

## טעינה ופריקה של קבל

### א. מטרת הניסוי

- (1) לחקור את הטעינה והפריקה של קבל.
- (2) לבדוק את המשוואות המתארות את הזרם והמתח בתהליך הטעינה של קבל ופריקתו.

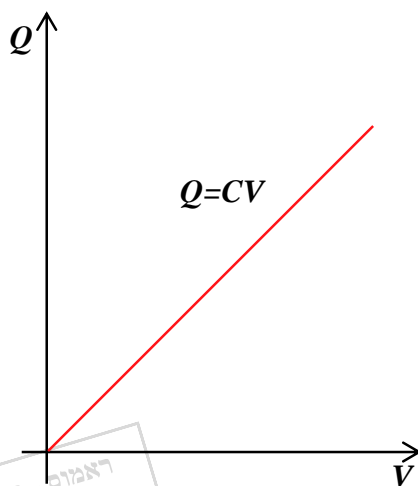
### ב. רקע תיאורטי

#### הקבל והקיבול של הקבל

הקבל הוא רכיב חשמלי המורכב משני מוליכים, אשר מפריד ביניהם חומר מבדד, המשמשים לאגירת מטענים חשמליים ובכך לאגירת אנרגיה חשמלית.

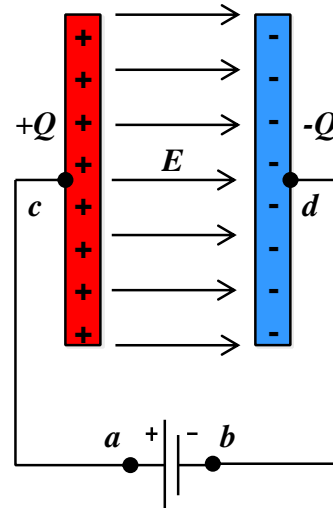
תהליך טעינת שני המוליכים המרכיבים את הקבל מתבצע על ידי חיבורם למקור מתח, כפי שמתואר באיור 1. חיבור זה גורם למעבר מטענים חשמליים (אלקטרונים) ממוליך אחד לאחר. האלקטרונים עוברים מהמוליך המחובר להדק החיובי של מקור המתח אל המוליך המחובר אל ההדק השלילי של מקור המתח. מעבר המטענים בין שני המוליכים נמשך עד לרגע שבו הפרש הפוטנציאלים בין שני המוליכים משתווה למתח המקור ( $\mathcal{E}$ ). במצב זה נפסק מעבר המטענים בין המוליכים, ושני המוליכים מתייצבים בערכי המטען הסופיים שלהם,  $+Q$  על הלוח המחובר להדק החיובי של מקור המתח ו- $-Q$  על הלוח המחובר להדק השלילי.

כאשר אומרים שהקבל טעון במטען  $Q$ , הכוונה היא שמוליך אחד טעון במטען  $+Q$  והאחר טעון במטען  $-Q$ . כמות המטען על שני המוליכים ביחד תמיד אפס.



ראמוס – ספרים וייעוץ  
www.ramose.co.il

איור 2: הקשר בין כמות המטען על הקבל ובין המתח המופעל עליו היא ליניארי



איור 1: טעינת הקבל מתבצעת על ידי מעבר מטען ממוליך אחד אל האחר דרך מקור המתח

כמות המטען הסופית,  $Q$ , על הקבל תלויה הן בתכונות הקבל עצמו והן במתח הטעינה ( $V$ ) שמקור המתח מספק. הניסויים מראים שהקשר בין כמות המטען  $Q$  על הקבל, ובין המתח  $V$  המופעל עליו הוא יחס ישר כפי שתואר באיור 2, כך שמתקיים:

$$(1) \quad Q \propto V$$

מקדם הפרופורציה בקשר האחרון מסומן באות  $C$  ונקרא "הקיבול של הקבל", (Capacity). לכן נקבל:

$$(2) \quad Q = CV$$

הקיבול  $C$  של הקבל מיוצג על ידי שיפוע הגרף המתואר באיור 2, אשר מתאר את המטען  $Q$  על הקבל כפונקציה של המתח  $V$  עליו. לפי זה נקבל:

$$(3) \quad C = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

מהקשר האחרון, נקבל:

**הקיבול  $C$  של הקבל מבטא את השינוי במטען על הקבל, הנוצר עקב שינוי המתח עליו ביחידת מתח אחת.**

מאחר שהגרף באיור 2 עובר דרך ראשית הצירים, אפשר לבטא את הקיבול (השיפוע) על ידי:

$$(4) \quad C = Q/V$$

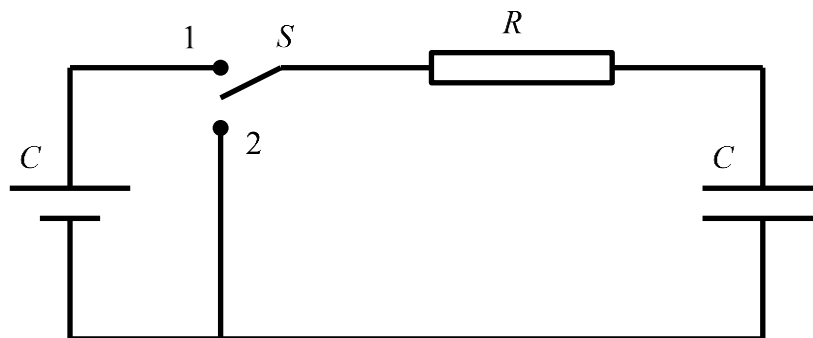
יחידת הקיבול היא  $C/V$ . יחידה זו נקראת **פאראד** ומסומנת ב-F.

$$(5) \quad 1F = 1C/1V$$

אם כן, קבל שקיבולו פאראד אחד הוא קבל אשר המטען עליו משתנה (גדל או קטן) בקולון אחד אם משנים (מגדילים או מקטינים) את המתח עליו בוולט אחד.

### תהליך הטעינה של הקבל

המעגל המתואר באיור 3 משמש לטעינה ולפריקה של הקבל. כאשר מעברים את מפסק למצב 1, הקבל נטען. לעומת זאת, כאשר מעבירים את המפסק למצב 2, מקור המתח יוצא מהמעגל, והמטען הנמצא על הקבל נפרק דרך הנגד.



איור 3

נניח שהקבל ריק, ובזמן  $t=0$  מעבירים את המפסק למצב 1, ולאחר זמן  $t$ , הזרם במעגל  $I(t)$  והמטען על הקבל ברגע זה  $Q(t)$ . על פי הכלל הראשון של קירכהוף מתקיים:

$$(6) \quad V_R(t) + V_C(t) = \varepsilon$$

$$(7) \quad \Rightarrow RI(t) + \frac{Q(t)}{C} = \varepsilon$$

מכיוון שמתקיים  $I(t) = Q'(t)$ , נקבל מהקשר האחרון:

$$(8) \quad \frac{Q(t)}{C} + RQ'(t) = \varepsilon$$

אפשר לרשום זאת גם באופן הבא:

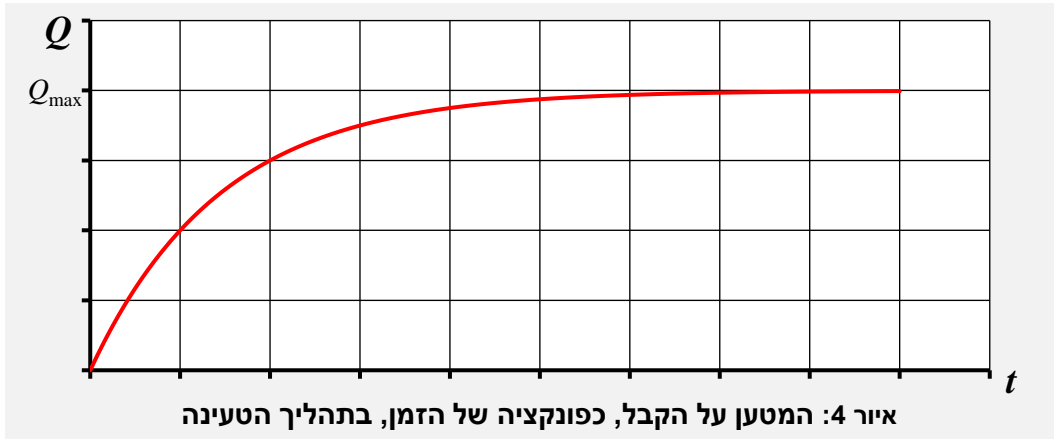
$$(9) \quad Q'(t) + \frac{1}{RC}Q(t) = \frac{\varepsilon}{R}$$

המשוואה האחרונה היא משוואה שהנעלם בה הוא פונקציה משתנה בזמן. משוואה כזאת נקראת

משוואה דיפרנציאלית, שכן היא מכילה גם את המשתנה  $Q(t)$  וגם הנגזרת שלו  $Q'(t)$ . הפונקציה  $Q(t)$  המקיימת את המשוואה הדיפרנציאלית (9) היא:

$$(10) \quad Q(t) = Q_{\max} (1 - e^{-t/RC})$$

כאשר  $Q_{\max} = C\varepsilon$  הוא המטען הסופי על הקבל לאחר סיום תהליך הטעינה. הגרף המתאר את הפונקציה הזו מוצג באיור 4.



#### המתח על הקבל בתהליך הטעינה

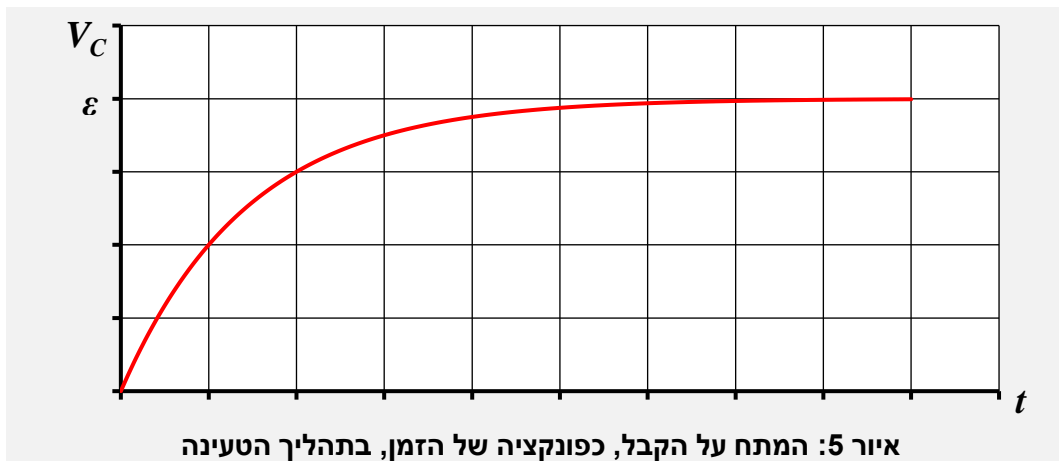
מאחר שהמתח על הקבל נתון על ידי  $V_C = Q/C$ , נקבל:

$$(11) \quad V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} = \frac{C\varepsilon}{C} (1 - e^{-t/RC})$$

כאשר הצבנו  $Q(t)$  ממשוואה (10). מהביטוי האחרון מקבלים:

$$(12) \quad V_C(t) = \varepsilon (1 - e^{-t/RC})$$

הגרף המתאר את הפונקציה הזו מוצג באיור הבא (5).



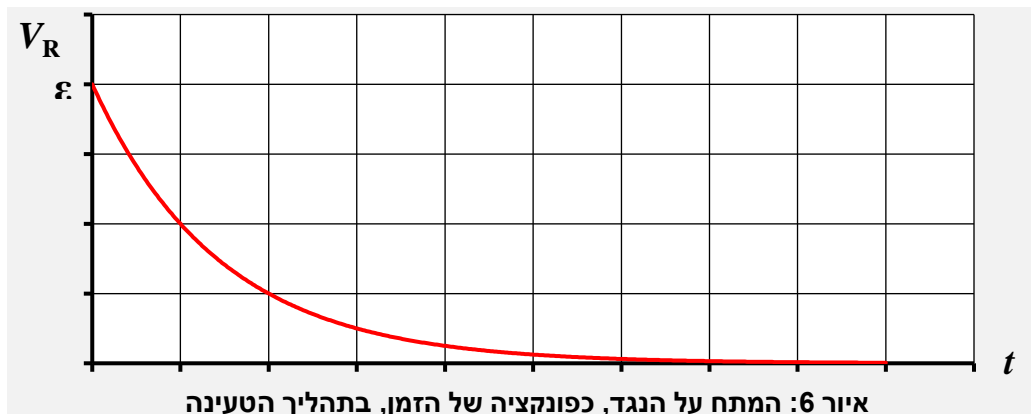
#### המתח על הנגד בתהליך הטעינה

מאחר שמתקיים:  $V_R + V_C = \varepsilon$ , נקבל:

$$(13) \quad V_R(t) = \varepsilon - V_C(t) = \varepsilon - \varepsilon (1 - e^{-t/RC})$$

$$(14) \quad V_R(t) = \varepsilon e^{-t/RC}$$

הגרף המתאר את המתח על הנגד כפונקציה של הזמן מתואר באיור 6.

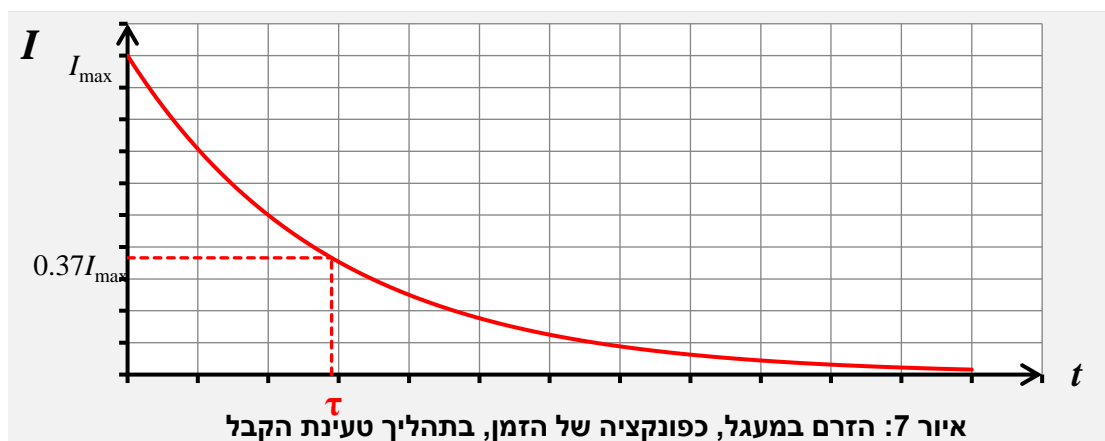


**הזרם במעגל בתהליך הטעינה**

אפשר לקבל את הזרם במעגל בתהליך הטעינה על ידי שימוש בחוק אוהם עבור הנגד:

$$(15) \quad I(t) = \frac{V_R(t)}{R} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-t/RC} = I_{\max} e^{-t/RC}$$

כאשר הצבנו את  $V_R(t)$  מהביטוי (14). הגרף המתאר את הפונקציה הזו מוצג באיור 7.



בגרף המתואר באיור 7, השטח הכלוא בין עקומת הזרם ובין ציר הזמן מבטא את המטען הכולל על הקבל בסוף תהליך הטעינה ( $Q_{\max}$ ).

לבסוף, נציין שלגודל  $RC$ , מכפלת ההתנגדות בקיבול, שמופיע בכל הביטויים עבור הטעינה, נמדד ביחידות זמן:

$$(16) \quad [RC] = [R][C] = \frac{V}{A} \frac{C}{V} = \frac{C}{A} = \frac{C}{C/s} = s$$

לכן גודל זה מייצג זמן הקשור לטעינה. מסמנים זמן זה ב- $\tau$  (מבטאים זאת "טאו").

$$(17) \quad \tau = RC$$

כדי להבין מהי המשמעות של זמן זה, נציב  $t = \tau$  במשוואה (15) ונקבל:

$$(18) \quad I(\tau) = I_{\max} e^{-\tau/RC} = \frac{I_{\max}}{e} = 0.37I_{\max}$$

לכן  $\tau$  מבטא את הזמן הדרוש לזרם הטעינה לרדת ל-37% מערכו המקסימלי. באיור 7 מוצג כיצד אפשר לקבוע את  $\tau$  מהגרף, וזה לפי השלבים הבאים:  
1. מחשבים את הגודל  $0.37I_{\max}$ .

2. מוצאים את הזמן עבורו  $I = 0.37I_{\max}$  (ראה איור 7).

$\tau$  הוא מדד להתמשכות תהליך הטעינה. ככל ש- $\tau$  גדול יותר תהליך הטעינה נמשך זמן רב יותר, וההפך. לכן  $\tau$  נקרא קבוע הזמן של הטעינה.

### פריקה של הקבל

כאשר מעבירים את המפסק, במעגל המוצג באיור 3, מקבלים מעגל פריקה של הקבל. במעגל זה מתקיים:

$$(19) \quad V_R(t) + V_C(t) = 0$$

כאשר:

$$(20) \quad V_R(t) = I(t)R$$

$$(21) \quad V_C = \frac{Q(t)}{C}$$

ניתן להראות שהמטען על הקבל בתהליך הפריקה נתון על ידי הביטוי הבא:

$$(22) \quad Q(t) = C\epsilon e^{-t/RC} = Q_{\max} e^{-t/RC}$$

כאשר  $Q_{\max} = C\epsilon$ . מהביטוי האחרון נקבל שהמתח על הקבל בתהליך הפריקה הוא:

$$(23) \quad V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} = \epsilon e^{-t/RC}$$

וממשוואה (19) נקבל:

$$(24) \quad V_R(t) = -\epsilon e^{-t/RC}$$

זרם הפריקה נתון על ידי:

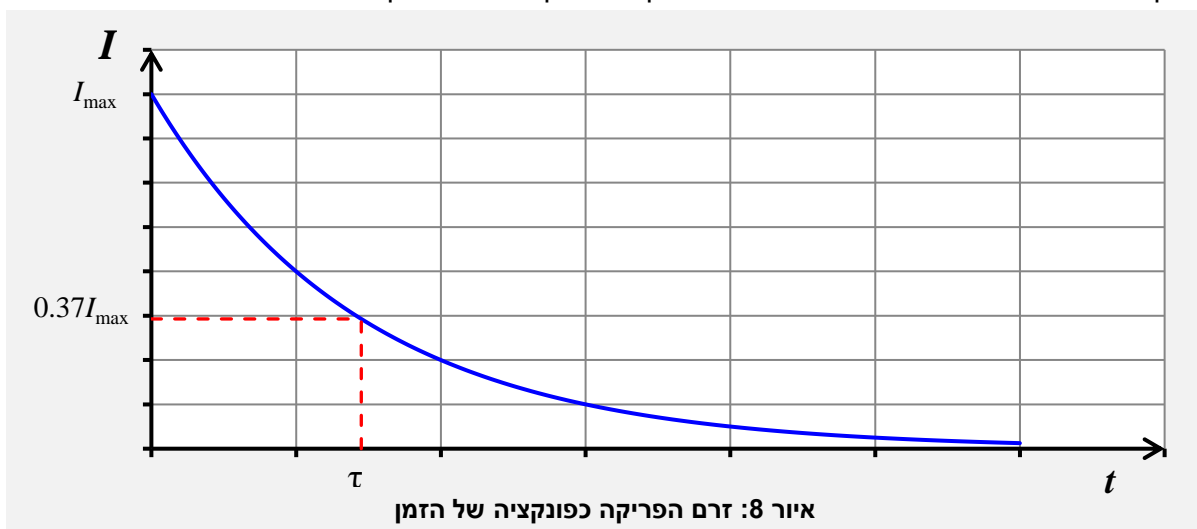
$$(25) \quad I(t) = \frac{V_R(t)}{R} = -\frac{\epsilon}{R} e^{-t/RC} = -I_{\max} e^{-t/RC}$$

כאשר  $I_{\max} = \epsilon / R$ .

גם כאן קבוע הזמן לפריקה ( $\tau = RC$ ), הוא הזמן הדרוש לזרם הפריקה להגיע ל-0.37 מערכו המקסימלי (ראה איור 14), כאשר:

$$(26) \quad I(\tau) = I_{\max} e^{-\tau/RC} = I_{\max} e^{-1} = 0.37I_{\max}$$

הגרף המתואר באיור 8 מתאר את זרם הפריקה כפונקציה של הזמן



**ג. מכשור וציוד**

(1) תיבת נגדים.



(2) תיבת קבלים.



(3) ספק מתח ישר.

(4) מפסק בשני מצבים.

(5) חיישנים למדידת מתח באמצעות Data logger או כל מערכת אחרת דומה.

**ד. הניסוי (בניית המערכת וביצוע המדידות)**

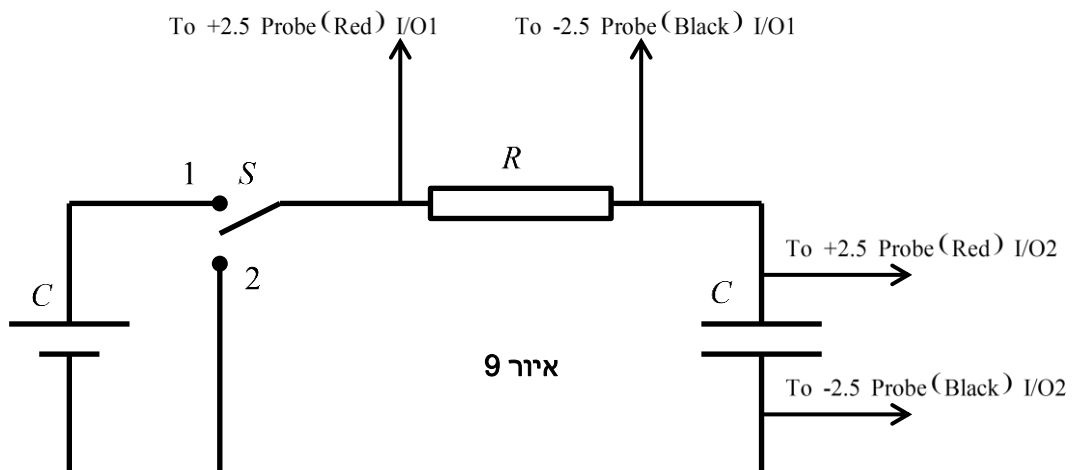
(1) בנה את המעגל המתואר באיור 9 שלהלן. בחר בתיבת הנגדים נגד של  $1000\Omega$  ובתיבת הקבלים קבל של  $1000\mu F$ .

(2) חבר שני חיישני מתח המחוברים למערכת המדידה הדיגיטלית, במקביל לנגד ולקבל (ראה איור 9).

(3) העבר את המפסק בהתחלה למצב 2 על מנת לוודא שהקבל ריק.

(4) הפעל את מערכת המדידה ולאחר מכן העבר את המפסק למצב 1. המערכת מודדת את המתחים על הקבל ועל הנגד כפונקציה של הזמן. המתן עד לטעינה מלאה של הקבל.

(5) לאחר שהקבל נטען במלואו, העבר את המפסק למצב 2 (כשהמערכת עדיין מודדת מתחים כפונקציה של הזמן). המתן עד שהקבל מתרוקן ולאחר מכן כבה את המערכת.



## ה. עיבוד וניתוח המדידות

### שלב ראשון: תהליך הטעינה

- (1) שרטט שני גרפים, הראשון מתאר את המתח על הנגד כפונקציה של הזמן והשני מתאר את המתח על הקבל כפונקציה של הזמן.
- (2) קבע באמצעות שני הגרפים את:
  - א. הכא"מ של מקור המתח.
  - ב. קבוע הזמן.
- (3) העזר בקשר  $I = V_R / R$ , והכן טבלה המתארת את זרם הטעינה  $I$  כפונקציה של הזמן  $t$ .
- (4) שרטט באמצעות הטבלה שהכנת גרף אשר מתאר את זרם הטעינה כפונקציה של הזמן.
- (5) מצא באמצעות הגרף ששרטטת את קבוע הזמן.
- (6) שרטט גרף המתאר את המתח על הקבל ( $V_C$ ) כפונקציה של המתח על הנגד ( $V_R$ ). הסבר את צורת הגרף וחשב באמצעותו את  $\varepsilon$ .

### שלב שני: תהליך הפריקה

- (1) שרטט שני גרפים, הראשון מתאר את המתח על הנגד כפונקציה של הזמן והשני מתאר את המתח על הקבל כפונקציה של הזמן.
- (2) העזר בקשר  $I = V_R / R$ , והכן טבלה המתארת את הזרם במעגל כפונקציה של הזמן.
- (3) שרטט באמצעות הטבלה שהכנת גרף אשר מתאר את זרם הפריקה כפונקציה של הזמן.
- (4) מצא באמצעות הגרף ששרטטת את קבוע הזמן.
- (5) שרטט גרף המתאר את המתח כל הקבל ( $V_C$ ) כפונקציה של המתח על הנגד ( $V_R$ ). הסבר את צורת הגרף וחשב באמצעותו את  $\varepsilon$ .



## ו. שאלות הכנה

- (1) הגדר קבל.
- (2) הגדר את הקיבול של קבל, וקבע מהי יחידת גודל זה והסבר מהי המשמעות הפיזיקלית של יחידה זו.
- (3) שרטט באותה מערכת צירים גרפים המתארים באופן איכותי את המתח על הקבל והמתח על הנגד כפונקציה של הזמן, בתהליך הטעינה.
- (4) שרטט גרף המתאר באופן איכותי את הזרם כפונקציה של הזמן, בתהליך הטעינה.
- (5) שרטט גרף המתאר באופן איכותי את המתח על הקבל ( $V_C$ ) כפונקציה של המתח על הנגד ( $V_R$ ), בתהליך הטעינה. קבע מה מייצג שיפוע גרף זה ומה מייצגות נקודות חיתוך הגרף עם הצירים.
- (6) שרטט באותה מערכת צירים גרפים המתארים באופן איכותי את המתח על הקבל והנגד כפונקציה של הזמן, בתהליך הפריקה.
- (7) שרטט גרף המתאר באופן איכותי את הזרם כפונקציה של הזמן, בתהליך הפריקה.
- (8) שרטט גרף המתאר באופן איכותי את המתח על הקבל ( $V_C$ ) כפונקציה של המתח על הנגד ( $V_R$ ), בתהליך הפריקה. קבע מה מייצג שיפוע גרף זה ומה מייצגות נקודות חיתוך הגרף עם הצירים.
- (9) הראה שהיחידות של הגודל  $RC$  הן זמן.