1 - U_2$ בקשר האחרון, כך שמתקבל:

$$V_1 - V_2 = \frac{U_1 - U_2}{q}$$

הגודל $U_1 - U_2$ מבטא את כמות האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שהמטען q מפסיד במעבר מנקודה 1 לנקודה 2. לכן על פי הביטוי האחרון נקבל שהמתח בין הנקודות 1 ו-2 מבטא את כמות האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שכל קולון מפסיד כאשר המטען עובר מנקודה 1 לנקודה 2.

זרם חשמלי

הזרם החשמלי הוא תנועה מכוונת של מטענים חשמליים בתווך מסוים. במתכות, תנועה זו מורכבת מאלקטרונים חופשיים הנעים מפוטנציאל נמוך אל פוטנציאל גבוה. הגדרה: עוצמת הזרם החשמלי מוגדרת כקצב מעבר המטען החשמלי דרך חתכו של מוליך הזרם, כלומר, כמות המטען החשמלי העוברת דרך חתך החוט מוליך המטענים החשמליים בכל יחידת זמן. על כן, אם עוברת דרך חתך חוט החשמל כמות מטען חשמלי ΔQ במשך זמן Δt , עוצמת הזרם החשמלי I בחוט נתונה על ידי:

$$(4) \quad I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

לפי הגדרה זו, יחידת הזרם החשמלי היא (C/s). יחידה זו נקראת "אמפר" ומסומנת באות A :

$$(5) \quad [I] = 1C/s = A$$

כאשר עוצמת הזרם החשמלי במוליך היא אמפר אחד, כמות המטען החשמלי שעוברת בכל שנייה דרך חתך המוליך היא קולון אחד.

כיוון הזרם במעגל החשמלי נקבע להיות מכוון מהפוטנציאל הגבוה אל הפוטנציאל הנמוך, כלומר נגד כיוון תנועת האלקטרונים.

התנגדות

התנגדות היא תכונה פיזיקלית המבטאת את מידת התנגדות של מוליך למעבר הזרם החשמלי דרכו, אותה מסמנים באות R , מהמילה הלועזית (Resistance).

הנגד (Resistor) הוא רכיב במעגל החשמלי שעיקר תפקידו להתנגד למעבר זרם חשמלי.

המדד להתנגדותו של מוליך מסוים הוא הזרם החשמלי I שעובר דרכו. עוצמת הזרם החשמלי שעובר דרך המוליך תלויה בשני גורמים: המתח החשמלי V והתנגדות המוליך R , כך שמתקיים הקשר:

$$(6) \quad I \propto \frac{V}{R}$$

גודל ההתנגדות של הגוף מוגדר בגודל R שהופך את הקשר האחרון לשוויון.

לפי הגדרה זו נקבל:

$$(7) \quad R = \frac{V}{I}$$

לכן נקבל:

התנגדות של גוף הינה היחס בין המתח החשמלי שנופל על הגוף ובין הזרם החשמלי שעובר דרכו. על פי הקשר (7), נקבל שיחידת ההתנגדות היא:

$$(8) \quad [R] = \frac{V}{A}$$

יחידה זו נקראת אוהם ומסומנת ב- Ω . נגד שהתנגדותו אוהם אחד, הוא נגד אשר אם יחובר למעגל חשמלי ויופעל בין קצותיו מתח של וולט אחד, יעבור דרכו זרם חשמלי של אמפר אחד.

חוק אוהם

ככל שהמתח על הנגד עולה, הזרם עולה, וכתוצאה מכך המוליך מתחמם וההתנגדות משתנה. לכן R במשוואה (7) אינו קבוע. עבור מוליכים מתכתיים ההתנגדות משתנה מעט עבור טווח מתחים המקובל במעגלים חשמליים, ולכן ניתן עבור מוליכים אלה להזניח את השינוי בהתנגדות, ונוכל להגדיר את R במשוואה (7) כגודל קבוע בתנאי עבודה גילים. על כן נוכל לרשום:

$$(9) \quad V = RI$$

במקרה זה, שבו ההתנגדות (R) היא גודל קבוע, כלומר היחס בין המתח לזרם הוא יחס ישר, הקשר האחרון נקרא בשם **חוק אוהם**.

במקרים בהם חוק אוהם מתקיים, הגרף המתאר את הזרם שעובר דרך הנגד כפונקציה של המתח עליו הוא קו ישר שעובר בראשית הצירים.

הגורמים המשפיעים על ההתנגדות של מוליך

ההתנגדות של מוליך או נגד תלויה בגורמים הבאים:

- (1) **צפיפות האלקטרונים החופשיים (n_e)**. ככל שצפיפות האלקטרונים אלה בחומר גדולה יותר, תקטן התנגדותו של המוליך למעבר הזרם דרכו. ולהפך, ככל שצפיפות האלקטרונים החופשיים בחומר קטנה יותר, תגדל התנגדותו למעבר הזרם דרכו.
- (2) **מבנה הסריג (הגביש)**. אם לסריג החומר ממנו עשוי הגוף יש מבנה מסודר וסימטרי, תקטן התנגדות הגוף למעבר הזרם דרכו, כי מספר ההתנגשויות בין האלקטרונים החופשיים שיוצרים את הזרם ובין יוני הסריג יקטן. לעומת זאת, אם הסריג בעל מבנה לא מסודר, יגדל באופן משמעותי מספר ההתנגשויות בין האלקטרונים ובין אטומי הסריג, דבר שמשמעותו התנגדות גבוהה של הגוף למעבר הזרם דרכו.
- (3) **טמפרטורת הגוף**: טמפרטורת הגוף היא גורם נוסף שמשפיע על התנגדות הגוף. העלאת הטמפרטורה של הגוף גורמת מצד אחד להגדלת אי הסדר של היונים בסריג, שתוצאתה הגדלת התנגדותו של הגוף. מצד שני, החימום עשוי להגדיל את מספר האלקטרונים החופשיים בגוף, כלומר להגדלת הזרם (ללא שינוי במתח) ולכן להקטנת ההתנגדות שלו. שילוב שני הגורמים האלה קובע את השינוי של התנגדות הגוף בהשפעת שינויי טמפרטורה. במתכות, החימום אינו גורם לעלייה משמעותית בצפיפות האלקטרונים החופשיים, כי מספרם הוא במצב רוויה. לעומת זאת, הוא גורם לעלייה באי הסדר של הסריג. לכן במתכות החימום גורם לעלייה בהתנגדות. בחלק מהחומרים המבדדים, החימום אינו משנה את אי הסדר של המבנה שלהם. לעומת זאת, צפיפות האלקטרונים החופשיים תעלה באופן משמעותי. לכן בחומרים כאלה ההתנגדות קטנה עם עליית הטמפרטורה.

(4) **ממדי הגוף:** גורם נוסף המשפיע על התנגדות הגוף הוא ממדי הגוף. ככל שאורך המוליך ℓ גדול יותר, יגדל מספר ההתנגשויות בין האלקטרונים החופשיים ובין הסריג, ולכן תגדל ההתנגדות. לעומת זאת, ככל ששטח חתך הרוחב A גדול יותר, יהיו יותר אלקטרונים חופשיים, וגם מספר ההתנגשויות של האלקטרונים זה בזה יקטן, ולכן תקטן ההתנגדות. עבור תיל גלילי ועשוי ממתכת מתקיים הקשר הבא:

$$(10) \quad R \propto \frac{\ell}{A}$$

מקדם הפרופורציה בקשר האחרון מסומן באות ρ (מבטאים אותו רו). לכן נקבל:

$$(11) \quad R = \rho \frac{\ell}{A}$$

ρ נקרא **ההתנגדות הסגולית** של החומר שממנו עשוי הנגד. גודל זה מגלם בתוכו את השפעת סוג החומר על ההתנגדות. לפי הקשר האחרון, יחידת ההתנגדות הסגולית היא:

$$(12) \quad [\rho] = \frac{[R][A]}{[\ell]} = \frac{\Omega \text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \cdot \text{m}$$

אם התנגדות התיל אחידה, ניתן לרשום את הקשר האחרון (11) באופן הבא:

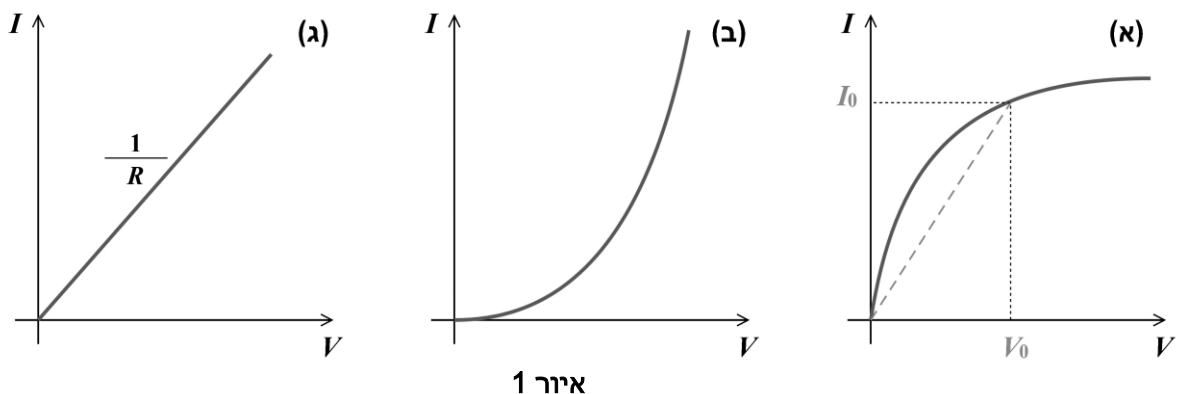
$$(13) \quad R = \lambda \ell$$

כאשר λ היא התנגדות התיל ליחידת אורך.



אופיינים של מוליכים

הגרף המתאר את הזרם החשמלי כפונקציה של המתח הנופל על נגד מסוים, נקרא **אופיין** של הנגד. נדון בשלוש צורות של אופיינים, כמתואר באיור 1. יש לשים לב, כי על פי הגדרת ההתנגדות, גודל ההתנגדות בנקודה מסוימת (V_0, I_0) על הגרף נתון על ידי: $R = V_0 / I_0$. לכן הגודל I_0 / V_0 שווה ל- $1/R$ (ראה איור 1א), ומבטא תכונה הפוכה להתנגדות, שקראנו לה מוליכות. מבחינה גאומטרית, הגודל I_0 / V_0 אינו מבטא את שיפוע הגרף בנקודה (V_0, I_0) , אלא מבטא את שיפוע הקו המחבר את הנקודה (V_0, I_0) עם הראשית, שהוא הקו המקווקו באיור 1א.



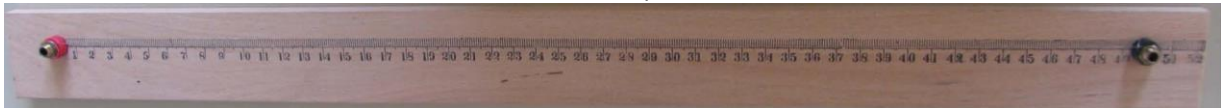
איור 1

אם נתבונן באופיין בגרף 1א למשל, ניווכח שהגודל I_0 / V_0 קטן עם המתח, ומכיוון שגודל זה שווה ל- $1/R$, מקבלים שההתנגדות של הגוף במקרה זה עולה עם עליית המתח עליו (עם עליית הזרם דרכו). נגד זה אינו מקיים את חוק אוהם. במצב כזה אי אפשר לדבר על התנגדות הנגד, אלא רק על התנגדותו במתח מסוים. כך גם באופיין בגרף 1ב. כאן, ככל שהמתח גדל, ההתנגדות קטנה, ולכן שוב אי אפשר להתייחס להתנגדות הנגד כקבועה. לעומת זאת הנגד המתואר באופיין המתואר באיור 1ג, מקיים את חוק אוהם בכל הטווח של שינויי המתח, כלומר התנגדותו לא משתנה. כאמור,

לרכיב כזה נקרא נגד (רכיב) אוהמי. הסיבה לשינוי ההתנגדות עם עליית המתח בחומרים אחדים היא שעליית המתח גורמת כאמור לעליית הזרם, ועליית הזרם גורמת לחימום הגוף. לחימום הגוף יש השפעה ישירה על גודל התנגדות הגוף. כפי שהסברנו מקודם, החימום יכול להעלות את התנגדות הגוף במידה זו או אחרת, או להקטין אותה. ישנם חומרים פחות רגישים לטמפרטורה, והשינוי בהתנגדותם זניח בתחום מסוים של טמפרטורות. על פי הסבר זה, גרף 1 א מתאר חומרים שהתנגדותם עולה עם עליית הטמפרטורה. גרף 1 ב מתאר חומרים שהתנגדותם קטנה עם עליית הטמפרטורה, וגרף 1 ג מתאר חומרים שהתנגדותם אינה משתנה עם עליית הטמפרטורה (בתחום המדידה כמובן), כלומר רכיבים אוהמיים.

ג. ציוד ומכשור

- 1) ספק מתח ישר.
- 2) וולטמטר ואמפרמטר.
- 3) נגד.
- 4) נורת להט.
- 5) נגד משתנה ותילים.
- 6) נגד בצורת תיל ארוך המקובע על סרגל המאפשר מדידת אורך כפי שמתואר באיור הבא (התיל לא נראה בבירור בכלל הסימנים שמתחתיו).

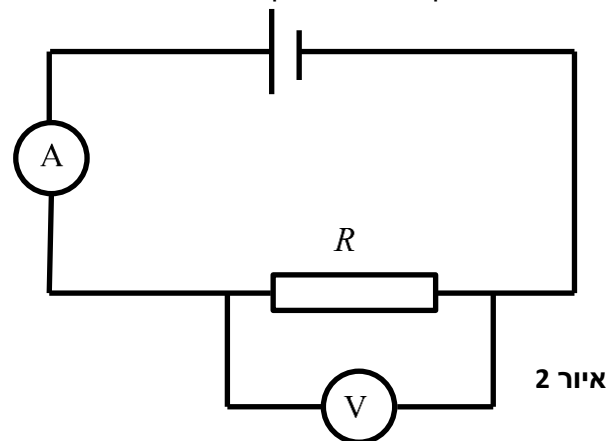


ד. הניסוי (בניית המערכת וביצוע המדידות)

בניסוי זה קיימים 3 חלקים.

החלק הראשון:

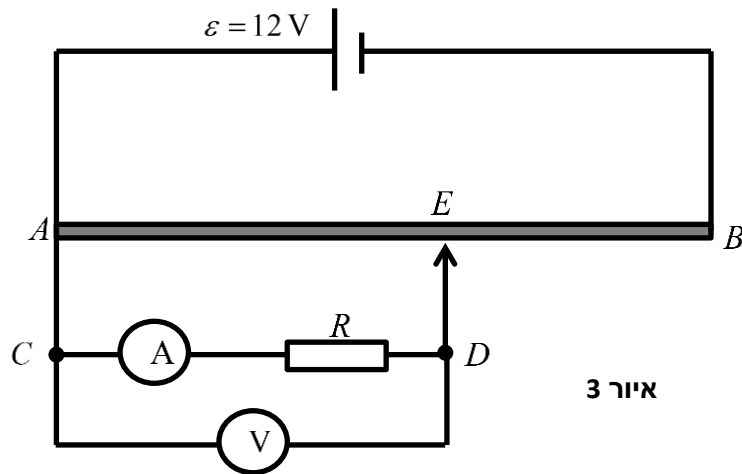
- 1) חבר את הנגד והאמפרמטר בטור לספק המתח ובמקביל לנגד חבר וולטמטר (ראה איור 2).



- 2) מדוד את הזרם בנגד כפונקציה של המתח (בקפיצות של 0.5 או 1 וולט). רשום את התוצאות בטבלה המתארת את I כפונקציה של V .

הערה: אם אין ברשותך במעבדה ספק מתח המאפשר שינוי מתח היציאה שלו באופן רציף, ניתן להשתמש במעגל המתואר באיור 3. מעגל זה מאפשר לשנות את המתח על הנגד באופן רציף. במעגל זה, ספק המתח מחובר לקצוות תיל ישר וארוך המקובע על בסיס עשוי מחומר מבדד. את

הנגד, ביחד עם אמפרמטר המחובר אליו בטור, מחברים בין קצה אחד של התיל (הקצה A באיור 3) ונקודה E על התיל (שהיא מגע נייד), ובמקביל לנגד מחברים וולטמטר.



איור 3

אם נשנה את מיקום המגע E לאורך התיל באופן רציף, ישתנה המתח הנופל על הנגד באופן רציף וכך גם הזרם (שים לב לכך, מכיוון שהתנגדות האמפרמטר זניחה, המתח הנופל עליו זניח). החיבור המתואר באיור 3 נקרא חיבור פוטנציומטרי.

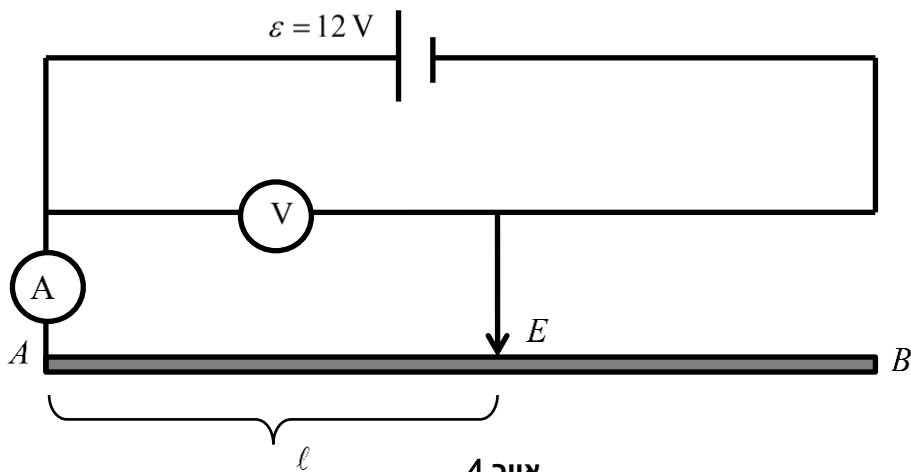
החלק השני של הניסוי

חזור על החלק הראשון, אבל החלף את הנגד האוהמי בנורת להט.



החלק השלישי של הניסוי

1) חבר את המעגל הבא (קבע את מתח ספק המתח על 12 וולט). AB הוא תיל המקובע על סרגל. המגע E הוא מגע נייד.



איור 4

2) שנה את אורך התיל l הנמצא בתוך המעגל החשמלי בצעדים קבועים (5 ס"מ כל צעד, לדוגמה), זאת על ידי שינוי מיקום המגע הנייד E לאורך התיל, ומדוד את המתח V ואת הזרם I . את הקריאות בחלק זה רשום בטבלה הבאה (העתק את הטבלה למחברתך):

l (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5				
I (A)									
V (V)									

ה. עיבוד וניתוח המדידות

עיבוד החלק הראשון:

- (1) שרטט גרף המתאר את הזרם שעובר בנגד כפונקציה של המתח עליו.
- (2) קבע אם התנגדות הנגד קבועה או ממשתנה במהלך המדידות. אם ההתנגדות קבועה, חשב את גודלה, אם היא משתנה הסבר את צורת הגרף שקיבלת.

עיבוד החלק השני:

- (1) שרטט גרף המתאר את הזרם שעובר בנוורה כפונקציה של המתח עליה.
- (2) קבע אם התנגדות הנורה קבועה או ממשתנה במהלך המדידות. אם התנגדותה קבועה, חשב את גודלה, אם היא משתנה הסבר את צורת הגרף שקיבלת.

עיבוד החלק השלישי:

- (1) חשב את התנגדות חלק התיל הנמצא במעגל החשמלי וזאת באמצעות חוק אוהם ($R = V / I$) והשלם את הטבלה הבאה:

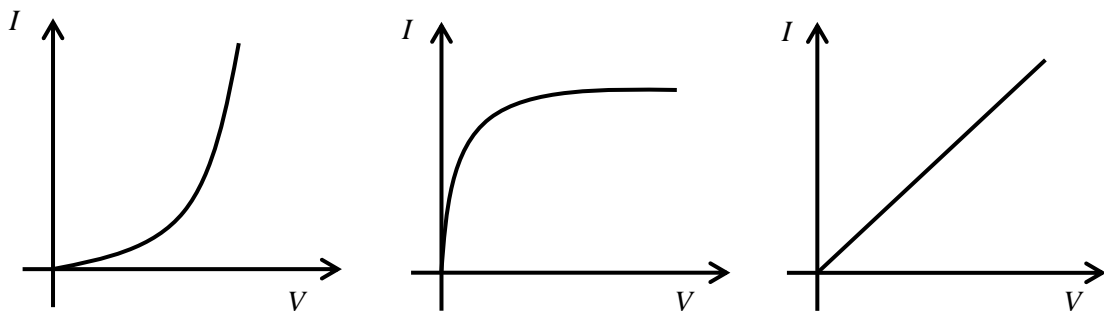
ℓ (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5				
I (A)									
V (V)									
$R = \frac{V}{I}$ (Ω)									



- (2) שרטט גרף המתאר את התנגדות התיל R כפונקציה של אורכו ℓ .
- (3) חשב את שיפוע הגרף שקיבלת והסבר מהי משמעות שיפוע זה.

ה. שאלות הכנה

- (1) לפניך שלושה גרפים המתארים את הזרם כפונקציה של המתח על שלושה רכיבים חשמליים שונים. בכל אחד מהגרפים קבע אם התנגדות הרכיב גדלה עם המתח, קטנה או לא משתנה. במקרים בהם ההתנגדות משתנה הסבר מהי הסיבה לכך.



איור 5

- (2) הסבר כיצד מחשבים את ההתנגדות בנקודה מסוימת בגרפים הנ"ל.
- (3) הסבר מדוע ההתנגדות בנקודה מסוימת בגרפים הנ"ל אינה שווה לשיפוע הגרף בנקודה זו.
- (4) נתון שהתנגדות נורת הלהט עולה עם הטמפרטורה. שרטט, על סמך נתון זה, גרף המתאר באופן איכותי את הזרם כפונקציה של המתח על נורת הלהט.
- (5) שרטט גרף המתאר באופן איכותי את התנגדות תיל גלילי מוליך כפונקציה של אורכו באם התנגדותו אחידה.
- (6) מהי משמעות שיפוע הגרף ששרטטת בשאלה הקודמת, וקבע מהי יחידת גודל זה.