

מתודיקה

הכוח החשמלי בין לוחות קבל טעון - מחשבות וניסויים בעקבות שאלה בבחינת הבגרות

צבי גלר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

מבוא

השאלה הראשונה בפרק חשמל, בבחינת הבגרות האחרונה (פיסיקה לתלמידי 5 י"ל, קיץ תשס"א - ראה גם עמוד 56 בחוברת זאת) הייתה על האלקטרומטר של תומסון. לנוחיות הקוראים אנו מביאים כאן **שוב** את הנוסח המלא של השאלה.

A, ובמצב שבו המאזניים מאוזנים המרחק בין הלוחות הוא d (ראה תרשים). עם חיבור הגוף הטעון ללוח K הלוח נטען, והפוטנציאל שלו הוא V (כמו הפוטנציאל של הגוף הטעון). בטא באמצעות A, d, ו- ϵ_0 (על-פי הצורך) את:

(1) המטען על לוח L. (6 נקודות)

(2) השדה בין לוחות הקבל. (3 נקודות)

(3) השדה שנוצר על-ידי לוח K. (4 נקודות)

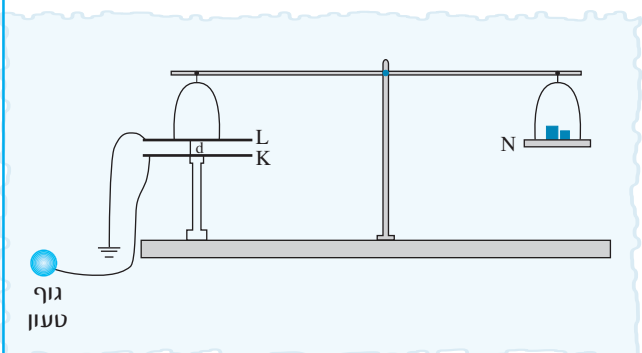
ג. הראה כי הכוח החשמלי הפועל על לוח L הוא:

$$\frac{\epsilon_0 \cdot A}{2} \cdot \left(\frac{V}{d}\right)^2 \quad (7 \text{ נקודות})$$

ד. בטא, באמצעות הגדלים שהשתמשת בהם עד כה ובאמצעות משקל המשקולות, mg, את הפוטנציאל

$$V \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^7 \quad (7 \text{ נקודות})$$

1. תלמיד רוצה למדוד פוטנציאל של גוף מוליך טעון באמצעות אלקטרומטר תומסון הבנוי כמאזניים רגישים (ראה תרשים).



לזרוע אחת של המאזניים מחובר לוח מוליך אופקי L, המוארק לאדמה (הפוטנציאל שלו אפס). לזרוע השנייה של המאזניים מחוברת כף N. במצב זה המאזניים מאוזנים.

כדי למדוד את פוטנציאל הגוף הטעון, התלמיד מחבר את הגוף ללוח מוליך אופקי K, באמצעות חוט מוליך ארוך ודק. כל חלקי המאזניים הם מבודדים, ורק הלוחות L ו-K הם מוליכים. במצב, שבו הגוף מחובר ללוח K, נוצר כוח משיכה בין הלוחות. כדי לשמור על איזון המאזניים התלמיד מוסיף משקולות לכף N (ראה תרשים).

א. הסבר מדוע לוח L נמשך ללוח K. (6 נקודות)

ב. לוחות L ו-K מהווים קבל לוחות. שטח כל לוח הוא

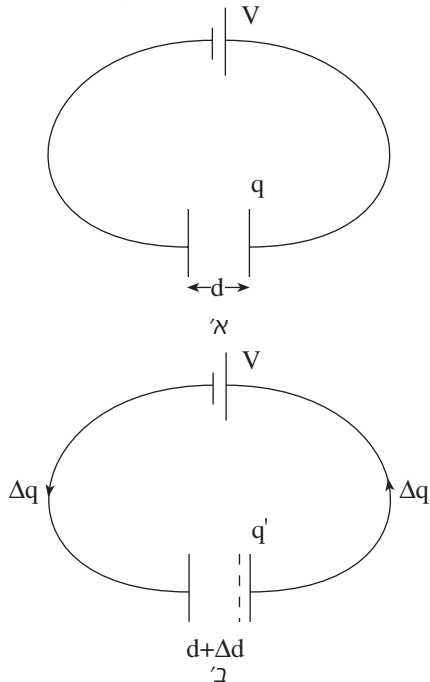
כידוע, האלקטרומטר של תומסון הוא מכשיר היכול למדוד הפרשי פוטנציאל חשמלי על ידי מדידת כוחות המשיכה שלוחות של קבל טעון מפעילים זה על זה (ראה **תרשים 1**). בימינו, העטורים בשכלולים טכנולוגיים, אין לאלקטרומטר של תומסון חשיבות מעשית רבה, כי הוא מסורבל ולא נוח להפעלה. עם זאת, הוא עדיין מכשיר בעל חשיבות עקרונית מסוימת, כי הוא משמש **למדידה "אבסולוטית" של מתחים**, כלומר הוא מאפשר לקבוע ערכים של מתח חשמלי על פי מדידה של גדלים מכניים בסיסיים כמו מסה, מרחק וזמן. לדעתי, לאלקטרומטר של תומסון יש גם ערך רב בהוראת הפיסיקה בבתי הספר התיכוניים, כי הוא מאפשר הבהרה והבנה טובה יותר של מושגים ונושאים מסוימים באלקטרוסטטיקה.

במאמר זה אנסה לבסס טענה זאת - בין היתר על ידי תיאור של ניסויים שביצעתי.

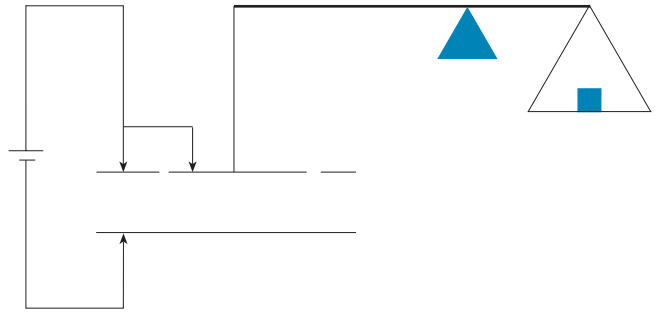
לדעתי מעניין וחשוב גם לקיים שלב נוסף בדיון התיאורטי שבו דנים בשאלה המתבקשת: "מהו כוח המשיכה הפועל בין לוחות קבל טעון במערכת בה מרחיקים את הלוחות זה מזה **מבלי לנתקם ממקור המתח?**" שלב זה בדרך כלל איננו מבוצע על ידי מורים רבים, וגם איננו מוזכר במרבית ספרי הלימוד שאני מכיר. התשובה לשאלה שהעלינו פשוטה וחשובה: ברור שעל ידי הגדלת המרחק בין לוחות הקבל מ- d ל- $d + \Delta d$ יקטן קיבולו מ- $C = \frac{\epsilon_0}{d} A$ ל- $C' = \frac{\epsilon_0}{d + \Delta d} A$. מכיוון שהפרש הפוטנציאלים V בין לוחות הקבל **לא השתנה**, יקטן המטען על הלוחות ונוכל לרשום:

$$q' = C' V = \left(\frac{\epsilon_0 A}{d + \Delta d} \right) V < \left(\frac{\epsilon_0 A}{d} \right) V = q$$

מכך נובע שהאנרגיה של הקבל פחתה, עובדה שעלולה להפתיע, כי הכוח החיצוני שהופעל והרחיק זה מזה את לוחות הקבל (כנגד כוח המשיכה שפעל ביניהם) ביצע עבודה על המערכת, ולכן האנרגיה שלה צריכה הייתה לגדול. ההסבר לסתירה מדומה זו נעוץ כמובן בכך שלא הבאנו בחשבון את העובדה שכתוצאה מהגדלת המרחק בין לוחות הקבל ב- Δd , המטען Δq שהועבר מלוח אחד של הקבל ללוח השני שלו עבר דרך מקור המתח בכיוון המתואר **בתרשים 2**. כתוצאה מכך סופקה אנרגיה בשיעור $V \Delta q$ למקור המתח.



תרשים 2: המעגל החשמלי המורכב מקבל ומקור מתח.
 א - לפני הזזת אחד הלוחות
 ב - אחרי הגדלת המרחק בין הלוחות



תרשים 1: תיאור סכמטי של אלקטרומטר תומסון

הרקע התיאורטי

תלמידים הלומדים אלקטרוסטטיקה ברמה של 4 או 5 י"ל אמורים לדעת כי על הלוחות של קבל טעון מצויים מטענים בעלי סימנים הפוכים, לכן לוחות אלה מושכים זה את זה. כדי לפתח נוסחה המבטאת את התלות בפרמטרים של כוח המשיכה הפועל בין הלוחות של קבל טעון, מניחים שמבצעים הרחקה אינפיניטסימלית של הלוחות, **אחרי שמנתקים אותם ממקור המתח**. בהרחקה כזאת כמות המטען של כל אחד מהלוחות אמורה להישאר קבועה, ואם מסתמכים על חוק שימור האנרגיה ועל כמה נוסחאות ידועות מהאלקטרוסטטיקה:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 A} = \frac{V}{d}, \quad U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}, \quad C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

מגיעים בקלות לנוסחה המבטאת את כוח המשיכה F הפועל בין לוחות הקבל הטעון:

$$F = \frac{1}{2} \frac{q^2}{\epsilon_0 A}$$

או, ברישום אחר אבל אקויוולנטי:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{AV^2}{d^2} = \frac{1}{2} qE$$

בשלב זה של הדיון התיאורטי, מן הראוי לשאול את התלמידים מדוע נוסחה אינטואיטיבית לגבי כוח המשיכה בין הלוחות, (כוונתי לנוסחה $F = qE$, הדומה לזו שפיתחנו אבל בלי המקדם $\frac{1}{2}$, ואשר בה E מייצג את עוצמת השדה החשמלי בין לוחות הקבל), **אינה נכונה**. התשובה לשאלה זאת יכולה להינתן ברמות שונות (ראה למשל את ההסבר של פיינמן¹) ואני חושב שכדאי להקדיש לה את הזמן המועט הדרוש להבאתה.

(גם אם הם לפעמים לא מדויקים ביותר) את הנכונות של המסקנות והנוסחאות שאליהן הגענו.

לגבי הנושא שבו אנו דנים רצוי במיוחד להראות בצורה משכנעת, ובאמצעות ציוד וכלים המצויים במרבית בתי הספר, כי בין לוחות קבל טעון פועל כוח משיכה שעוצמתו פרופורציונית לריבוע המתח שבין הלוחות, ובכך להראות כיצד מאזני תומסון משמשים **למדידה "אבסולוטית" של מתחים חשמליים**. במידת האפשר רצוי כמוכן להראות גם את תלות כוח המשיכה בין לוחות קבל טעון במרחק שביניהם, וכן את תלותו בשטח של כל אחד מהלוחות, כלומר להדגים את נכונות

הנוסחה $F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 AV^2}{d^2}$ שעליה מבוססת הפעולה של מאזני

תומסון. כדי לבצע משימות אלה השתמשתי במאזני triple beam של חברת Ohaus כמד כוח. מאזניים אלה הם בעלי כושר שקילה עד 600 גרם ורגישות של 0.1 גרם. כמקור מתח גבוה השתמשתי בספק EHT של חברת Unilab, שמתחו הישר המרבי הוא 5kV. שני לוחות אלומיניום עגולים בעלי רדיוס של 15 ס"מ כל אחד ושני לוחות דומים בעלי רדיוס של 10 ס"מ כל אחד, שימשו כלוחות קבל.

פרט לכך נזקקתי גם לציוד הבא:

- שני מתקני הרמה ("גי'קים")
- סטטיב עם אוזנים
- שלושה גלילי PVC אשר שימשו כבסיס מבודד ללוח הקבל שהונח עליהם
- מספר תילים מוליכים ארוכים
- מוט מוליך דק שכדור מוליך קטן מצוי בקצהו העליון (קצה התחתון של המוט היה תקוע בפקק גומי ששימש לו כבסיס מבודד).
- סרגל למדידת המרחק בין הלוחות.

בניית המערכת והפעלתה

הנחתי על כף המאזניים את גלילי ה-PVC ועליהם את אחד משני לוחות האלומיניום, ואיזנתי את המאזניים על ידי הזזת מתאימות של המשקולות הניידות. לוח האלומיניום השני הוחזק בצורה אופקית **קבועה** ובגובה מתאים על ידי הסטטיב והאוזנים.

בעזרת מתקן הרמה הרמתי את המאזניים המאוזנים עד שלוח האלומיניום התחתון, המונח עליהם, נמצא במרחק רצוי ומדוד d בדיוק מתחת ללוח האלומיניום העליון ובמקביל לו, באופן שנוצר קבל לוחות שלגביו ניתן היה לבצע את המדידות הדרושות.

עתה, אם בודקים את מאזן האנרגיה במערכת, ניתן להראות בעזרת חישובים פשוטים למדי שאותם יוכלו לבצע, כך אני מקווה, גם חלק מהתלמידים, שהאנרגיה $F\Delta d$ שסופקה למערכת על ידי הכוח F שווה להפרש בין האנרגיה שסופקה למקור המתח לבין האנרגיה שהקבל הפסיד כתוצאה מהגדלת המרחק בין לוחותיו, כפי שאמנם ניתן היה לצפות מחוק שימור האנרגיה.

שימור האנרגיה במעגל שבו מצויים מקור מתח וקבל שלוחותיו הורחקו זה מזה

כאשר מגדילים ב- Δd את המרחק בין לוחות קבל המחובר למקור מתח V, מועבר מטען Δq מלוח אחד של הקבל ללוח השני, והעברה זו מתבצעת דרך מקור המתח (ראה תרשים 2). כתוצאה מכך נוצר שינוי אנרגיה ΔU_C בקבל, כאשר:

$$\Delta U_C = \frac{1}{2} (C' V^2 - CV^2) = \frac{1}{2} V^2 \left[\left(\frac{\epsilon_0 A}{d + \Delta d} \right) - \frac{\epsilon_0 A}{d} \right] \approx - \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\epsilon_0 AV^2}{d^2} \right) \Delta d < 0$$

בו בזמן מוענקת למקור המתח אנרגיה ΔU_V ומתקיים:

$$\Delta U_V = \Delta q V = (q - q') V = (CV - C'V) V = \left[\left(\frac{\epsilon_0 A}{d} \right) - \left(\frac{\epsilon_0 A}{d + \Delta d} \right) \right] V^2 \approx \left(\frac{\epsilon_0 AV^2}{d^2} \right) \Delta d > 0$$

כל זה נעשה על חשבון העבודה $F\Delta d$ שבוצעה על ידי הכוח החיצוני אשר הרחיק את לוחות הקבל, ומתקיים הקשר:

$$\Delta U_V + \Delta U_C = \left(\frac{\epsilon_0 AV^2}{d^2} \right) \Delta d - \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0 AV^2}{d^2} \right) \Delta d = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0 AV^2}{d^2} \right) \Delta d = F\Delta d$$

כלומר, במערכת הקבל ומקור המתח שינוי האנרגיה של המערכת שווה לעבודת הכוח החיצוני שפעל עליה, כמתחייב מחוק שימור האנרגיה, ונוסחת כוח המשיכה בין לוחות הקבל שווה בשני המקרים: כאשר מטען הקבל קבוע, וכאשר המתח בין לוחות הקבל קבוע.

ניסויים פשוטים להדגמה ולמדידה של כוח המשיכה הפועל בין לוחות קבל טעון

אחרי שמקיימים עם התלמידים את הדיון התיאורטי, שבעקבותיו מגיעים לצורות השונות של נוסחת כוח המשיכה הפועל בין לוחות קבל טעון, חשוב להדגים בניסויים פשוטים

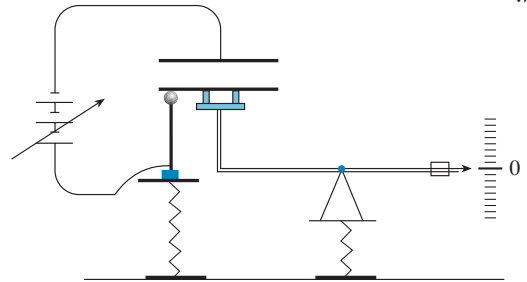
במצב זה, אם מפעילים באמצעות מקור המתח הגבוה אפילו מתח נמוך יחסית בין לוחות הקבל, הלוחות נטענים במטענים בעלי סימנים הפוכים ומושכים זה את זה; הלוח התחתון של הקבל מתחיל להתרומם ולנוע לעבר הלוח העליון, ולכן המעגל החשמלי של הקבל ומקור המתח הגבוה נפתח. מכיוון שבאוויר קיימת תמיד לחות מסוימת, נוצרת דליפה של מטענים מלוחות הקבל הטעון. כוח המשיכה החשמלי בין הלוחות קטן, והלוח התחתון של הקבל חוזר ויורד עד שהוא נוגע שוב נגיעה קלה בכדור המוליך. המעגל המורכב מהקבל וממקור המתח הגבוה נסגר והקבל נטען מחדש, הלוח התחתון מתרומם, המעגל נפתח שוב וחוזר חלילה. תופעה זו מתבטאת בתנודות קלות מעלה ומטה של הלוח התחתון. אשר תיפסקנה כאשר המתח בין הלוחות יתאפס; במצב זה מתחילים לבצע את המדידות בניסוי.

ניסויים ותוצאות

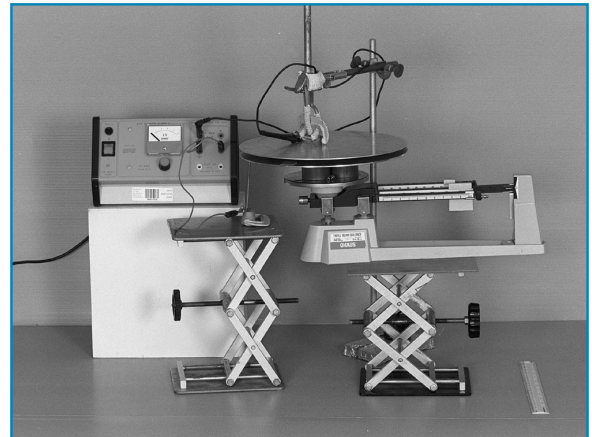
על סמך מה שנאמר בסעיף הקודם אפשר להבין את הפעולות ואת המדידות שיש לבצע במערכת שבנינו. מבנה המערכת הוא כזה שאם **נקטין** את הכוח שהמאזניים מפעילים על הגופים הנמצאים על כף המאזניים, על ידי הזזה מתאימה שמאלה של משקולת ניידת, יופר שיווי המשקל של המאזניים אבל **מחוג המאזניים לא יסטה מנקודת האפס**, מכיוון שהכף הנושאת את גלילי ה-PVC ואת לוח הקבל המונח עליהם אינה יכולה לרדת (כי המוט המוליך הדק עם הכדור המוליך בקדקודו תומך בה ועוצר אותה מלמטה). לעומת זאת נוכל לגרום לכך שכף המאזניים תעלה אם נפעיל על לוח הקבל התחתון כוח המכוון כלפי מעלה, שעוצמתו שווה, או ביתר דיוק גדולה במקצת, **מפחת הכוח המאזן את המאזניים** שנגרם על ידי ההזזה של המשקולת הניידת. **כוח זה, המבטל את פחת הכוח המאזן, הוא כוח המשיכה החשמלי בין לוחות הקבל שנגרם על ידי הפעלת מתח חשמלי ביניהם.**

המדידות במערכת שתיארתי היו פשוטות ונוחות יחסית לביצוע. אחרי שמדדתי את המרחק d בין הלוחות המקבילים של הקבל, הזזתי את המשקולת הניידת הקטנה של המאזניים שמאלה, ועל ידי כך הקטנתי במידה מדודה את הכוח שהמאזניים מפעילים על הגופים הנמצאים על כף המאזניים. אחרי כל הקטנה כזאת של "כוח המאזניים" הפעלתי את הספק והעליתי בהדרגה את המתח שלו עד שכוח המשיכה החשמלי בין לוחות הקבל גרם לכך שהלוח התחתון של הקבל ניתק מהכדור המוליך התומך בו מלמטה, והתחיל להתרומם (יחד עם כף המאזניים והגופים האחרים המונחים עליה) ולנוע

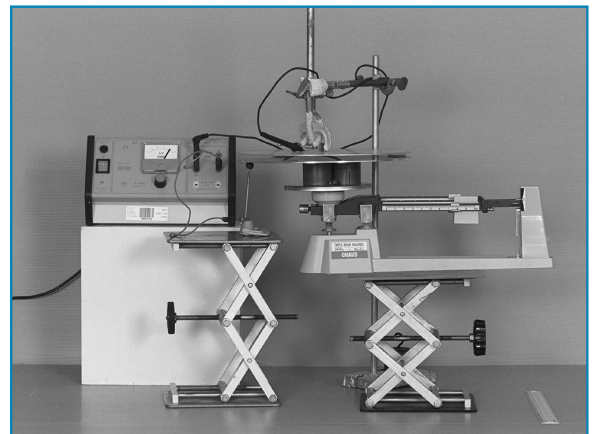
כדי לחבר קבל זה למקור המתח הגבוה העליתי, באמצעות מתקן ההרמה השני, את המוט המוליך הדק כך שהכדור המוליך בקצהו העליון, שהיה מחובר להדק החיובי המוגן של מקור המתח, נגע **קלות** בלוח התחתון של הקבל, מבלי להפר את שיווי המשקל ואת האיזון של המאזניים (ראה **תרשימים 3, 4 ו-5**). הלוח העליון, הקבוע, של הקבל חובר באמצעות תיל מוליך ארוך להדק השלילי המוארק של מקור המתח.



תרשים 3: תיאור סכמטי של המערכת שבה השתמשתי.



תרשים 4: תצלום המערכת לפני הפעלתה.



תרשים 5: תצלום המערכת מיד לאחר הפעלתה: הלוח התחתון (הנייד) של הקבל נמשך כלפי מעלה ומחוג המאזניים ירד מתחת לנקודת האפס.

לעבר הלוח העליון, הקבוע, של הקבל. דליפת המטענים מלוחות הקבל, שגורמת, כאמור, להופעת תנודות של לוח הקבל התחתון אחרי שהתחיל להתרומם, רק מסייעת לקבוע ביתר דיוק מהו המתח שבו מתחיל להתרחש התהליך כולו. להלן הטבלאות המסכמות את תוצאות הניסויים והמדידות שביצעת, והתיאורים הגרפיים המתאימים. הפחת בכוח המאזן את המאזניים, F, נרשם ביחידות של גרמים, והמתח V בין לוחות הקבל, היוצר את הכוח החשמלי המחזיר את איוון המאזניים, נרשם בקילוולטים. ברור שלביצוע החישובים על התלמידים לעבור ליחידות SI המקובלות והידועות להם. במערכת שבנית ביצעת שלושה ניסויים: בראשון ובשני היו לוחות הקבל לוחות אלומיניום העגולים שקוטר כל אחד מהם 30 ס"מ, ובניסוי השלישי השתמשתי בלוחות אלומיניום עגולים וקטנים יותר, שקוטר כל אחד מהם היה 20 ס"מ בלבד.

סיכום תוצאות הניסוי הראשון

סיכום תוצאות הניסוי השני

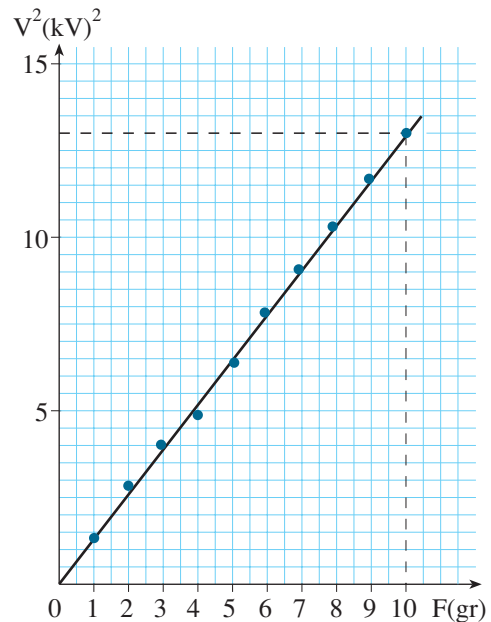
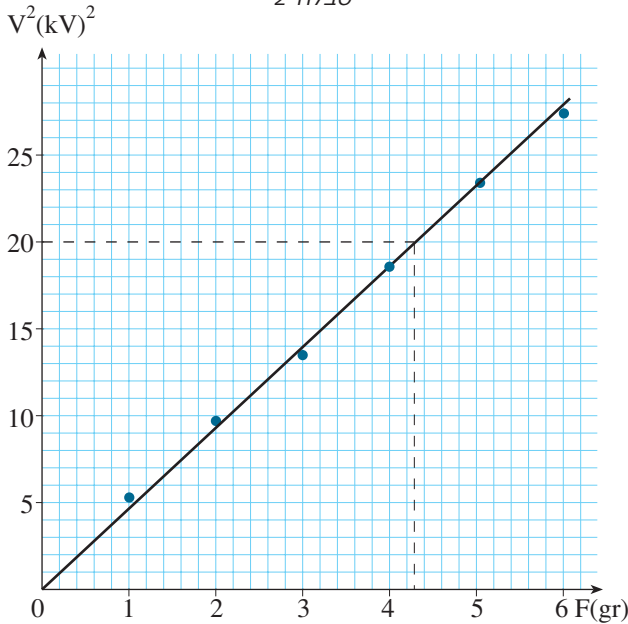
$d_2 = 12\text{mm}$; $A_2 = \pi R_2^2 = \pi R_1^2 = 707\text{cm}^2$; $2R_2 = 30\text{cm} = 2R_1$; $A_1 = 707\text{cm}^2$; שטח כל לוח $2R_1 = 30\text{cm}$ (קוטר הלוחות) ; $d_1 = 6\text{mm}$ (המרחק בין הלוחות).

F(gr)	1	2	3	4	5	6
V(kV)	2.3	3.1	3.7	4.3	4.8	5.2
V ² (kV) ²	5.3	9.6	13.7	18.5	23.0	27.0

F(gr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V(kV)	1.2	1.7	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
V ² (kV) ²	1.4	2.9	4.0	4.8	6.3	7.8	9.0	10.2	11.6	13.0

טבלה 2

טבלה 1



תרשים ב' : הגרף המתאר את תוצאות הניסוי השני.

תרשים א' : הגרף המתאר את תוצאות הניסוי הראשון.

סיכום תוצאות הניסוי השלישי

בניסוי זה השתמשתי בלוחות אלומיניום עגולים קטנים יותר. המרחק בין הלוחות היה כמו בניסוי הראשון.

$d_3 = 6\text{mm} = d_1$; $A_3 = \pi R_3^2 = 314\text{cm}^2$; $2R_3 = 20\text{cm}$

F(gr)	1	2	3	4	5	6	7
V(kV)	1.8	2.6	3.1	3.5	3.9	4.3	4.6
V ² (kV) ²	3.2	6.8	9.6	12.3	15.2	18.5	21.2

טבלה 3

מסקנות והערות

בדיקת התוצאות של שלושת הניסויים שביצעתי מראה בצורה ברורה ומשכנעת כי הכוח הפועל בין הלוחות של קבל טעון נמצא ביחס ישר לריבוע המתח שבין הלוחות; מתוצאות הניסויים הראשון והשני אפשר גם ללמוד על התלות של כוח זה במרחק בין הלוחות, ומתוצאות הניסויים השני והשלישי על תלות הכוח בשטח הלוחות. אף על פי שתוצאות הניסויים שביצעתי היו טובות מאוד ועלו בהרבה על הציפיות, אסור להתעלם מן העובדה שלמעשה, בתוצאות אלה קיימת **אי התאמה** מסוימת בין הערכים המספריים של **הגדלים שנמדדו בניסויים**, ובין הערכים המספריים של **אותם גדלים, אם מחשבים אותם על פי נוסחאות תיאורטיות ידועות**. למשל בניסוי הראשון (ראה תרשים 6א) אם בודקים על פי הגרף את הערך המדוד של ריבוע המתח בין לוחות הקבל אשר גורם לכך שבין הלוחות ייווצר כוח משיכה שעוצמתו, לדוגמה, הוא 5 גרם מגלים כי:

$$V^2 = 6.3 \cdot 10^6 (\text{volt})^2$$

$$V = 2.51 \cdot 10^3 \text{ volt}$$

לעומת זאת, אם מסתמכים על הנוסחה $F = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2d^2}$ הערך

"המחושב" של ריבוע המתח יהיה:

$$V^2 = \frac{2Fd^2}{\epsilon_0 A} \approx 2 \cdot \frac{(5 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81) \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2}{(8.85 \cdot 10^{-12}) \cdot (7.07 \cdot 10^{-2})} \approx$$

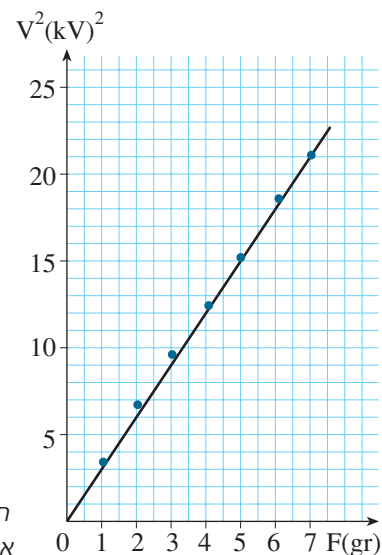
$$\approx 5.6 \cdot 10^6 (\text{volt})^2$$

ולכן "הערך המחושב" של המתח יהיה:

$$V = \sqrt{5.6 \cdot 10^6} = 2.37 \cdot 10^3 \text{ volt}$$

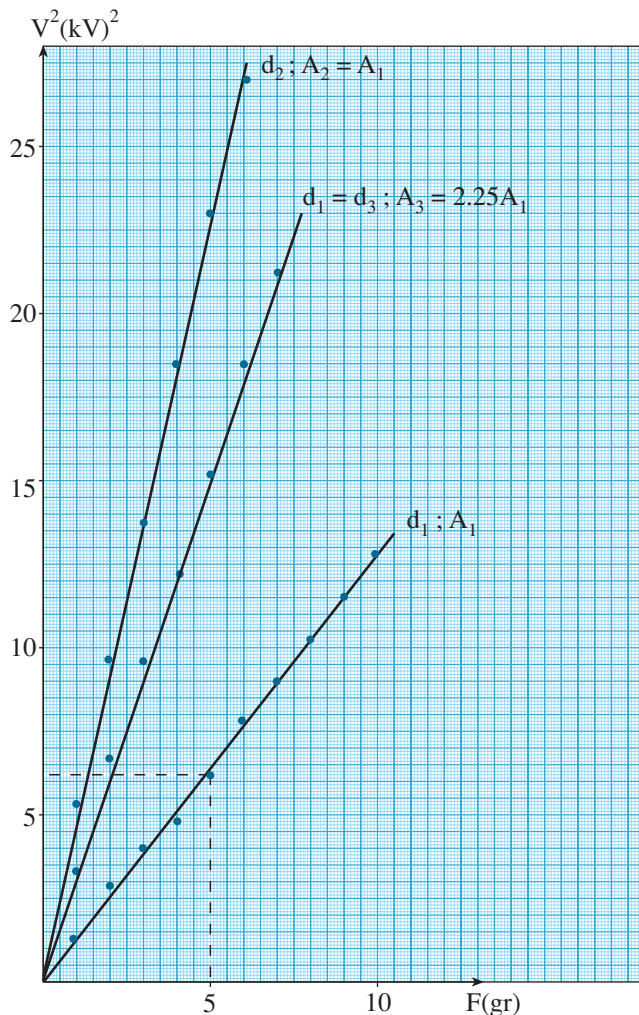
מתברר אפוא שהמתח "המדוד" שצריכים להפעיל בניסוי כדי לגרום לכך שכוח המשיכה בין לוחות הקבל יהיה 5 גרם, גדול ב-6% בערך מהמתח "המחושב", הדרוש לביצוע אותה פעולה. מבדיקת תוצאות שני הניסויים האחרים שביצעתי מתברר כי אי התאמות דומות, מסדר גודל של עד 10% בערך, קיימות גם בניסויים אלה.

מעניין וחשוב לציין שבכל הניסויים שביצעתי, המתח "המדוד" גבוה תמיד מ"המתח המחושב". ההסבר לכך קשור כנראה עם העובדה שבכל הניסויים והמדידות שערכתי קיימת **שגיאה שיטתית**: במערכת שבה השתמשתי לא הייתה "טבעת מגן" סביב הלוח הנייד של הקבל, טבעת שתפקידה לגרום לכך שהשדה החשמלי בין לוחות הקבל יהיה אחיד בכל התחום שבין הלוחות². במאזני תומסון המקוריים קיימת טבעת כזאת. לדעתי אפשר, וגם רצוי, לשאול את התלמידים:



תרשים 6א: הגרף המתאר את תוצאות הניסוי השלישי.

בתרשים 7 מובאים שלושת הגרפים באותה מערכת צירים, כדי להקל על הסקת מסקנות מהניסויים שבוצעו.



תרשים 7: שלושת הגרפים על אותה מערכת צירים.

מדוע אי-קיום טבעת המגן במערכת גורם לכך שבניסויים כמו אלה שביצענו, "המתח המדוד" יהיה תמיד גדול מ"המתח המחושב"?

בכלל, חשוב מאוד, לדעתי, להגביר את מעורבות התלמידים בתכנון הניסויים ובהסקת המסקנות מהם - בין היתר על ידי שאלות מעוררות עניין המופנות אליהם. כך, למשל, כדאי לשאול אותם:

* מדוע במערכת שלנו ניתן לבצע בדיקות לקביעת הקשר $V(F)$, ולא בדיקות לקביעת הקשר הנראה טבעי ומעניין יותר של $F(V)$?

* מדוע תקענו בראש המוט הדק, היוצר את הקשר המוליך בין לוח הקבל הנייד ובין ההדק החיובי של מקור המתח הגבוה, כדור מוליך קטן?

* וכן, האם מערכת כמו זו שבנינו יכולה לשמש לא רק למדידת מתחים ישירים גבוהים, אלא גם למדידת מתחי חילופין גבוהים?

נקווה ששאלות אלה תעוררנה את קוראי המאמר להתייחס לנשאל ולשתף בתגובתם גם את קוראי העיתון.

לבסוף חייבים כמובן להעיר כי פרט לשגיאה השיטתית בביצוע הניסויים שתיארתי, הנובעת מאי הכללת טבעות מגן במערכת הקבל, קיימים במדידות שערכתי גם אי דיוקים "רגילים", הקשורים עם המגבלות של מכשירי המדידה שבהם השתמשתי, בעיקר לגבי מדידת המרחק בין לוחות הקבל,

שנעשתה באמצעים פשוטים כמו סרגל, שאיננו מסוגל לדייק כשמדובר במדידת מרחקים מסדר גודל של מילימטרים, ובמדידת המתח, שבוצעה באמצעות מד המתח של מקור המתח שבו השתמשתי, אשר מאפשר מדידת מתחים גבוהים ברגישות של ± 200 וולט בלבד, כך, שבחלק מהמדידות נאלצתי להעריך את המתח המופעל על ידי הספק בשיטת האינטרפולציה, שכמובן איננה יכולה להיות מדויקת.

סיכום

הכוח החשמלי הפועל בין הלוחות של קבל טעון לא היה עד כה נושא מרכזי חשוב בתכנית לימודי הפיסיקה בביה"ס התיכון. אולם עתה, אחרי הופעת השאלה המצוטטת בבחינת הבגרות האחרונה, קיים סיכוי טוב שהוא יזכה לתשומת הלב ולטיפול שהוא ראוי להם. אני מקווה שגם מאמר זה יוכל לתרום לכך במידה מסוימת.

מראי מקום

1. Feynman, R.P., Leighton, R.B., and Sands, M., Lectures on Physics Vol. II 8-2 1964
2. Carlson, G.T. and Illman, B.L., The Circular Disk Parallel Plate Capacitor, Am. J. of Physics, **62** (12), 1994.

לקריאה נוספת

A Modern Kelvin Balance for Undergraduate Experimentation, Rockfeller A. and Graf, E.H., The Physics Teacher Vol. 38 May 2000.