הפיקוח על הוראת הפיזיקה



מדינת ישראל
משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' למדעים
הפיקוח על הוראת הפיזיקה

הפיקוח על הוראת הפיזיקה



דגם תשובות בגרות בפיזיקה תשפ"ו

מכניקה, חשמל ומעבדת חקר

כתיבה ועריכה:

ד"ר יהונתן וייט

ד"ר אריאל אברשקין

ליהי תלם – מרגלית

בכתיבת המסמך סייעו המדריכים מטעם הפיקוח על הוראת הפיזיקה

מסמך זה מציג "פתרון מורה" לבחינות הבגרות בפיזיקה בשנת תשפ"ו: מכניקה (036361), חשמל ומגנטיות (036371) ומעבדת חקר (036386), בתוספת דגשים דידקטיים להוראה בכיתה.
התשובות לשאלות הינן בהיקף ורמת העמקה התואמים להוראה ודיון בכיתה ומהווים דגם של פתרון מלא על כל השלבים להם נדרשים התלמידים בבחינות הבגרות.

תוכן עניינים

מכניקה 3
שאלה 1 3
שאלה 2 7
שאלה 3 10
שאלה 4 13
שאלה 5 16
שאלה 6 19
חשמל ומגנטיות 22
שאלה 1 22
שאלה 2 27
שאלה 3 29
שאלה 4 33
שאלה 5 35
שאלה 6 38
מעבדת חקר 40
חלק א: מציאת הערך של תאוצת הנפילה החופשית g באמצעות מטוטלת 40
חלק ב: שאלות מניסויי החובה 48
נספח א: הצעה לפעילות חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי 53

מכניקה

שאלה 1

<u>סעיף א</u>

את מהירות הגוף ברגע $t = 0.08s$ נמצא בעזרת מיקום הגוף ברגע $t = 0.04s$ וברגע $t = 0.12s$ (שיטת "נקודה לפני, נקודה אחרי"):

$$v = \frac{dy}{dt} = \frac{0.29 - 0.11}{0.12 - 0.04} = \frac{0.18}{0.08} = 2.25\frac{m}{s}$$

<u>דגשים דידקטיים:</u>

(1) ישנן שתי הצדקות מרכזיות לאופן חישוב זה עבור המהירות הרגעית: (I) המהירות הרגעית היא נגזרת של פונקציית מקום-זמן, היות וישנו סט מדידות בדיד של מיקומים במרווחי זמן שווים וקצרים, לא ניתן לחשב את הנגזרת באופן מדויק אך כן מתאפשר להעריך אותה בדרך זו בקירוב טוב. אופן חישוב זה למעשה מחשב את המהירות <u>הממוצעת</u> בפרק הזמן dt; (II) בהנחה שתאוצת הגוף קבועה – מהירות ממוצעת זו היא <u>בדיוק</u> המהירות הרגעית באמצע פרק הזמן dt. וגם אם התאוצה לא קבועה – עבור פרקי זמן קצרים מספיק, המהירות הממוצעת היא אומדן טוב למהירות הרגעית. אנו ממליצים להדגיש לתלמידים שתי הצדקות אלה, משום שהן עשויות לסייע להם להתמודד עם קשיים מרכזיים באופן החישוב: (א) חישוב באמצעות הרגע המבוקש ($t = 0.08s$) ונקודה אחת לפניו <u>או</u> אחריו ($t = 0.04s$ <u>או</u> $t = 0.12s$). זהו לא אומדן טוב למהירות הרגעית בנקודה המבוקשת מאחר והיא נקודת קצה בכל אחד מן קטעי הזמן; (ב) חישוב באמצעות היחס בין מיקום וזמן $\frac{y}{t}$ ולא באמצעות הפרשים. זוהי למעשה המהירות הממוצעת מתחילת התנועה, וכמובן שאינה אומדן למהירות הרגעית.

(2) חשוב להדגיש כי הוראה של חישוב אופרטיבי למהירות רגעית כפי שבא לידי ביטוי בשאלה זו הוא חלק אינטגרלי <u>מתוכנית הלימודים בפיזיקה</u>, ואינו נלמד רק בהקשר של ניסויי מעבדה.

(3) ניתן למצוא סרטון הסבר ותרגילים, <u>בקורס "הכנה לבגרות בפיזיקה - מכניקה" ב-CampusIL</u>, פרק 1.3.3 "מהירות רגעית", לצורך ההוראה של מיומנות זו.

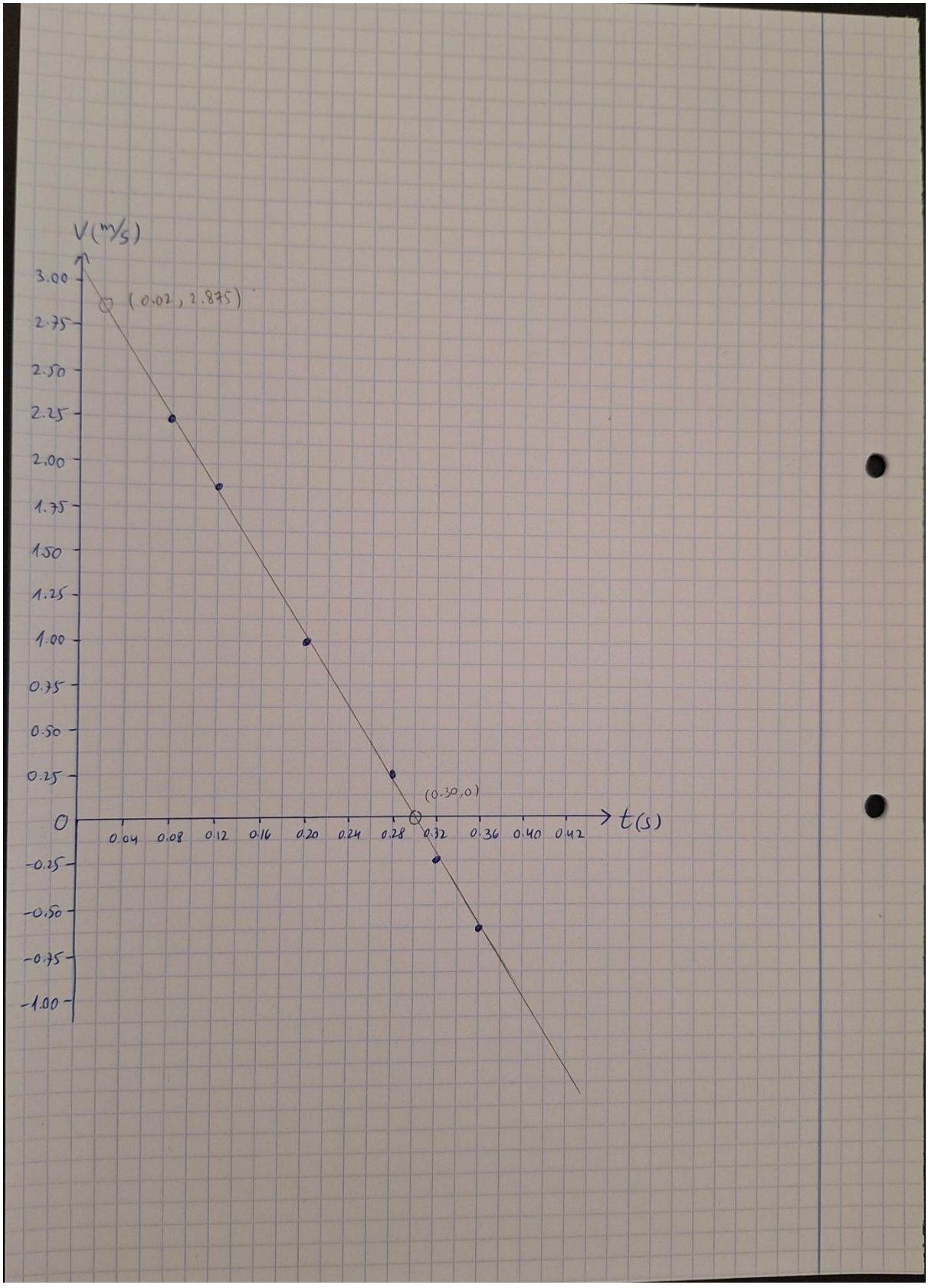
<u>סעיף ב</u>

החישוב בוצע באופן דומה לזה שבסעיף א'.

$\boldsymbol{t\ (s)}$	0.08	0.12	0.20	0.28	0.32	0.36
$\boldsymbol{v\ (m/s)}$	2.250	1.875	1.000	0.250	−0.250	−0.625

<u>דגש דידקטי:</u> היות שקצב הצילום הוא 25 תמונות בשנייה (הזמן בין עקבות הוא $0.04s$) והדיוק במדידת המיקום הוא של סנטימטרים, המשמעות היא שאי-הוודאות במהירות היא $\delta v = 0.125\frac{m}{s}$. למעשה, כל תוצאת חישוב של המהירות חייבת להיות כפולה שלמה של $0.125\frac{m}{s}$ וניתן לראות בטבלה שאכן זה המצב (כי כל סנטימטר בהעתק מוביל למהירות מחושבת של $0.125\frac{m}{s}$). זו הסיבה מדוע בחרנו להציג את המהירות ברמת דיוק של 3 ספרות אחרי הנקודה. היות וזוהי תוצאת החישוב, והדבר עשוי להוות תשתית לבחירת קנה המידה בסרטוט הגרף בהמשך. אנו ממליצים למורים להעלות בכיתותיהם את השאלה "כמה ספרות משמעותיות יש (או כדאי) לכתוב?" ולנהל דיון סביב שאלה זו, ולהדגיש לתלמידיהם את החשיבות שבניהול דיון שכזה בכל הצגה של תוצאות ניסוי, ובמיוחד בהצגת תוצאות ניסוי שבוצע בפועל בכיתה.

סעיף ג


V(m/s)
3.00
2.75
2.50
2.25
2.00
1.75
1.50
1.25
1.00
0.75
0.50
0.25
0
-0.25
-0.50
-0.75
-1.00
(0.02, 2.875)
(0.30, 0)
t(s)
0.04
0.08
0.12
0.16
0.20
0.24
0.28
0.32
0.36
0.40
0.42

סעיף ד

נמצא את משוואת קו המגמה באמצעות שתי נקודות מקו המגמה: $(0.32\,,0)$ ו- $(0.02\,,2.875)$:

$$A=\frac{0-2.875}{0.32-0.02}=-\frac{2.875}{0.3}=-9.58\frac{m}{s^2}$$

הערה: בהתאם לגרף ששרטטו העונים עשויות להתקבל תוצאות שונות מעט בחישוב השיפוע. כל תשובה בתחום $-11.5\frac{m}{s^2}\le A\le -9.1\frac{m}{s^2}$ תתקבל כנכונה, ובהתאם לכך כל החישובים בסעיף זה ובסעיפים הבאים העושים שימוש בתוצאה זו.

את נקודת החיתוך עם הציר האנכי נמצא על ידי משוואת הישר (שיפוע ונקודה על הישר):

$$y=mx+b\ \ \rightarrow\ \ b=y-mx=0-(-9.58)\cdot 0.32=3.067\frac{m}{s}$$

(1) המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך עם הציר האנכי היא גודל מהירות הניתור של הכדור מן השולחן (המהירות ההתחלתית). ולכן:

$$v_0=3.067\frac{m}{s}$$

משמעות הסימן החיובי היא שמהירות הכדור מכוונת כלפי מעלה.

(2) המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא תאוצת הכדור, ולכן:

$$a=-9.58\frac{m}{s^2}$$

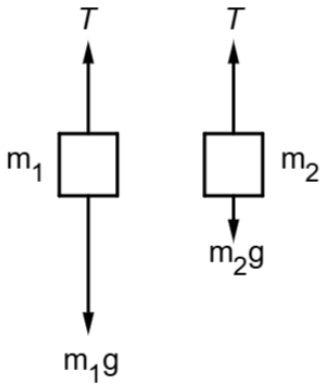
משמעות הסימן השלילי היא שתאוצת הכדור מכוונת כלפי מטה.

סעיף ה

תשובה: גרף 1.

נימוק: כאשר הגוף נע כלפי מעלה, כלומר מהירותו חיובית, התנגדות האוויר מכוונת כלפי מטה. לכן, פועלים על הגוף שני כוחות כלפי מטה, והתאוצה מושפעת מסכום כוחות אלה ע"פ החוק השני של ניוטון. לעומת זאת, כאשר הגוף נע כלפי מטה, כלומר מהירותו שלילית, התנגדות האוויר מכוונת כלפי מעלה. לכן, פועלים על הגוף כוחות בכיוונים מנוגדים, והתאוצה מושפעת מהפרש כוחות אלה ע"פ החוק השני של ניוטון. המשמעות היא שגודל תאוצת הגוף בעלייה, כלומר כאשר המהירות חיובית, גדולה מגודל תאוצת הגוף בירידה, כלומר כאשר המהירות שלילית. תאוצה באה לידי ביטוי כשיפוע גרף מהירות-זמן ולכן שיפוע הגרף צריך להיות גדול יותר בערכו המוחלט כאשר המהירות חיובית מאשר כאשר המהירות שלילית. גרף 1 הוא היחיד שמתאים לתיאור זה.

שאלה 2



<u>סעיף א</u>

T - מתיחות. מופעל על ידי החוט.

$m_1g\ ,m_2g$ – כוח הכובד / משקלי המסות. מופעלים על ידי כדור הארץ.

<u>סעיף ב</u>

(1) את ביטוי (i) ניתן לפסול על הסף מכיוון שנתון כי $m_1 > m_2$ ולכן $\frac{m_1}{m_2} > 1$. אם אכן $a = \frac{m_1}{m_2}g$ משמעות הדבר ש- $a > g$ והדבר אינו ייתכן. בכדי שהמערכת, ובפרט המסה m_1, תאיץ בתאוצה הגדולה מתאוצת הנפילה החופשית, דרוש כוח נוסף המכוון כלפי מטה מלבד כוח הכובד. מתרשים הכוחות עולה כי הכוח השקול הפועל על m_1 הוא $\Sigma F_1 = m_1g - T$ ועל כן $a < g$.

(2) את ביטוי (ii) ניתן לפסול על הסף מכיוון שיחידות המידה של כל אחד מהאגפים שונות זו מזו. אגף שמאל מייצג תאוצה הנמדדת ב- $\frac{m}{s^2}$ בעוד אגף ימין מייצג ביטוי שיחידותיו הם $\frac{kg}{kg^2} \cdot \frac{m}{s^2} = \frac{m}{kg \cdot s^2}$.
לא ייתכן ששני גדלים פיזיקליים עם יחידות מידה <u>שונות</u> זו מזו יהיו שווים זה לזה.

<u>דגש דידקטי:</u> כחלק מתהליך של מידול תיאורטי תלמידים נדרשים לעיתים רבות לפתח ביטוי פרמטרי המתאר קשר בין שני גדלים פיזיקליים. ישנם מספר מבחנים פשוטים שניתן לבצע כדי לבחון את היתכנותו של הביטוי שהתקבל. שאלה זו מדגימה שניים מהם: הערכת גודל, וניתוח יחידות המידה. בדיקת היתכנות של ביטוי פרמטרי מהווה היבט חשוב של חשיבה ביקורתית.
<u>בנספח א</u> מוצגים מגוון רחב יותר של מבחנים הניתנים לביצוע לשם בקרה על ביטוי פרמטרי, לצד הצעה לפעילות בכיתה בנושא זה בתצורה של דפי עבודה המחולקים על פי נושאים.
אנו ממליצים למורים לעודד את תלמידיהם לחשוב באופן ביקורתי על כל ביטוי שיפתחו, ובמיוחד עבור ביטויים חדשים בהקשרים חדשים, שכן אי-עמידה באחד מהם מעידה על כך שהביטוי שהתקבל <u>בהכרח</u> שגוי. ניתן להיעזר בדפי העבודה <u>בנספח א</u> לצורך תרגול מיומנות חשובה זו.

<u>סעיף ג</u>

משוואות הכוחות על כל אחת מהמסות, על פי תרשימי הכוחות, הן:

$$\Sigma F_1 = m_1g - T = m_1a$$
$$\Sigma F_2 = T - m_2g = m_2a$$

נסכום את שתי המשוואות ונקבל:

$$m_1g - T + T - m_2g = m_1a + m_2a$$

$$(m_1 - m_2)g = (m_1 + m_2)a$$

$$a = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}g$$

<u>סעיף ד</u>

ראשית, נפתח ביטוי ליחס המסות בעזרת תאוצת המערכת. ראינו ש:

$$(m_1 - m_2)g = (m_1 + m_2)a$$

נחלק את המשוואה ב-m_2 ונקבל:

$$\left(\frac{m_1}{m_2} - 1\right)g = \left(\frac{m_1}{m_2} + 1\right)a$$

נחלץ את יחס המסות:

$$\frac{m_1}{m_2}g - g = \frac{m_1}{m_2}a + a$$

$$\frac{m_1}{m_2}(g - a) = g + a$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{g + a}{g - a}$$

כל שנותר לעשות הוא למצוא את התאוצה בעזרת הנתונים על אודות התנועה:

$$x_t = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

התנועה התחילה ממנוחה, $v_0 = 0$, ולכן:

$$x_t - x_0 = \frac{1}{2}at^2 \quad \Rightarrow \quad a = \frac{2\Delta x}{t^2}$$

נציב את הנתונים:

$$a = \frac{2 \cdot 1}{1^2} = 2\frac{m}{s^2}$$

כעת נוכל לחשב את יחס המסות:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{10 + 2}{10 - 2} = \frac{12}{8} = 1.5$$

<u>סעיף ה</u>

<u>נימוק א (איכותי)</u>: היות שאורך החבל נשמר קבוע, כל העתק Δx שמסה m_1 יורדת, מסה m_2 עולה בהתאמה את אותו העתק Δx באותו פרק זמן. הדבר נכון לכל העתק או לחלופין לכל פרק זמן.

המשמעות היא שבכל רגע ורגע, המהירות הרגעית של שתי המסות זהה בגודלה והפוכה בכיוונה,

והמשמעות של מסקנה זו היא שבכל רגע ורגע התאוצה של שתי המסות זהה בגודלה והפוכה בכיוונה. ניתן לראות זאת כך: אילו היינו "פורסים" את החוט על קו ישר, מבלי שיעבור דרך גלגלת, ברור שהיות והמסות קשורות זו לזו בחוט שאורכו קבוע, גודל מהירותן זהה בכל רגע וגם תאוצתן.

<u>נימוק ב (כמותי):</u> נסמן את המרחק ההתחלתי בין שתי המסות ב-h ונגדיר ציר מקום שראשיתו בגלגלת וכיוונו החיובי למטה. לכן:

$$x_1(0) = x_2(0) + h$$

כעבור זמן t, מסה m_2 שינתה את מיקומה בשיעור $-x_2(t)$ (יש לשים לב שמסה m_2 עולה למעלה, כנגד הכיוון החיובי שהוגדר) והיות שמסה m_1 קשורה למסה m_2 באמצעות חוט שאורכו קבוע, נובע מכך שמסה m_1 שינתה את מיקומה בשיעור $+x_2(t)$, משמעות הדבר היא שמתקיים:

$$x_1(t) = h - x_2(t)$$

בכדי למצוא את המהירות הרגעית של כל אחת מהמסות, נגזור משוואה זו (נזכור ש-h הוא גודל קבוע ולכן נגזרתו לפי הזמן היא 0), היות שהמהירות הרגעית היא הנגזרת של המיקום:

$$v_1(t) = -v_2(t)$$

באופן דומה, בכדי למצוא את התאוצה הרגעית, נגזור בשנית משוואה זו ונקבל:

$$a_1(t) = -a_2(t)$$

קיבלנו שלשתי המסות יש תאוצה שגודלה שווה וכיוונה הפוך.

<u>דגש דידקטי:</u> בשאלות בנושא דינמיקה, תלמידים לעיתים רבות לא נדרשים להצדיק את היותה של תאוצת הגופים שווה בגודלה. כך שלמעשה, היותה של התאוצה שווה היוותה מעין הנחה סמויה בפתרון בעיות. סעיף זה בוחן הבנה של נבחנים על אודות הנחה זו ודורש הצדקה לה. מדובר בהיבט של <u>חשיבה ביקורתית</u> על דרך הפתרון, מגמה שצפויה להימשך בבחינות עתידיות ע"פ <u>חוזר מפמ"ר תשפ"ז/1</u>. אנו ממליצים למורים לחדד היבטים של חשיבה ביקורתית בהוראתם ולעודד תלמידים לחשוב באופן ביקורתי על הנחות בעת פתרון בעיות.

שאלה 3

<u>סעיף א</u>

לאורך תנועת הגוף על המסילה, פועלים עליו שני כוחות בלבד: כוח הכבידה mg וכוח הנורמל מהמסילה N. כוח הכבידה הוא כוח משמר, וכוח הנורמל אינו מבצע עבודה על הגוף משום שהוא תמיד מאונך לכיוון התנועה. לכן, לאורך תנועת הגוף על המסילה, האנרגיה המכנית נשמרת:

$$E_A = E_E$$

בנקודה A יש לגוף אנרגיה פוטנציאלית כובדית בלבד, בנקודה E יש אנרגיה פוטנציאלית כובדית ואנרגיה קינטית. נתייחס לקרקע כאל מישור הייחוס ($h_{\text{קרקע}} = 0$):

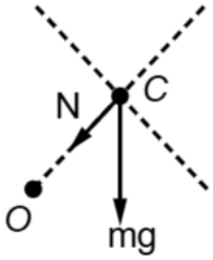
$$mgH = \frac{1}{2}mv_E^2 + mgh$$

$$H = \frac{v_E^2}{2g} + h$$

נציב את הנתונים:

$$H = \frac{4^2}{2 \cdot 10} + 0.3 = 1.1m$$

<u>סעיף ב</u>



<u>תשובה:</u> תרשים 3.

<u>נימוק:</u> על פי החוק השני של ניוטון, ווקטור התאוצה יהיה מכוון בכיוון ווקטור הכוח השקול, שהוא סכום שני הכוחות היחידים הפועלים על הגוף: ווקטור כוח הכבידה מכוון אנכית מטה. ווקטור כוח הנורמל מכוון במאונך למסילה, כלומר לכיוון מרכז המעגל O. הווקטור השקול המורכב מסכום שני ווקטורים אלה, יהיה מכוון מתחת לציר CO אך מעל הכיוון האנכי. תרשים 3 מתאר זאת בצורה הטובה ביותר.

<u>דגש דידקטי:</u> דרך הנמקה נפוצה שעלתה בניתוח תשובות בחינות הבגרות התמקדה ברכיבי התאוצה: רדיאלית ומשיקית. דרך הנמקה זו <u>אינה</u> פוסלת את תרשים 1 ועל כן אם נבחן בחר לנמק בדרך זו, חשוב להדגיש שעליו לנמק מדוע תרשים 1 אינו הולם לתרחיש.

<u>סעיף ג</u>

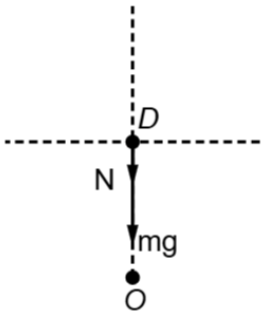
בדומה לסעיף א', האנרגיה המכנית לאורך התנועה נשמרת, גם כאשר הגוף מתנתק מהמסילה (בתנועתו באוויר, רק כוח הכובד פועל עליו, שהוא כוח משמר). בנקודת הפגיעה (נסמנה ב-F) יש לגוף רק אנרגיה קינטית:

$$E_A = E_F$$

$$mgH = \frac{1}{2}mv_F^2$$

$$v_F = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 1.1} = \sqrt{22} = 4.69\frac{m}{s}$$

<u>סעיף ד</u>



(1) N – כוח נורמל. מופעל על ידי המסילה.

mg – כוח הכבידה. מופעל על ידי כדור הארץ.

(2) על פי החוק השני של ניוטון, מתקיים:

$$\Sigma F = N + mg = ma_r = \frac{mv_D^2}{r}$$

המקרה הגבולי ביותר בו הגוף לא מתנתק מהמסילה הוא $N = 0$, מה שמציב תנאי למהירות המינימלית בנקודה D בכדי שהגוף לא יתנתק מהמסילה:

$$mg = \frac{mv_D^2}{r} \quad \Rightarrow \quad v_D = \sqrt{rg}$$

(אם המהירות בנקודה D נמוכה ממהירות זו, הרי שכוח הכבידה גדול יותר מאשר ma_r ולכן הגוף לא יבצע תנועה מעגלית, אלא יתנתק מהמסילה).

בכדי למצוא את הגובה המינימלי H_1 ממנו יש לשחרר את הגוף בכדי להקנות לו מהירות מינימלית זו, ניעזר בשימור אנרגיה:

$$E_i = E_D$$

$$mgH_1 = \frac{1}{2}mv_D^2 + mgh_D = \frac{1}{2}m(rg) + mg(2r)$$

$$mgH_1 = \frac{1}{2}mgr + 2mgr = 2.5mgr$$

$$H_1 = 2.5r = 2.5 \cdot 0.1 = 0.25m = 25cm$$

<u>סעיף ה</u>

<u>תשובה:</u> הגובה המרבי מעל הקרקע קטן מהגובה H.

<u>נימוק א (איכותי):</u> ברגע התנתקות הגוף מהמסילה בנקודה E יש לגוף מהירות אופקית ששיעורה $v_x = v_E \cos 37°$. מהירות אופקית זו אינה משתנה לאורך התנועה באוויר שכן לא פועלים על הגוף כוחות בכיוון האופקי. משמעות הדבר היא שבשיא הגובה יש לגוף אנרגיה קינטית <u>וגם</u> אנרגיה

פוטנציאלית כובדית. סכום שני האנרגיות חייב להיות שווה לאנרגיה הפוטנציאלית הכובדית שיש לגוף בנקודה A: $mgH = \frac{1}{2}mv_x^2 + mgh_{max}$ ולכן הגובה המרבי <u>קטן</u> מהגובה H.

<u>נימוק ב (כמותי)</u>: נחשב את הגובה המרבי. הגוף מתחיל את תנועתו האנכית מגובה h וממהירות התחלתית $v_{0_y} = v_E \sin 37°$. בשיא הגובה $v_y = 0$ ולכן ההעתק האנכי שיעבור נתון לפי:

$$v_y^2 = v_{0_y}^2 - 2g\Delta y$$

$$0 = v_E^2 \sin^2 37° - 2g\Delta y$$

$$\Delta y = \frac{v_E^2 \sin^2 37°}{2g} = \frac{22 \cdot 0.362}{2 \cdot 10} = 0.398m$$

ולכן הגובה המרבי הוא:

$$h_{max} = h + \Delta y = 0.3 + 0.398 = 0.698m < 1.1m = H$$

<u>דגש דידקטי:</u> אנו ממליצים למורים לעודד את תלמידיהם לפתור בשתי הדרכים, למרות שנאמר מפורשות בשאלה שאין חובה לחשב. פתרון בשתי הדרכים עשוי להיות שימושי לתלמידים בארבעה מובנים חשובים לדעתנו: (1) פתרון בעיות בדרכים שונות עשוי לעודד חשיבה יצירתית וגם חשיבה ביקורתית. הוא עשוי לחזק אצל התלמידים מיומנויות נוספות, או לעזור להם לחשוב על דרכים חדשות לפתרון, שעשויות להיות מועילות במהלך לימודי פיזיקה בכלל ובשאלות אחרות בפרט;
(2) פתרון באמצעות חישוב הוא אפשרי ולגיטימי (למעט מקרים בהם נאמר מפורשות אחרת) ובמקרים רבים זמין יותר לתלמידים מאשר טיעון או הסבר; (3) חישוב הגובה המירבי מדגים היבטים קינמטיים שניתן לחשב בבעיה הנתונה. אומנם השאלה מתייחסת רק לגובה המירבי, אך ניתן לחשב גם היבטים קינמטיים אחרים כמו מרחק נקודת הפגיעה, זמן הפגיעה, זווית הפגיעה, וכד'. התרחיש בשאלה זו מזמין דיון פורה סביב היבטים קינמטיים של התנועה;
(4) פתרון באמצעות חישוב עשוי לעזור לתלמידים בתהליך בקרה על תשובתם לסעיף. אומנם בשאלה נאמר שאין חובה לחשב, אך אפילו אם בשאלה הייתה הנחיה מפורשת לנמק <u>ללא</u> חישוב, ניתן לבצע חישוב בדף טיוטה בכדי לבדוק את התשובה: ייתכן שתלמידים חושבים שתשובה לא נכונה היא הנכונה ויתקנו את תשובתם. ואפילו אם התלמידים ענו תשובה נכונה, ייתכן שפתרון חישובי ידייק את הטיעון שכתבו בעקבות תובנות מסוימות שעשויות לעלות במהלך החישוב.

שאלה 4

<u>סעיף א</u>

לאורך תנועת הגוף על המסילה ABC, פועלים עליו שני כוחות בלבד: כוח הכבידה mg וכוח הנורמל מהמסילה N. כוח הכבידה הוא כוח משמר, וכוח הנורמל אינו מבצע עבודה על הגוף משום שהוא תמיד מאונך לכיוון התנועה. לכן, לאורך תנועת הגוף על המסילה, האנרגיה המכנית נשמרת:

$$E_A = E_C$$

בנקודה A יש לגוף אנרגיה פוטנציאלית כובדית בלבד, בנקודה C יש אנרגיה פוטנציאלית כובדית ואנרגיה קינטית. נתייחס למישור האופקי BC כאל מישור הייחוס ($h_{BC} = 0$):

$$mgh = \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$h = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{4^2}{2 \cdot 10} = 0.8m$$

<u>סעיף ב</u>

כעת, ישנו חיכוך המבצע עבודה. עבודת הכוחות הלא משמרים שווה לשינוי באנרגיה המכנית:

$$W_f = \Delta E = E_{A_1} - E_C$$

בנקודה A_1 יש אנרגיה פוטנציאלית בלבד (הגובה הוא $0.8h$), בנקודה C אנרגיה קינטית בלבד, לכן:

$$W_f = mg(0.8h) - \frac{1}{2}mv_0^2 = 0.1 \cdot 10 \cdot (0.8 \cdot 0.8) - \frac{1}{2} \cdot 0.1 \cdot 4^2 = 0.64 - 0.8 = -0.16J$$

<u>סעיף ג</u>

בדרכו חזרה לנקודה C הגוף עובר מסלול בדרך שווה. כיוון התנועה משתנה וכיוון החיכוך משתנה בהתאם, ולכן עבודת כוח החיכוך נשארת זהה [באופן כמותי: $W_f = f \cdot \Delta s \cdot \cos\theta$, כאשר בכל אחד מקטעי המסילה: f לא משתנה בגודלו, Δs לא משתנה בגודלו, ו-θ לא משתנה], $W_f = -0.16J$. לכן, בפעם השנייה שהגוף יחלוף בנקודה C, החיכוך מבצע עבודה של: $W_f = 2 \cdot -0.16 = -0.32J$.

ראינו בחישוב בסעיף הקודם שהאנרגיה שהייתה לגוף בנקודה C בפעם הראשונה היא $E_C = 0.8J$ ולכן האנרגיה שלו בעוברו בנקודה C בפעם השנייה היא:

$$E'_C = E_C + W_f = 0.8 - 0.32 = 0.48J$$

אנרגיה זו היא קינטית בלבד, ולכן:

$$\frac{1}{2}m{v'_C}^2 = E'_C \quad \Rightarrow \quad v'_c = \sqrt{\frac{2E'_C}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.48}{0.1}} = 3.10\frac{m}{s}$$

סעיף ד

בניסוי השלישי, ישנם שני כוחות לא משמרים המבצעים עבודה, החיכוך והכוח החיצוני F. באופן דומה לסעיף ב', עבודת הכוחות הלא משמרים שווה לשינוי באנרגיה המכנית:

$$W_{\text{לא משמרים}} = \Delta E = E_{A_1} - E_C$$

נשים לב שגודל המהירות בנקודה A_1 זהה לגודל המהירות בנקודה C, ולכן יש לגוף אותה אנרגיה קינטית בשתי נקודות אלה.

$$W_{\text{לא משמרים}} = mg(0.8h) + \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = mg(0.8h)$$

את ההצבה והחישוב עצמו ביצענו כבר בסעיף ב':

$$W_{\text{לא משמרים}} = 0.64J$$

כאמור, עבודת הכוחות הלא משמרים מורכבת מעבודת החיכוך ועבודת הכוח החיצוני F:

$$W_{\text{לא משמרים}} = W_f + W_F$$

$$W_F = W_{\text{לא משמרים}} - W_f = 0.64 - (-0.16) = 0.8J$$

סעיף ה

<u>הערה:</u> התשובה מתבססת על ההנחה שהגוף מאיץ במישור האופקי BC ומאט במישור המשופע AB. קושי מרכזי שעלה בשאלה מבוסס על ההיתכנות לכאורה, לפחות מבחינה פרמטרית, לאפשרות שהגוף דווקא מאט במישור האופקי BC ומאיץ במישור המשופע AB. בהמשך, נראה שמצב זה אינו אפשרי מבחינה פיזיקלית. לצורך המענה על השאלה נניח הנחה זו. יש להדגיש שנבחנים שהניחו (בין אם באופן גלוי או באופן סמוי) שהגוף חייב להאיץ במישור האופקי ולהאט במישור המשופע ונימקו בהתאם, לא נפגעו בציון.

<u>תשובה:</u> הגוף הגיע למהירות $4\frac{m}{s}$ לפני הנקודה A_1.

<u>נימוק א (עבודה ואנרגיה):</u> בקטע האופקי BC, עבודת הכוח F זהה לזה שבניסוי השלישי (תרחיש זהה). אולם, בקטע המשופע A_1B, עבודת הכוח F קטנה יותר, משום שישנה זווית בין הכוח לדרך. נוסף על זאת, עבודת כוח החיכוך גדולה יותר, משום שהרכיב האנכי של הכוח F תורם להגדלת כוח הנורמל, וכתוצאה מכך להגדלת כוח החיכוך. מכאן, שלאורך התנועה מ-B ל-A_1, עבודת הכוחות הלא משמרים קטנה יותר. ע"פ הפיתוח מסעיף ד' ניתן לראות שהגובה H בו מהירות הגוף משתווה לראשונה למהירות ההתחלתית מקיים: $W_{\text{לא משמרים}} = mgH$. מכיוון שעבודת הכוחות הלא משמרים קטנה יותר, $H < 0.8h$, כלומר הגוף יגיע למהירות של $4\frac{m}{s}$ לפני נקודה A_1.

נימוק ב (תאוצה): בקטע האופקי BC הגוף צובר מהירות זהה לזו שבניסוי השלישי (תרחיש זהה). אולם, במישור המשופע, תאוצתו גדולה יותר עקב הזווית בין הכוח לבין הדרך. אם נסמן את זווית הנטייה של המישור המשופע ב-α: בניסוי השלישי התאוצה היא $a_3 = g\sin\alpha + \mu g\cos\alpha - \frac{F}{m}$ כלפי מטה, בעוד בניסוי הרביעי היא $a_4 = g\sin\alpha + \mu g\cos\alpha - \frac{F\cos\alpha}{m}$. מכאן שהתאוצה גדולה יותר בגודלה, משמע הגוף מעט את מהירותו בקצב מהיר יותר. לפי $v^2 = v_0^2 - 2a\Delta x$ (יש לזכור שהתאוצה מכוונת נגד כיוון המהירות, במורד המישור המשופע). כיוון ש-a גדול יותר, דרוש Δx קטן יותר בכדי להגיע לאותה מהירות v, כלומר הגוף יגיע למהירות $4\frac{m}{s}$ לפני הנקודה A_1 .

דגש דידקטי: בסעיף זה עלה קושי שמהותו התייחסות למצב בו הגוף מאט במישור האופקי ומאיץ במישור המשופע, דבר המשפיע על אופן המענה. חשוב לשים לב ששיקולי אנרגיה מלמדים שבנקודה A_1 הגוף מגיע למהירות קטנה יותר מ-$4\frac{m}{s}$. אם הגוף מאט במישור האופקי ומאיץ במישור המשופע, המשמעות היא שהגוף יגיע למהירות של $4\frac{m}{s}$ אחרי הנקודה A_1, ולהיפך.
לכאורה, עבור בחירה מסוימת של הפרמטרים בשאלה $(m\ ,\alpha\ ,\mu\ ,F\ ,L_{BC}\ ,L_{A_1B})$, שלושת האפשרויות יכולות להיות נכונות.

נראה שתרחיש לפיו הגוף מאט במישור האופקי ומאיץ במישור המשופע אינו אפשרי: אם הגוף מאט במישור האופקי, המשמעות היא ש-$F < \mu mg$. במישור המשופע, לאור הזווית בין הכוח F לבין המישור, גודלו של כוח הנורמל הוא: $N = mg\cos\alpha + F\sin\alpha$.
הכוח השקול בכיוון המקביל למישור המשופע הוא (נבחר את הכיוון החיובי במעלה המישור המשופע):

$$\Sigma F_{\parallel} = F\cos\alpha - mg\sin\alpha - \mu N$$

ביטוי זה חייב להיות חיובי אם הגוף מאיץ במישור המשופע. נציב את הביטוי עבור הכוח הנורמל [ההדגשה בצבעים היא למען נוחות קריאה]:

$$\Sigma F_{\parallel} = F\cos\alpha - mg\sin\alpha - \mu(mg\cos\alpha + F\sin\alpha)$$
$$\Sigma F_{\parallel} = \cos\alpha\,(F - \mu mg) - mg\sin\alpha - \mu F\sin\alpha$$

היות ש-$F < \mu mg$ (הגוף מאט במישור האופקי), התקבל ש-$\Sigma F_{\parallel}$ בהכרח שלילי. כלומר, לא ייתכן שהגוף מאט במישור האופקי ומאיץ במישור המשופע [אם הוא מאט באופקי, הוא בהכרח מאט גם במשופע].

שאלה 5

<u>סעיף א</u>

<u>תשובה:</u> לא התקיים שימור אנרגיה מכנית במהלך ההתנגשות.

<u>נימוק א (אי-שימור אנרגיה בהתנגשות פלסטית):</u> נראה שבמהלך התנגשות פלסטית, האנרגיה הקינטית <u>לעולם</u> לא נשמרת. על פי שימור תנע:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)u$$

נבודד את התנע של גוף 1 והתנע של גוף 2:

$$m_1(v_1 - u) = m_2(u - v_2)$$

אילו האנרגיה הקינטית הייתה נשמרת, היה מתקיים:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)u^2$$

נכפיל ב-2 ונבודד את האנרגיה הקינטית של גוף 1 והאנרגיה הקינטית של גוף 2:

$$m_1(v_1^2 - u^2) = m_2(u^2 - v_2^2)$$

ניעזר בנוסחאות הכפל המקוצר:

$$\underbrace{m_1(v_1 - u)}\,(v_1 + u) = \underbrace{m_2(u - v_2)}\,(u + v_2)$$

הביטויים המסומנים שווים זה לזה על פי שימור תנע, ולכן נקבל:

$$v_1 + u = u + v_2$$

$$v_1 = v_2$$

כלומר, אנרגיה קינטית יכולה להישמר אם ורק אם המהירות של שני הגופים לפני ההתנגשות זהה, הווה אומר הם מלכתחילה נעו יחד ולא התנגשו התנגשות פלסטית.
המסקנה היא שבהתנגשות פלסטית האנרגיה לעולם לא נשמרת. היות שבשאלה הגופים התנגשו פלסטית, האנרגיה לא נשמרה.

<u>נימוק ב (עבודת כוחות לא משמרים)</u>: במהלך ההתנגשות פעלו על הגוף ועל הקליע כוחות נורמל וכוחות חיכוך. כוחות אלו אומנם כוחות פנימיים, ועל כן התנע נשמר, אולם, כוחות אלה אינם כוחות משמרים. הכוחות פעלו בכיוון התנועה (במקביל או במנוגד), ועל כן ביצעו עבודה. היות שהתבצעה עבודה על ידי כוחות לא משמרים, האנרגיה המכנית לא נשמרה.

סעיף ב

הגוף במנוחה לפני ההתנגשות, לכן על פי שימור תנע נקבל:

$$mv = (m+M)u$$

$$u = \frac{mv}{m+M}$$

נציב את הנתונים בכל אחד מן המקרים:

$$u_1 = \frac{mv}{m+M}$$

$$u_2 = \frac{2m \cdot 0.5v}{2m+M} = \frac{mv}{2m+M}$$

$$u_3 = \frac{0.5m \cdot 2v}{0.5m+M} = \frac{mv}{0.5m+M}$$

סעיף ג

לאחר ההתנגשות, המתיחות היא הכוח היחיד הפועל בכיוון מרכז המעגל (למעשה, הכוח היחיד הפועל במישור התנועה). כוח זה הוא כוח מרכזי, ולכן:

$$\Sigma F_r = T = (m+M)a_r = \frac{(m+M)u^2}{L}$$

נציב את הביטוי עבור u, נשים לב שהמונה בביטוי עבור המהירות המשותפת זהה בכל אחד מן המקרים ונזכור שהמסה הכוללת משתנה בהתאם בכל אחד מן המקרים:

$$T_1 = \frac{m^2v^2}{L(m+M)}$$

$$T_2 = \frac{m^2v^2}{L(2m+M)}$$

$$T_3 = \frac{m^2v^2}{L(0.5m+M)}$$

סעיף ד

תשובה: במקרה השלישי הסיכוי לחוט להיקרע הוא הגבוה ביותר.

נימוק: במקרה השלישי המתיחות היא הגדולה ביותר (המכנה הקטן ביותר). ולכן במקרה זה יש לחוט את הסיכוי הגדול ביותר להיקרע. במילים אחרות: אם החוט היה נקרע באחד מן המקרים 1 או 2, הוא בוודאות היה נקרע במקרה 3. אם ידוע שהחוט נקרע רק באחד מן המקרים, זה חייב להיות מקרה 3.

סעיף ה

תשובה: לא מתקיים שימור תנע.

נימוק א (משפט מתקף-תנע): במהלך תנועת הגוף עם הקליע בתוכו לאורך רבע מעגל, פעל על המערכת כוח חיצוני שהוא כוח המתיחות. כוח זה ביצע מתקף ששינה את התנע של הגוף, לכן התנע לא נשמר.

נימוק ב (הגדרת תנע): תנע הוא גודל ווקטורי $\vec{p} = m\vec{v}$. לאורך התנועה, כיוון ווקטור המהירות משתנה, ועל כן כיוון ווקטור התנע משתנע. מכאן שהתנע משתנה, דהיינו אינו נשמר.

שאלה 6

<u>סעיף א</u>

<u>תשובה:</u> כוכב הלכת הדמיוני ממוקם בנקודה P.

על פי החוק הראשון של קפלר, תנועת לוויין בהשפעת כבידה בלבד היא תנועה במסלול אליפטי, כאשר גרם השמיים המאסיבי נמצא באחד ממוקדי האליפסה. לכן, כוכב הלכת הדמיוני יכול להיות ממוקם בנקודות Q או P בלבד.

<u>נימוק א (החוק השני של קפלר קפלר):</u> על פי החוק השני של קפלר, הקו המחבר בין הכוכב ללוויין מכסה שטחים שווים בפרקי זמן שווים. נתון שמשך התנועה מ-A ל-B שווה למשך התנועה מ-B ל-C ולכן שטח הגזרה של נקודות אלה, עם מוקד האליפסה המתאים, חייב להיות שווה. ברור ש- $S_{AQB} >$ S_{BQC} משום שגם $\widehat{AB} > \widehat{BC}$ וגם המרחק של AB מנקודה Q גדול מהמרחק של BC מנקודה Q (מעין גובה של משולש, בקירוב לזמנים קצרים). ולכן כוכב הלכת הדמיוני חייב להיות בנקודה P, ואכן יתכן ש- $S_{APB} = S_{BPC}$.

<u>נימוק ב (שימור אנרגיה):</u> לאורך תנועת הלוויין האנרגיה המכנית נשמרת, משום שהוא נע בהשפעת כוח הכבידה בלבד, שהוא כוח משמר. האנרגיה הפוטנציאלית נתונה לפי $U_G = -\frac{GMm}{r}$ ולכן היא <u>גדלה</u> ככל שהמרחק מהכוכב גדל (היא קטנה בערכה המוחלט, אך יש לזכור שהאנרגיה שלילית). לכן, ככל שהמרחק מהכוכב גדל, האנרגיה הקינטית <u>קטנה</u>. כלומר, המהירות קטנה ככל שהמרחק מהכוכב גדל. ניתן לראות בתרשים ש- $\widehat{AB} > \widehat{BC}$ ונתון שהכוכב נע בין נקודות אלה באותו פרק זמן, כלומר: המהירות הממוצעת לאורך הקשת AB גדולה מהמהירות הממוצעת לאורך הקשת BC. משמע: הקשת BC רחוקה יותר מהכוכב מאשר הקשת AB. לכן, הכוכב חייב להיות בנקודה P.

<u>דגש דידקטי:</u> בניתוח תשובות הנבחנים בבחינות בגרות עלה שכמה מהנבחנים לא התייחסו לחוק הראשון של קפלר בנימוק, אלא לשני בלבד. חשוב לציין שללא החוק הראשון של קפלר, לא ניתן לפסול את נקודה O כנקודה אפשרית למיקום כוכב הלכת. לכן, שימוש בחוק הראשון של קפלר כחלק מההנמקה הוא <u>הכרחי</u>.

<u>סעיף ב</u>

(1) <u>תשובה:</u> היגד (1) שגוי.

<u>נימוק:</u> האנרגיה הקינטית של לוויין במסלול מעגלי היא $E_k = \frac{GMm}{2r}$, כלומר האנרגיה תלויה ברדיוס. נתון שהרדיוס שונה, ולכן האנרגיה הקינטית שונה.

(2) תשובה: היגד (2) נכון.

נימוק: האנרגיה המכנית הכוללת של לוויין במסלול מעגלי היא $E=-\frac{GMm}{2r}$, היות ש- $R_2>R_1$, האנרגיה המכנית הכוללת בערכה המוחלט קטנה יותר. נזכור שהאנרגיה המכנית היא שלילית, ועל כן האנרגיה אכן גדולה יותר עבור לוויין שמסלולו R_2.

(3) תשובה: היגד (3) שגוי.

נימוק: כוח הכבידה, על פי חוק הכבידה העולמי של ניוטון, הוא $F_G=\frac{GMm}{r^2}$. כלומר הכוח תלוי במרחק ביחס ריבועי הפוך. כיוון ש- $R_2=2R_1$, לא רק שהכוח ברדיוס R_2 קטן יותר, אלא הוא קטן יותר פי 4.

סעיף ג

נמצא ביטוי לשדה הכבידה כתלות במרחק. מצד אחד, כוח הכבידה שווה ל- $F_G=\frac{GMm}{r^2}$ על פי חוק הכבידה העולמי של ניוטון. מצד שני, על פי הגדרת שדה כבידה, כוח הכבידה שווה ל- $F_G=mg^*$. לכן:

$$mg^*=\frac{GMm}{r^2}$$

$$g^*=\frac{GM}{r^2}$$

הערה: פיתוח זה הוא חלק מהותי מדרישות השאלה בהקשר למועד ההיבחנות. לאור העדכון של נספח הנוסחאות והנתונים בפיזיקה, בו מופיעה הנוסחה ל-g^* בצורה מפורשת, יש לשים לב שפיתוח זה אינו נדרש יותר.

מכאן שהגרף המתאר את g^* כתלות ב- $\frac{1}{r^2}$ צפוי להיות קו ישר, העובר בראשית הצירים (כפי שנראה בתרשים), והמשמעות הפיזיקלית של שיפועו היא $A=GM$. נחשב את שיפוע הגרף בעזרת שתי נקודות מתוך הגרף: $(0\,,0)$ ו- $(2.4\,,9.5)$. נשים לב היטב ליחידות המידה:

$$A=\frac{9.5-0}{(2.4-0)\cdot 10^{-14}}=\frac{9.5}{2.4\cdot 10^{-14}}=3.96\cdot 10^{14}\frac{Nm^2}{kg}$$

לכן, מסת כוכב הלכת הדמיוני היא:

$$M=\frac{A}{G}=\frac{3.96\cdot 10^{14}}{6.67\cdot 10^{-11}}=5.935\cdot 10^{24}kg$$

סעיף ד

מהירות המילוט היא המהירות שיש להקנות לגוף הנמצא על פני הכוכב בכדי שיתנתק מהשפעת הכבידה של הכוכב. כלומר: יגיע למרחק גדול מאוד (אינסופי). על פי שימור אנרגיה:

$$E_R=E_\infty$$

על פני הכוכב יש לגוף אנרגיה פוטנציאלית כובדית שלילית ואנרגיה קינטית חיובית. במרחק גדול מאוד, האנרגיה המכנית של הגוף היא אפס. לכן:

$$\frac{1}{2}mv_{esc}^2 - \frac{GMm}{R} = 0$$

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

<u>סעיף ה</u>

נתון שהגרף מציג את גודל שדה הכבידה בתחום $r \geq R$, כלומר בתחום $\frac{1}{r^2} \leq \frac{1}{R^2}$. המשמעות היא שהנקודה הקיצונית ביותר בגרף, בה $\frac{1}{r^2} = 2.4 \cdot 10^{-14}$, מייצגת את $\frac{1}{R^2}$. לכן:

$$R = \sqrt{\frac{1}{2.4 \cdot 10^{-14}}} = 6.455 \cdot 10^6 m$$

שאלה 1



<u>סעיף א</u>

(1) F_E – כוח חשמלי. מופעל על ידי השדה החשמלי.

mg – כוח הכבידה. מופעל על ידי כדור הארץ.

(2) לפי החוק השני של ניוטון: $\Sigma F = ma$, נזכור שהכיוון החיובי נקבע כלפי מעלה. לכן:

$$F_E - mg = ma$$

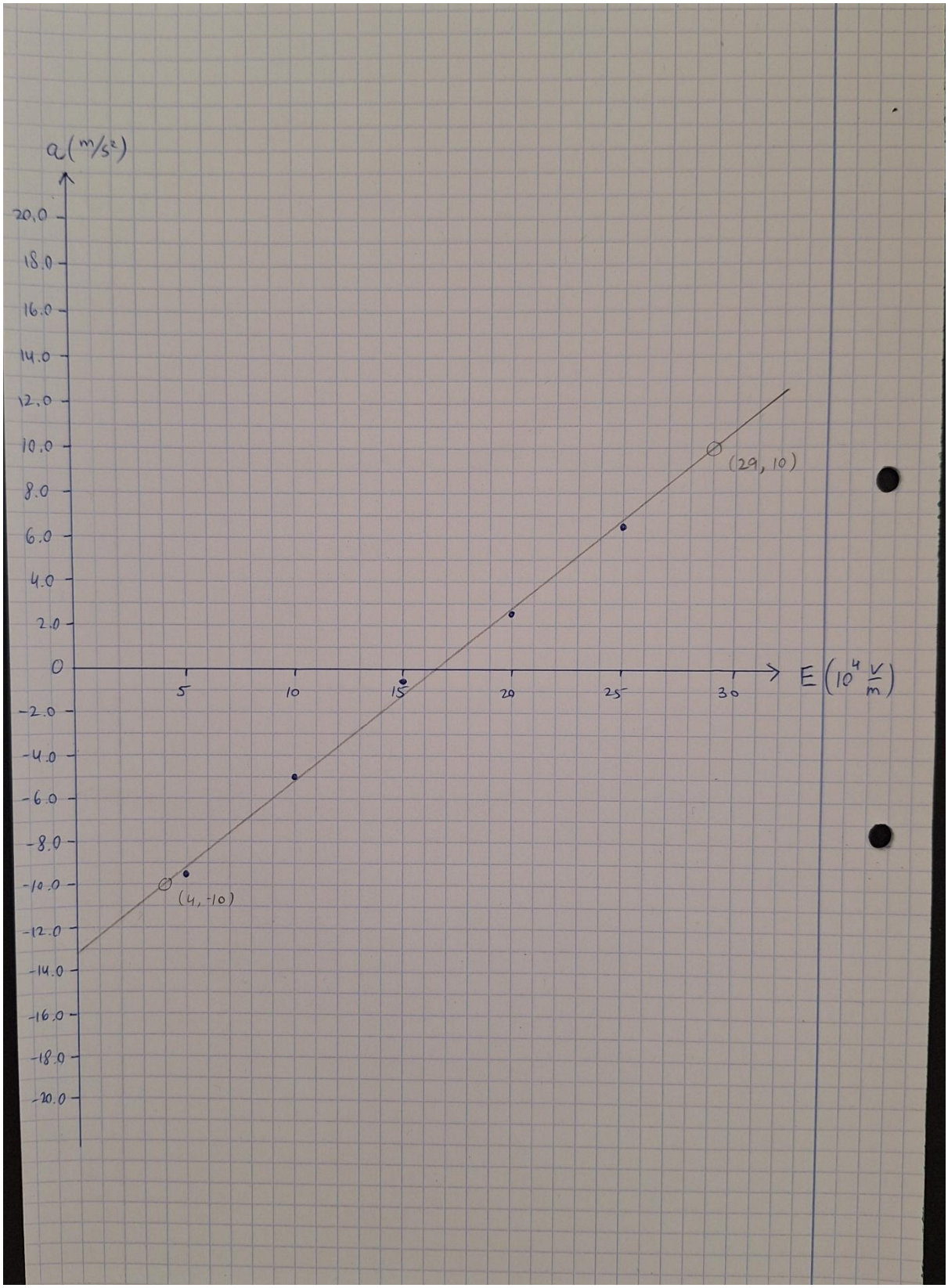
ביטוי לכוח החשמלי נתון על ידי: $F_E = qE$, לכן:

$$qE - mg = ma$$

נחלק ב-m ונקבל את הביטוי המבוקש:

$$a = \frac{q}{m}E - g$$

סעיף ב


a(m/s²)
20.0
18.0
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0
-2.0
-4.0
-6.0
-8.0
-10.0
-12.0
-14.0
-16.0
-18.0
-20.0
5
10
15
20
25
30
E(10⁴ V/m)
(29, 10)
(4, -10)

סעיף ג

נמצא את שיפוע קו המגמה באמצעות שתי נקודות מקו המגמה: $(4\,,-10)$ ו- $(29\,,10)$:

$$A=\frac{10-(-10)}{(29-4)\cdot 10^4}=\frac{20}{25\cdot 10^4}=8\cdot 10^{-5}\frac{m^2}{Vs^2}=8\cdot 10^{-5}\frac{C}{kg}$$

המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא $\frac{q}{m}$ ולכן:

$$\frac{q}{m}=8\cdot 10^{-5}\frac{C}{kg}$$

<u>הערה:</u> בהתאם לגרף ששרטטו העונים עשויות להתקבל תוצאות שונות מעט בחישוב השיפוע. כל תשובה בתחום $7.2\cdot 10^{-5}\frac{C}{kg}\le A\le 8.8\cdot 10^{-5}\frac{C}{kg}$ תתקבל כנכונה, ובהתאם לכך כל החישובים בסעיף זה ובסעיפים הבאים העושים שימוש בתוצאה זו.

<u>דגשים דידקטיים:</u>

(1) קל יותר לראות את מעבר היחידות שבוצע בשיפוע הגרף אם מביעים שדה חשמלי ב-$\frac{N}{C}$ במקום $\frac{V}{m}$ ומביעים תאוצה ב-$\frac{N}{kg}$ במקום $\frac{m}{s^2}$. אנו ממליצים למורים לשים דגש מיוחד על דרכי ייצוג מרובות של יחידות מידה ומעבר ביניהן, במיוחד בחשמל ומגנטיות שם יש גדלים פיזיקליים רבים בעלי יותר מיחידות מידה מקובלת אחת, בכדי לעודד את תלמידיהם לעשות את הקשרים הנדרשים ביחידות מידה. במיוחד בהמרת יחידות לא טריוויאלית כפי שבאה לידי ביטוי בשאלה הנוכחית. חשוב להדגיש שאי-רישום יחידות לשיפוע בצורתם המפושטת ביותר (למשל: יחידות $\frac{m^2}{V\cdot s^2}$ <u>אינן</u> מפושטות) עלול להוביל לפגיעה בציון.

(2) נבחנים רבים טעו בחישוב ערכו המספרי של השיפוע כי לא התייחסו לקנה המידה של 10^4 ביחידות השדה החשמלי. מעבר לתשובה השגויה בסעיף זה, בחלק מהמקרים הדבר הוביל אותם לשגיאות בניתוח הסעיף הבא. אנו ממליצים למורים לשים דגש מיוחד על התייחסות לא רק ליחידות המידה בחישוב שיפוע, אלא גם לקנה המידה.

<u>סעיף ד</u>

<u>תשובה:</u> אכן קרה שהבינה המלאכותית נתנה תוצאות שאינן תואמות את הידע הפיזיקלי המקובל.

<u>נימוק:</u> ההדמיה מדמה ניסוי שבוצע על פני כדור הארץ. בסביבת פני כדור הארץ הגודל של תאוצת הנפילה החופשית הוא $g=9.8\frac{m}{s^2}\approx 10\frac{m}{s^2}$. המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך של קו המגמה עם הציר האנכי היא g וניתן לראות שעל פי תוצאות ההדמיה, מתקבל ש- $g\approx 13\frac{m}{s^2}$. ניתן אף למצוא את g מתוך קו המגמה בצורה מדויקת באמצעות נקודה ושיפוע הגרף:

$$y = mx + b \;\rightarrow\; b = y - mx = 10 - (8 \cdot 10^{-5}) \cdot 29 \cdot 10^4 = -13.2\frac{m}{s^2}$$

המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך עם הציר האנכי היא $-g$, ולכן על פי ההדמיה:

$$g = 13.2\frac{m}{s^2}$$

תוצאה זו חורגת במידה ניכרת מהידע הפיזיקלי על אודות תאוצת הנפילה החופשית בסביבת כדור הארץ, ועל כן ניתן לומר שאכן קרה שהבינה המלאכותית נתנה תוצאות שאינן תואמות את הידע הפיזיקלי המקובל.

<u>דגש דידקטי:</u> בניתוח תשובות הנבחנים לבחינות הבגרות לסעיף זה עלו שני קשיים מרכזיים: (1) טענה שהבינה צודקת מהסיבה שהתקבל גרף לינארי כפי שמצפה המודל, או לחלופין מהסיבה שבינה מלאכותית באופן אינהרנטי נותנת תוצאות יותר מדויקות מאשר ניסוי בפועל; (2) טענה שהבינה טועה, אך מסיבות שאינן מעוגנות במידע שניתן לחלץ מהגרף, כמו למשל: טענה שהבינה מתעלמת מהתנגדות אוויר ולכן טועה, טענה שערך השיפוע אינו הגיוני[1] (מסיבה לא מוסברת) ולכן הבינה טועה, וכד'.

יש לשים לב שסעיף זה הוא סעיף <u>חשיבה ביקורתית</u>, על אודות ממצאי גרף והתאמתם (או אי-התאמתם) לידע פיזיקלי רלוונטי, וזאת מבלי להכווין לממצא מסוים (שיפוע / נקודות חיתוך עם הצירים, וכד'). מכאן, שיש לבצע בקרה על <u>כל</u> מאפייני הגרף שעשויים להיות רלוונטיים: היותו לינארי (או לא), שיפוע, נקודות חיתוך עם הצירים, ולעיתים יש להסתמך על היבטים רחבים יותר כמו תחום התוקף וההכללה של הקשר המתואר.

חשוב להדגיש לתלמידים, במיוחד בסעיפי חשיבה ביקורתית, שאין לבסס את התשובה על אינטואיציה, ויש הכרח לעגן את ההנמקה בממצא מפורש המתקבל בגרף. בנוסף, חשוב להדגיש את ההליך הדרוש בהסקה על נכונות הטענה או שלילתה, שהוא שונה מהותית – בכדי לטעון שהבינה טועה מספיקה דוגמה משכנעת <u>אחת</u> (למשל: חיתוך עם הציר האנכי שלא תואם את הידע המקובל), אולם, בכדי לטעון שהבינה צודקת, יש להראות התאמה של <u>כל</u> ההיבטים שהוזכרו לידע הפיזיקלי המקובל (למשל: לא מספיק לטעון שהגרף לינארי ולכן הבינה צודקת).

<u>סעיף ה</u>

הטיפות הטעונות נדחו מן הכדור משום שהכדור טעון במטען חיובי והטיפות טעונות במטען חיובי, ומטענים בסימן דומה דוחים זה את זה.

[1] נבחנים ששגו בהתייחסות לקנה המידה בסעיף ג' קיבלו שערך המטען הסגולי הוא $0.8\frac{C}{kg}$, חלקם טענו שערך זה גדול מדי והם ציפו לקבל מספר קטן יותר. תשובה זו מעידה על אינטואיציה נכונה, אולם, מבחינה פיזיקלית, אין לה משמעות. שכן, לא ניתן לדעת מהו הערך הצפוי של המטען הסגולי מנתוני הבעיה, ואין סיבה ממשית לכך שהוא יהיה גדול מאוד או קטן מאוד (נזכיר, שהמטען הסגולי של אלקטרון הוא מסדר גודל של $10^{11}\frac{C}{kg}$, אז לא ברור מדוע מטען סגולי של $10^0\frac{C}{kg}$ או $10^{-1}\frac{C}{kg}$ אינו אפשרי)

הטיפות הניטרליות נמשכו אל הכדור משום שבעקבות השדה החשמלי שיצר הכדור בסביבתו, נוצר קיטוב במטען הטיפות. כלומר: למרות שהטיפות ניטרליות, המטען עליהן יפוזר בצורה לא אחידה, כאשר המטען החיובי רחוק יותר מהכדור מאשר המטען השלילי.
על כל אחד מן הקטבים יפעל כוח חשמלי: על הקוטב החיובי יפעל כוח דחייה, ועל הקוטב השלילי יפעל כוח משיכה. היות שהקוטב השלילי קרוב יותר לכדור במעט, כוח המשיכה לכדור שיפעל על הטיפה חזק יותר במעט מאשר כוח הדחייה. במילים אחרות: הכוח השקול הפועל על הטיפה הוא כוח משיכה כלפי הכדור, ולכן הטיפות הניטרליות נמשכות לכדור.

<u>דגשים דידקטיים:</u>

(1) ניתן למצוא הדגמות רבות למשיכה של גופים ניטרליים לגופים טעונים, כולל המלצות להתנסות בכיתה ובבית, בקורס "הכנה לבגרות בפיזיקה - חשמל" ב-CampusIL, פרק 1.1.1 "סרטוני מבוא בסיסיים", סרטון 1 "מבוא לכוח חשמלי ומטען חשמלי – חלק א"; הסבר מפורט לתופעה מוצג באותו פרק בסרטון 3 "השראה אלקטרוסטטית". אנו ממליצים למורים לעשות שימוש בחומרי הוראה אלה.

(2) בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלו מספר שגיאות נפוצות לסעיף זה: (1) אי-הבחנה בין כוח לבין תנועה, נבחנים טענו שהטיפה הניטראלית ממשיכה בהתמדה לעבר הכדור הטעון ולכן היא נמשכת אליו (מבלי לתת את הדעת על כך ש"נמשכת" משמע פועל כוח, ולא רק שהטיפה נעה בכיוונו); (2) נבחנים התייחסו ל"ניטראלי" כאל סוג מטען, וטענו שמטענים מסוגים שונים (קרי, ניטראלי וחיובי) מושכים זה את זה; (3) התייחסות לכך שהטיפה הניטראלית מורכבת ממטענים חיוביים ושליליים, וטענה שעל המטענים השליליים פועל כוח משיכה, בהתעלמות מוחלטת מכך שעל המטענים החיוביים פועל כוח דחייה[2].
אנו ממליצים למורים לחדד את החשיבות שבשלמות הטיעון ולהדגיש שטיעון נכון אך חלקי אינו תקף. בנוסף, מומלץ לקשר בין העקרונות הפיזיקליים הבסיסיים של משיכה ודחייה (גם בגופים ניטראליים לא נקודתיים) ובין חוק קולון, בכדי לחזק אצל התלמידים את ההבנה הפיזיקלית על האינטראקציה בין מטענים.

[2] בחלק מהמקרים טענה זו נטענה גם בקרב תלמידים שהתייחסו נכונה לקיטוב המתרחש בטיפה הניטראלית, והדבר מדגיש את הצורך בכתיבת טיעון מלא תוך התייחסות לשני ההיבטים: קיטוב, ומרחק.

שאלה 2

<u>סעיף א</u>

הפוטנציאל החשמלי הנוצר באזור שמחוץ לכדור זהה לפוטנציאל החשמלי הנוצר על ידי מטען נקודתי הממוקם במרכז הכדור, $V = \frac{kQ}{r}$, לכן:

$$Q = \frac{Vr}{k} = \frac{120 \cdot 0.15}{9 \cdot 10^9} = 2 \cdot 10^{-9} C = 2nC$$

<u>סעיף ב</u>

הכוח היחיד הפועל על הפרוטון ממרחק גדול מאוד (אין-סוף) ועד הקליפה הכדורית הוא כוח דחייה חשמלית מהקליפה הכדורית, שהוא כוח משמר. לכן, האנרגיה המכנית נשמרת:

$$E_\infty = E_{\text{קליפה}}$$

המהירות המינימלית שיש להעניק לפרוטון היא כזו המאפשרת לו להגיע לשפת הקליפה כשהוא במנוחה. לכן, במרחק גדול מאוד יש לפרוטון רק אנרגיה קינטית, ועל שפת הקליפה יש אנרגיה פוטנציאלית חשמלית $U = eV_R$ בלבד ($V_R = \frac{kQ}{R}$), לכן:

$$\frac{1}{2} m_p v_0^2 = \frac{kQe}{R} \quad \Rightarrow \quad v_0 = \sqrt{\frac{2kQe}{m_p R}}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-9} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{1.67 \cdot 10^{-27} \cdot 0.1}} = 1.86 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$$

<u>דגשים דידקטיים:</u> בניתוח תשובות הנבחנים בבחינות הבגרות עלו שתי נקודות חשובות:

(1) מרבית הנבחנים שענו תשובה נכונה רשמו את המהירות המתקבלת במספר מאוד לא סביר של ספרות משמעותיות (10 ספרות משמעותיות, כפי שמתקבל במחשבון). חשוב להדגיש לתלמידים את המשמעות הפיזיקלית של ספרות משמעותיות ולעודד אותם לרשום ערכים בצורה תקינה. נדגיש שרישום תשובה עם מספר לא סביר של ספרות משמעותיות עלול להוביל לפגיעה בציון.

(2) חלק לא מבוטל מהנבחנים ביצעו טעות הצבה, וקיבלו מהירות גדולה ממהירות האור. רובם המוחלט לא ביצע תהליך בקרה על התשובה ולא התייחס לכך שתשובה זו לא הגיונית מבחינה פיזיקלית. חשוב לעודד את התלמידים לתהליך בקרה על תשובותיהם, ולהנחות אותם <u>להתייחס לכך</u> במידה ויש צורך. נדגיש שאי-התייחסות לתשובה לא הגיונית מבחינה פיזיקלית עלולה להוביל לפגיעה בציון.

סעיף ג

סך המטען החשמלי במערכת לא השתנה, לכן, זמן רב לאחר החיבור:

$$Q_1' + Q_2' = Q_1 + Q_2 = 2nC + 10nC = 12nC$$

המטען החשמלי עובר בין שני הכדורים מכיוון שיש הפרש פוטנציאלים בין הכדורים. לכן, מעבר המטענים יסתיים כאשר הפוטנציאל על פני כל כדור יהיה שווה: $\frac{kQ_1'}{R_1} = \frac{kQ_2'}{R_2}$

נבודד את Q_2' ונקבל: $Q_2' = \frac{R_2}{R_1}Q_1' = \frac{60cm}{10cm}Q_1' = 6Q_1'$

נציב לביטוי שהתקבל מתוך חוק שימור המטען החשמלי:

$$Q_1' + 6Q_1' = 12nC \quad \Rightarrow \quad 7Q_1' = 12nC \quad \Rightarrow \quad Q_1' = 1.714nC$$

ולכן, המטען על מעטפת ב' זמן רב לאחר החיבור:

$$Q_2' = 10.286\ nC$$

דגש דידקטי: ניתן למצוא בקורס "הכנה לבגרות בפיזיקה - חשמל" ב-CampusIL סרטוני הסבר בפרק 1.6.3 "חיבור מוליכים באמצעות מוליך נוסף", ותרגילים מגוונים בפרק 1.6.4 "חיבור כדורים מוליכים", לצורך ההוראה של נושא זה.

סעיף ד

תשובה: כ-1.788 מיליארד אלקטרונים עברו ממעטפת ב' למעטפת א'.

נימוק: זמן רב לאחר החיבור, המטען החיובי על פני מעטפת ב' גדל ב-$\Delta Q = 0.286nC$ והמטען החיובי על פני מעטפת א' קטן באותו שיעור. מכיוון שמטען האלקטרון הוא שלילי, המשמעות היא שאלקטרונים עברו ממעטפת ב' אל מעטפת א'. מספר האלקטרונים שעברו מקיים:

$$Ne = \Delta Q \quad \Rightarrow \quad N = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{0.286 \cdot 10^{-9}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 1.788 \cdot 10^{9}$$

סעיף ה

אלמלא המרחק בין המעטפות היה גדול מאוד, היה מתקבל מצב בו מעטפת א' יוצרת פוטנציאל חשמלי שאינו אפסי על פני מעטפת ב', ולהיפך. במצב זה, צפיפות המטען החשמלי על פני כל אחת מן הקליפות לא תהייה אחידה. משתי סיבות אלה (תרומה הדדית לפוטנציאל על כל שפה, והתפלגות מטען לא אחידה) לא ניתן להשתמש בקשר $V = \frac{kQ}{R}$ עבור הפוטנציאל על שפת הקליפה. לכן, ביטוי המשתמש בנוסחה זו עבור התנאי להשוואת הפוטנציאל כעבור זמן רב מרגע החיבור, כפי שנעשה בסעיף ג', אינו אפשרי.

שאלה 3

<u>סעיף א</u>

<u>תשובה:</u> לרכיב A יש התנגדות קבועה.

<u>נימוק א (הגדרת התנגדות):</u> התנגדות מוגדרת על פי היחס בין המתח לבין הזרם, $R = \frac{V}{I}$. ניתן לראות שבין הזרם והמתח יש <u>יחס ישר</u> עבור רכיב A, כלומר: $I = AV$ כאשר A מספר קבוע. לכן:

$$R_A = \frac{V}{I} = \frac{V}{AV} = \frac{1}{A} = constant$$

רכיב B מתאר יחס <u>לא ישר</u> בין הזרם ובין המתח. לכן התנגדותו אינה קבועה.

<u>נימוק ב (גרפית):</u> ההתנגדות <u>בכל ערך של מתח</u> מתוארת על ידי ההופכי לשיפוע המיתר שמחבר כל נקודה בגרף עם ראשית הצירים, $R = \frac{V}{I} = \frac{V-0}{I-0}$. ניתן לראות שהיות שגרף A הוא ישר ועובר בראשית הצירים, יחס זה הינו קבוע. עבור גרף B, שאינו לינארי, יחס זה אינו קבוע, שכן לכל נקודה יש שיפוע שונה למיתר המחבר אותה לראשית הצירים.

<u>סעיף ב</u>

נמצא את ההתנגדות של רכיב A על ידי נקודה כלשהי מתוך הגרף, למשל: $(3.0\ ,\ 0.6)$:

$$R_A = \frac{3.0}{0.6} = 5\ \Omega$$

התלות של ההתנגדות בפרמטרים של התיל היא:

$$R_A = \rho\frac{\ell}{A}$$

$$\rho = \frac{R_A A}{\ell} = \frac{5 \cdot 0.45 \cdot (10^{-3})^2}{2} = 1.125 \cdot 10^{-6}\ \Omega m$$

<u>סעיף ג</u>

היות ששני הרכיבים מחוברים בטור, זורם דרכם אותו זרם. נתון בנוסף שהמתח על כל אחד מן הרכיבים זהה. התרחיש היחיד בו על שני הרכיבים יש אותו מתח וזורם דרכם אותו זרם הוא התרחיש המתאים לנקודת החיתוך של גרפי האופיין של שני הרכיבים. שהיא: $(2.3\ ,\ 0.46)$. כלומר, המתח על כל אחד מן הרכיבים הוא $2.3V$ והזרם במעגל הוא $0.46A$.
כאמור, שני הרכיבים מחוברים בטור, ולכן מתח ההדקים במעגל הוא סכום המתחים, כלומר $4.6V$.

$$V_{MN} = 4.6V$$

<u>דגש דידקטי:</u> בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלה שמספר לא מבוטל של נבחנים התייחסו <u>ללא הצדקה</u> לכך שנקודת החיתוך בין הגרפים היא היחידה שיכולה לייצג את מצב הזרם והמתח על כל רכיב, כמעין טענה מובנת מאליה. חשוב להדגיש לתלמידים שהגרפים <u>אינם</u> חייבים לחתוך זה את זה בכדי לייצג תרחיש פיזיקלי (למשל: בסעיף ד' בשאלה זו המתח על כל רכיב שווה והזרם דרך כל רכיב שונה, דבר הבא לידי ביטוי בנקודות <u>שונות</u> בגרפים, במקום בנקודת החיתוך). לעניינו של סעיף זה, הטענה שהזרם דרך הרכיבים חייב להיות שווה לאור החיבור הטורי, היא הכרחית לצורך שלמות הטיעון.

<u>סעיף ד</u>

המתח על רכיב A שווה למתח על רכיב B שכן הם מחוברים במקביל זה לזה. נמצא את הזרם דרך כל אחד מהם: מכיוון שרכיב A הוא רכיב אוהמי (התנגדותו קבועה), נוכל לחשב את הזרם דרכו:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{3.5}{5} = 0.7A$$

על פי האופיין של רכיב B, כאשר המתח הוא $3.5V$ אזי הזרם דרך הרכיב הוא $0.52A$. הזרם דרך מקור המתח הוא סכום הזרמים, ולכן $I = 1.22A$.

<u>דגש דידקטי:</u> בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלה שחלק לא מבוטל מהנבחנים ביצעו חישובים המתייחסים להתנגדות במעגל ולחוק אוהם (בין אם בהתייחס לכך שרכיב B בעל התנגדות משתנה ובין אם תחת ההנחה השגויה שהתנגדותו קבועה). הדבר אינו הכרחי ומוביל לניצול לא מיטבי של זמן הבחינה, שכן ניתן לחלץ את המתח והזרם על כל רכיב ישירות מתוך הגרף. אנו ממליצים למורים להקנות לתלמידיהם כלים להסקת מידע בדרכים שונות מסכמות חשיבה מוכרות (למשל: על ידי גיוון בדרכי הייצוג בבעיות הנפתרות בכיתה), כדי להימנע מביצוע חישובים טכניים ארוכים ומיותרים במידת האפשר.

<u>סעיף ה</u>

הקשר בין מתח ההדקים והזרם נתון לפי: $V = \varepsilon - Ir$. המעגל בתרשים 2 והמעגל בתרשים 3 מהווים שני תנאים שונים לשימוש בקשר זה, מכיוון שידוע הזרם דרך הסוללה ומתח הדקיה בכל אחד מהמעגלים:

$$\begin{cases} V_2 = \varepsilon - I_2 r & \Rightarrow \quad 4.6 = \varepsilon - 0.46r \\ V_3 = \varepsilon - I_3 r & \Rightarrow \quad 3.5 = \varepsilon - 1.22r \end{cases}$$

מתוך חיסור בין המשוואות נוכל למצוא את ההתנגדות הפנימית:

$$V_2 - V_3 = (I_3 - I_2)r$$

$$r = \frac{V_2 - V_3}{I_3 - I_2} = \frac{4.6 - 3.5}{1.22 - 0.46} = \frac{1.1}{0.76} = 1.45\ \Omega$$

נציב לאחת המשוואות בכדי למצוא את הכא"מ:

$$V_2 = \varepsilon - I_2 r$$

$$\varepsilon = V_2 + I_2 r = 4.6 + 0.46 \cdot \frac{1.1}{0.76} = 5.27\ V$$

סעיף ו

תשובה: המתח שנמדד עם וולטמטר לא אידיאלי קטן מהמתח שנמדד עם וולטמטר אידיאלי.

נימוק: נניח בשלילה שהוריית הוולטמטר הלא אידיאלי גדולה מהוריית וולטמטר אידיאלי, משמעות הדבר היא שדרך רכיב A זורם זרם גדול יותר מאשר המקרה בו הוולטמטר אידיאלי. לכן, גם דרך רכיב B זורם זרם גדול יותר, ובאופן דומה הזרם דרך הסוללה גדול יותר.
על פי גרפי האופיין של הרכיבים, בעבור זרם גדול יותר מתקבל שהמתח על כל אחד מהם (בנפרד) גדל, וכתוצאה מכך מתח ההדקים גדל. אולם, כאשר הזרם דרך הסוללה גדל, מתקבל דווקא שמתח ההדקים קטן. הגענו לסתירה ולכן לא ייתכן שהוריית הוולטמטר הלא אידיאלי גדולה יותר.

נניח בשלילה שהוריית הוולטמטר הלא אידיאלי שווה להוריית הוולטמטר האידיאלי, משמעות הדבר היא שדרך רכיב A זורם זרם השווה למקרה בו הוולטמטר אידיאלי. אולם, היות שהוולטמטר לא אידיאלי, זורם דרכו זרם שאינו אפסי. לכן הזרם דרך רכיב B עדיין גדול יותר מאשר המקרה בו הוולטמטר אידיאלי, ובאופן דומה גם הזרם דרך הסוללה.
באופן דומה, על פי גרפי האופיין של הרכיבים, מתקבל שהמתח על רכיב B גדל והמתח על רכיב A לא השתנה. מכאן שמתח ההדקים במעגל גדל. אולם, כאשר הזרם דרך הסוללה גדל, מתקבל דווקא שמתח ההדקים קטן. הגענו לסתירה ולכן לא ייתכן שהוריית הוולטמטר הלא אידיאלי שווה.

האפשרות היחידה היא אפוא, שהוריית הוולטמטר הלא אידיאלי קטנה יותר.

דגשים דידקטיים:

(1) הוספת וולטמטר שאינו אידיאלי משנה את ההתנגדות הכללית במעגל, וכתוצאה מכך משנה את הזרם במעגל, וכתוצאה מכך משתנה ההתנגדות של רכיב B באופן שלא ניתן לחזות מראש. לכן, על מנת לנסח נימוק פיזיקלי מלא, יש הכרח להתייחס לכל האפשרויות השונות להוריית הוולטמטר. לא ניתן לחזות מראש האם הוריית הוולטמטר קטנה, גדלה או לא משתנה מבלי לפסול את כל האפשרויות האחרות. על כן, למרות שטיעון על דרך השלילה אינו נפוץ, במקרה זה הוא נדרש.

(2) בניתוח תשובות הנבחנים בבחינות הבגרות עלה שמרבית הטיעונים הניחו (באופן סמוי או גלוי) שהתנגדות רכיב B נשארת קבועה, גם לאחר הוספת וולטמטר לא אידיאלי, והקבילו את הבעיה למעגל עם נגדים קבועים אשר נוסף לו וולטמטר לא-אידיאלי (המהווה למעשה נגד נוסף). כיוון שהתנגדות רכיב B אינה קבועה, דפוסי מענה כאלה אינם הולמים ועשויים להוביל למסקנה שגויה.

(3) בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלה שחלק מהנבחנים נשענו בתשובתם על טיעונים המתעלמים מההשפעה ההוליסטית של שינוי נקודתי במעגל על כל חלקיו. למשל: התייחסות לכך שחלק מהזרם עובר דרך הוולטמטר, וטענה שכתוצאה מכך הזרם דרך רכיב A קטן (תחת ההנחה הסמויה והשגויה שהזרם בשני המקרים זהה), ולכן לפי חוק אוהם המתח על רכיב A קטן.

אנו ממליצים למורים לדון עם תלמידיהם בכיתה על ההשפעות הרחבות שיש לשינויים במעגלים חשמליים על כל רכיבי המעגל, ובפרט לדון על המורכבות הרבה שיש במעגל זה, הבאה לידי ביטוי באופן מיוחד בהיותו של רכיב B לא-אוהמי. יש להתייחס לכל מרחב האפשרויות על מנת לענות בצורה מלאה.

שאלה 4

<u>סעיף א</u>

הקשר בין הכא"מ לבין מתח ההדקים הוא: $V = \varepsilon - Ir$, מתח ההדקים הוא המתח על החלק הפעיל בנגד R_{MS} ולכן $V = IR_{MS}$. מכאן ש:

$$IR_{MS} = \varepsilon - Ir$$

$$R_{MS} = \frac{\varepsilon}{I} - r$$

<u>סעיף ב</u>

ניתן לראות שהגרף הוא לינארי. הקשר בין R_{MS} לבין $\frac{1}{I}$ הוא לינארי: $R_{MS} = \varepsilon\frac{1}{I} - r$, לכן שם הציר האופקי הוא $\frac{1}{I}$ ויחידותיו הן $\frac{1}{A}$.

<u>סעיף ג</u>

נמצא את משוואת ישר קו המגמה בעזרת שתי נקודות מקו המגמה: $(0.76\,,16)$ ו- $(0.26\,,4.4)$:

$$A = \frac{16 - 4.4}{0.76 - 0.26} = \frac{11.6}{0.5} = 23.2\,\Omega A = 23.2\,V$$

<u>הערה:</u> עקב קושי בקריאת נקודות מהגרף, כל תשובה בתחום $21\,V \le A \le 25\,V$ תתקבל כנכונה, ובהתאם לכך כל החישובים בסעיף זה ובסעיפים הבאים העושים שימוש בתוצאה זו.

את נקודת החיתוך עם הציר האנכי נמצא בעזרת נקודה ושיפוע הגרף:

$$y = mx + b \quad \rightarrow \quad b = y - mx = 16 - 23.2 \cdot 0.76 = -1.63\,\Omega$$

<u>הערה:</u> באופן דומה, כל תשובה בתחום $1.4\,\Omega \le b \le 2.0\,\Omega$ תתקבל כנכונה, ובהתאם לכך כל החישובים בסעיף זה ובסעיפים הבאים העושים שימוש בתוצאה זו.

(1) המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא כא"מ מקור המתח, ולכן:

$$\varepsilon = 23.2\,V$$

(2) המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך עם הציר האנכי היא $-r$ ולכן:

$$r = 1.63\,\Omega$$

<u>סעיף ד</u>

על פי הגרף, כאשר ההתנגדות היא $R_{MS} = 10\Omega$, ההופכי לזרם הוא $\frac{1}{I} = 0.5$ ולכן:

$$I = \frac{1}{0.5} = 2A$$

מכאן שההספק החשמלי המתפתח בנגד המשתנה הוא:

$$P_{MS} = V_{MS}I_{MS} = I^2R_{MS} = 2^2 \cdot 10 = 40\ W$$

<u>סעיף ה</u>

<u>תשובה:</u> הנצילות גדולה יותר בערך הקטן יותר של הזרם.

<u>נימוק א (הגדרת נצילות):</u> נצילות המעגל היא $\eta = \frac{P_{\text{מנוצל}}}{P_{\text{מושקע}}} = \frac{VI}{\varepsilon I} = \frac{V}{\varepsilon}$ כאשר V מתח ההדקים, שהוא המתח על הנגד R_{MS}, מתח ההדקים גדול יותר, כאשר עוצמת הזרם במעגל קטנה יותר, לפי $V = \varepsilon - Ir$. לכן, הנצילות גדולה יותר כאשר הזרם קטן יותר.

<u>נימוק ב (הספק מושקע):</u> בשני המקרים ההספק המנוצל זהה, אך במקרה בו הזרם גדול יותר, ההספק המושקע שהוא $P_{\text{מושקע}} = \varepsilon I$ גדול יותר. לכן, הנצילות קטנה יותר כאשר הזרם גדול יותר.

שאלה 5

<u>סעיף א</u>

כיוון הכוח נקבע על פי כלל יד ימין: כיוון המהירות (אצבעות) הוא שמאלה. כיוון השדה המגנטי (יוצא מכף היד) הוא למטה. לכן, כיוון הכוח (אגודל) הוא בכיוון יוצא מהדף.

את גודל הכוח נמצא על ידי $F = qvB$:

$$F = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{6} \cdot 0.02 = 3.2 \cdot 10^{-15}\ N$$

<u>דגש דידקטי:</u> בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלה שמספר רב של נבחנים לא פירט את אופן השימוש בכלל יד ימין, וחלק מהם אף לא ציינו אותו בתשובתם. חשוב להדגיש שלצורך מענה מלא, יש לתאר את אופן השימוש בכלל יד ימין. חוסר תיאור שכזה עלול להוביל לפגיעה בציון. בכל שימוש בכלל יד ימין, יש לפרט באופן מלא את אופן השימוש בו, כפי שמודגם בפתרון.

<u>הערה:</u> יש יותר מאופן שימוש אפשרי אחד של כלל יד ימין, ואין הסכמה מקובלת לגבי "ה-"שימוש הנכון (בה"א הידיעה). מעבר לכך, חלק מהתלמידים מכירים את הכלל כ-"כלל יד שמאל", עם ההתאמות הנדרשות. <u>זו הסיבה העיקרית</u> לכך שחשוב לפרט את אופן השימוש (מענה "לפי כלל יד ימין" ללא פירוט אינו מעיד דבר על הידע של הנבחנים). יודגש כי אופן השימוש עצמו הוא שעליו נבחנים התלמידים, וכל תשובה נכונה על הקשר בין כיווני הווקטורים תזכה בניקוד מלא.

<u>סעיף ב</u>

(1) הכוח המגנטי הוא כוח מרכזי, על פי החוק השני של ניוטון: $\Sigma F = ma_r = m\frac{v^2}{R}$, לכן:

$$qvB = \frac{mv^2}{R_1}$$

$$R_1 = \frac{mv}{qB} = \frac{1.67 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{6}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.02} = 0.522m = 52.2cm$$

(2) נמצא ביטוי לזמן המחזור באמצעות ביטוי לרדיוס, ו- $v = \frac{2\pi R}{T}$:

$$R_1 = \frac{m}{qB} \cdot \frac{2\pi R_1}{T_1}$$

$$T_1 = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.02} = 3.28\ \mu s$$

סעיף ג

בכדי שהפרוטונים ינועו בקו ישר, דרוש לפי החוק הראשון של ניוטון שסכום הכוחות הפועלים עליהם הוא אפס, $\Sigma F = 0$. כיוון הכוח המגנטי הוא יוצא מהדף, לכן כיוון הכוח החשמלי חייב להיות לתוך הדף. פרוטונים טעונים במטען חיובי ולכן הכוח החשמלי הפועל עליהם הוא בכיוון השדה. מכאן שהשדה החשמלי E מכוון לתוך הדף. נמצא את גודלו:

$$\Sigma F = qvB - qE = 0$$

$$E = vB = 10^6 \cdot 0.02 = 2 \cdot 10^4 \frac{N}{C}$$

דגש דידקטי: בניתוח תשובות הנבחנים לבחינת הבגרות עלה שמספר התייחסו לכיווני השדות מבלי להתייחס לכיווני הכוחות, ולכך שכיוון הכוח החשמלי הוא ככיוון השדה עקב היותו של פרוטון חיובי. חשוב להדגיש לתלמידים את הצורך בשלמות הטיעון ובהתייחסות לכל ההיבטים הרלוונטיים. הסקה על כיוון השדה על ידי כיוון הכוח מחייבת התייחסות לסימן המטען.

סעיף ד

כוח מגנטי תמיד פועל במאונך לכיוון המהירות ובמאונך לכיוון השדה. מכאן שלא פועל על הפרוטונים רכיב בכיוון מקביל לשדה. מכיוון שלפרוטונים יש מהירות בכיוון זה (רכיב ווקטור המהירות שמקביל לשדה), אזי בכיוון זה תנועת הפרוטונים תהייה שוות-מהירות.

בכיוון מאונך לשדה, הפרוטונים יבצעו תנועה מעגלית קצובה במישור המאונך לשדה, היות שהכוח המגנטי תמיד מאונך לכיוון התנועה.

שילוב של שתי תנועות אלו, תנועה מעגלית במישור מאונך לשדה ותנועה במהירות קבועה במקביל לשדה, יוצר תנועה בורגית.

דגש דידקטי: פעם רבות בניסוח הסבר מילולי, תלמידים מציגים פרשנות חלקית או ניסוח במילים אחרות במקום לספק הסבר. בדרך כלל תשובות שכאלה מזכות בניקוד חלקי, אם בכלל. במקרה הנוכחי, לאור הרמז בשאלה, תשובות שכאלה אינן הולמות ואינן מזכות בנקודות. אנו ממליצים למורים לשים דגש מיוחד על כתיבת טיעון שלם, במיוחד בסעיף זה, שלא מותיר הרבה מקום לטיעונים חלקיים.

סעיף ה

החיישן מודד רק את הרכיב המקביל לחיישן של השדה המגנטי. מכאן שכאשר הוריית החיישן מקסימלית, היה החיישן מכוון במקביל לשדה המגנטי. הזווית בין החיישן לקרקע במצב זה היא הזווית בין השדה המגנטי לבין הקרקע, וקריאת החיישן היא עוצמת השדה המגנטי.

ניתן לראות בגרף שקריאת החיישן מרבית כאשר $\alpha = 48°$ וקריאת החיישן במצב זה היא $50mT$,
ולכן עוצמת השדה המגנטי היא $B_2 = 50mT = 0.05T$, כיוון השדה המגנטי הוא $48°$ יחסית לקרקע.

<u>הערה:</u> עקב קושי בקריאת ערכי הציר האופקי בנקודות מהגרף, כל תשובה בתחום $44° \leq \alpha \leq 52°$ תתקבל כנכונה.

שאלה 6

<u>סעיף א</u>

מכיוון שהמוט נותר במנוחה, על פי החוק הראשון של ניוטון, $\Sigma F = 0$. על המוט פועלים בכיוון האופקי שני כוחות בלבד: מתיחות החוט, וכוח מגנטי. על כן, הכוח המגנטי (אגודל) מכוון שמאלה, והוא שווה בגודלו למתיחות. כיוון הזרם (אצבעות) במוט הוא מ-C ל-D, מההדק החיובי של הסוללה לשלילי. לכן, לפי כלל יד ימין, הכיוון של השדה המגנטי (יוצא מכף היד) הוא כלפי מטה.

<u>דגש דידקטי:</u> בדומה לשאלה 5 סעיף א', הדגש שתואר לגבי אופן השימוש בכלל יד ימין תקף גם כאן.

<u>סעיף ב</u>

גם המשקולת במנוחה, ולכן כוח המתיחות הוא $T = mg$. הביטוי לכוח המגנטי הוא $F_B = BI\ell$.
על פי שקול הכוחות הפועלים על המוט CD:

$$\Sigma F = F_B - T = 0$$
$$BI\ell = mg$$

נשים לב שהזרם דרך המוט CD הוא $I = \frac{\varepsilon}{r}$ משום שההתנגדות הפנימית של הסוללה הוא מקור ההתנגדות היחידי במעגל. לכן:

$$m = \frac{BI\ell}{g} = \frac{B\varepsilon\ell}{rg}$$

<u>סעיף ג</u>

<u>דרך א (כא"מ מושרה במוט)</u>: כאשר המוט בתנועה, נוצר בין קצותיו כא"מ מושרה התלוי במהירות המוט $\varepsilon = B\ell v$. כא"מ מושרה זה יוצר זרם מושרה השווה ל- $I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B\ell v}{R}$.

<u>דרך ב (חוק פאראדיי)</u>: כאשר המוט בתנועה, שטח המסגרת התחומה ע"י המוט והמסילה גדל, בעוד השדה המגנטי נשאר קבוע. לכן, נוצר שינוי בשטף המגנטי דרך המסגרת, וכתוצאה מכך לפי חוק פאראדיי נוצר כא"מ מושרה במסגרת. כא"מ מושרה זה יוצר זרם מושרה השווה ל- $I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1}{R}\frac{d\phi_B}{dt}$.

<u>סעיף ד</u>

ככל שמהירות המוט גדלה, גדל הכא"מ המושרה, שמגדיל את הזרם המושרה. על המוט פועל כוח מגנטי, התלוי בזרם המושרה, המקטין את תאוצתו. כאשר המוט נע מספיק מהר, הכוח המגנטי משתווה למתיחות, והמוט מפסיק להאיץ. במצב זה:

$$\Sigma F = BI\ell - T = 0$$

נזכור ש- $T = mg$ וש- $I = \frac{B\ell v}{R}$ ונקבל ביטוי למהירות:

$$B\frac{B\ell v}{R}\ell = mg$$

$$v = \frac{mgR}{B^2\ell^2}$$

נציב את הנתונים:

$$v = \frac{0.05 \cdot 10 \cdot 7.2}{1.8^2 \cdot 0.8^2} = 1.74\frac{m}{s}$$

<u>סעיף ה</u>

<u>דרך א (כא"מ מושרה במוט):</u> המוט נע שמאלה (אצבעות), והשדה המגנטי מכוון כלפי מטה (יוצא מכף היד). לכן, על פי כלל יד ימין, כיוון הכוח (אגודל) שיפעל על מטען חיובי במוט הוא לכיוון הקצה D. משמע, המוט מהווה מקור כא"מ מושרה שהקצה D הוא ההדק החיובי שלו. זרם מושרה זורם נגד כיוון מחוגי השעון, ובמוט הזרם זורם מ-C ל-D.

<u>דרך ב (חוק לנץ):</u> שטח המסגרת גדל, בעוד עוצמת השדה קבועה. לכן, השטף המגנטי דרך המסגרת גדל לתוך המסגרת. לפי חוק לנץ, ייווצר במסגרת זרם מושרה המתנגד לסיבת היווצרותו, קרי, זרם היוצר שדה מגנטי מושרה המכוון החוצה מהמסגרת. לפי כלל הבורג, שדה מושרה זה (אגודל) נוצר על ידי זרם מושרה המכוון נגד כיוון מחוגי השעון (אצבעות). כלומר: במוט הזרם זורם מ-C ל-D.

מעבדת חקר

חלק א: מציאת הערך של תאוצת הנפילה החופשית g באמצעות מטוטלת

הפתרון המוצג מסתמך על תוצאות המדידות כפי שהופיעו בשאלון חקר תשפ"ו. במדידות התלמידים בפועל בעת ביצוע הניסוי עשויות להתקבל כמובן תוצאות בטווח מסוים, ובהתאם לכך הערכים המחושבים, שיפועי גרפים, וכיוצא בזאת.

שאלה 1

תשובה: אפשרות ב.

נימוק: במטוטלת מתמטית מניחים שהמסה נקודתית. ניתן להתייחס לכדור כאל מסה נקודתית הממוקמת במרכז הכדור (ניתן להניח שצפיפות המסה בכדור אחידה).

שאלה 2

סעיף א

$T[s]$	$10T_3[s]$	$10T_2[s]$	$10T_1[s]$	$L[m]$
1.10	10.98	11.01	11.08	0.30

הערות: (1) תוצאות המדידות של L ו-$10T$ נכתבו עם יותר מ-3 ספרות משמעותיות, בהתאם לרמת הדיוק של מכשירי המדידה (מילימטר עבור הסרגל, מאית-שניה עבור שעון העצר). התוצאה המתקבלת של T מופיעה עם 3 ספרות משמעותיות כנדרש בשאלה; (2) כל תוצאה שאינה חורגת ב-12% מתוצאה זו (קרי, $0.97s \leq T \leq 1.23s$) מזכה בניקוד מלא.

סעיף ב

על פי נוסחה 1, הקשר בין זמן המחזור לתאוצת הנפילה החופשית הוא:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2 L}{g}$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 0.3}{1.10^2} = 9.79\frac{m}{s^2}$$

<u>דגש דידקטי:</u> בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלה שחלק מהנבחנים ביצעו מספר טעויות בולטות במדידות בשאלה זו: (1) מדידת זמן התנודות (חצי-זמן מחזור) במקום זמן מחזור שלם; (2) אי-חלוקה ב-10 כנדרש. טעויות אלה הובילו את הנבחנים לתוצאה לא סבירה <u>באופן חריג</u> עבור תאוצת הנפילה החופשית g. למרות זאת, הרוב המוחלט של הנבחנים לא הציגו שום תהליך בקרה על תשובתם החריגה. תהליך בקרה שכזה הוא <u>הכרחי</u> בבחינת מעבדה, שכן המטרה היא לאמת מודל פיזיקלי תיאורטי עם תוצאות המתקבלות בניסוי. במקרה של תוצאות חריגות, לא משנה מה סיבתן (ייתכן והמדידות או החישובים בוצעו בצורה לא תקינה, אך גם ייתכן שהמודל התיאורטי אינו תקף), <u>חובה</u> לתת על כך את הדעת.

שאלה 3

היתרון בהצעה של רונה הוא הקטנת אי-הוודאות <u>האקראית</u> ואי-הוודאות <u>היחסית</u>. כל מדידה טומנת בחובה אי-וודאות:

- את אי-הוודאות <u>היחסית</u> נקטין על ידי מדידת הזמן של 10 מחזורים ($\delta T = \frac{\delta(10T)}{10}$)
- את אי-הוודאות <u>האקראית</u> נקטין על ידי ביצוע מדידה זו 5 פעמים ומיצוע התוצאות (כפי שניתן להיווכח בשאלה 2 סעיף א', התוצאות שהתקבלו שונות במעט). לקיחת ממוצע מקטינה אי-וודאות אקראית מאחר ובסבירות גבוהה השפעת אי-הוודאות על הערך הנמדד מתבטאת בתוספת לעיתים שלילית ולעיתים חיובית (מיצוע "יקזז" תוספות אלה)

היתרון בהצעה של נעמי הוא חקירת הקשר בין אורך המטוטלת לזמן המחזור. מדידת זמן מחזור של מטוטלת אחת לא מאפשר לחקור את הקשר בין המשתנים, ללא קשר לכמות החזרות המתבצעות בכל מדידה. בהצעה של נעמי ניתן לבדוק את התוקף של נוסחה 1 ולהסיק על הערך של תאוצת הנפילה החופשית ממספר רב של מטוטלות.

חשוב להדגיש שההצעה של נעמי עדיפה, שכן היתרון בהצעה של רונה קטן בחשיבותו מאשר ההצעה של נעמי. ההקטנה המשמעותית ביותר של אי-הוודאות במדידה כבר מתבצעת על ידי מדידת הזמן של 10 מחזורים. למעשה, רונה מציעה למדוד את הזמן של 50 מחזורים במקום 10. הדבר אומנם יקטין פי 5 את אי-הוודאות, אך אי-הוודאות מספיק קטנה גם בהצעה של נעמי (אם נניח שזמן התגובה הוא כ- $\delta(10T) = 0.5s$, אז בהצעה של נעמי $\delta T = 0.05s$ בעוד בהצעה של רונה $\delta T = 0.01s$, בשתי ההצעות אי-הוודאות היחסית קטנה מ-5% יחסית לזמן הנמדד).
לעומת זאת, חקירת הקשר בין שני המשתנים מאפשרת לגלות מקורות נוספים של אי-וודאות שלא נלקחו בחשבון (למשל: אי-וודאות שיטתית במדידת אורך המטוטלת, או אי-קיום של חלק מהנחות המודל – דבר שיכול לבוא לידי ביטוי כאי-תוקף של הקשר הנחקר). ולכן הצעתה של נעמי עדיפה.

דגש דידקטי: בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלה שמספר רב של נבחנים משתמשים במושג "אי-וודאות" בצורה מעורפלת ולא קונקרטית. אנו ממליצים למורים לחדד בפני תלמידיהם את המושג "אי-וודאות", על שלל סוגיה, ולעודד אותם לענות בצורה מפורטת ומלאה.

שאלה 4

סעיף א

$$d = 0.15m$$

סעיפים ב-ג

מדידה מספר	$L[m]$	$10T_1[s]$	$10T_2[s]$	$10T_3[s]$	$T[s]$	
1	0.25	11.77	11.82	12.01	1.18	

הערה: באופן דומה, כל תוצאה שאינה חורגת ב-12% מתוצאה זו (קרי, $1.04s \leq T \leq 1.32s$) מזכה בניקוד מלא.

שאלה 5

סעיפים א-ג

מדידה מספר	$L[m]$	$10T_1[s]$	$10T_2[s]$	$10T_3[s]$	$T[s]$	$T^2[s^2]$
1	0.25	11.77	11.82	12.01	1.18	1.40
2	0.20	10.85	11.00	10.99	1.09	1.20
3	0.15	10.07	10.06	10.01	1.00	1.00
4	0.10	9.32	9.16	9.25	0.92	0.85
5	0.05	8.29	8.33	8.36	0.83	0.69

הערות: (1) העמודה השמאלית ביותר בטבלה (T^2) מולאה כחלק מהמענה על שאלה 6;
(2) התוצאות המוצגות בטבלה מבוססות על התוצאות שפורסמו בשאלון חקר (036382), בו ההנחיה הניתנה לנבחנים היא שנמדדו אורכים בתחום $0.05m \leq L \leq 0.25m$. הנחיה זו שונה מההנחיה בבחינת מעבדת חקר והיא לבחור ערכים בתחום $0.07m \leq L \leq 0.25m$. חשוב להבהיר שתלמידים המבצעים את הניסוי בפועל (בין אם בבחינת גברות זו ובין אם כתרגול בשנים הבאות) נדרשים לעמוד בהנחיה שניתנה בשאלון זה ולענות בהתאם;
(3) בדומה לשאלות 2 ו-4, גם כאן התאפשרה סטייה של עד 12% מבלי לפגוע בניקוד.

סעיף ד

(1) יש לבצע לפחות 5 מדידות על מנת שניתן להסיק בצורה מהימנה על תוקפו (או אי-תוקפו) של הקשר הנחקר בין T לבין L ושניתן יהיה לחלץ מתוך הגרף את הערך של תאוצת הנפילה החופשית; מצד שני, ביצוע של מספר רב מדי של מדידות עלול לגזול זמן רב שלא יאפשר לסיים את הניסוי (ואת הבחינה) בזמן. על כן הוחלט לבצע 5 מדידות.

(2) נבחר פיזור אחיד של ערכי L שכן כפי שיוצג בהמשך, זהו המשתנה המקיים קשר לינארי עם ריבוע זמן המחזור. פיזור לא אחיד עשוי לפגוע במהימנות המסקנות שיתקבלו מהגרף ועשוי לפגוע במסקנות על אודות קיומו או אי-קיומו של הקשר הנחקר (עקב ייצוג מופחת של ערכים בתחומים מסוימים). לכן נבחר פיזור אחיד.

<u>דגשים דידקטיים:</u> בניתוח תשובות הנבחנים בבחינת הבגרות עלו מספר קשיים מרכזיים:

(1) רוב הנבחנים הציגו פיזור אחיד של ערכי L בלי הסבר משכנע מדוע בחרו לעשות זאת. חשוב להדגיש שפיזור ערכים לא חייב להיות אחיד, ובמקרים בהם אין תלות לינארית בין משתנים, מומלץ אף לבחור פיזור לא אחיד. אנו ממליצים למורים לחדד בפני תלמידיהם את החשיבות שבבחירת הפיזור והשפעתו על יכולת הסקת המסקנות, ולא להישען על פיזור אחיד כמעין כלל-אצבע.

(2) חלק ניכר מהנבחנים בחר לבצע 10 מדידות, בהפרשים קבועים של $2cm$. הדבר מהווה מגבלה משמעותית בעמידה בזמני הבחינה, והתועלת שבביצוע 10 מדידות לעומת 5 קטנה באופן יחסי. אנו ממליצים למורים לעודד את תלמידיהם להפעיל שיקול דעת רחב בעת תיכנון ניסוי, ובמיוחד במעבדת חקר שבה הבחינה בודקת היבטים רחבים של הניסוי, הסקת מסקנות, שאלות על ניסויי חובה, וכל זאת בזמן מוגבל.

שאלה 6

<u>סעיף א</u>

על פי נוסחה 2:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2L+d}{2g}}$$

$$T^2 = 4\pi^2\left(\frac{2L+d}{2g}\right) = \frac{2\pi^2}{g}(2L+d)$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g}L + \frac{2\pi^2}{g}d$$

<u>סעיף ב</u>

<u>תשובה:</u> משתנה 2: T^2.

<u>נימוק:</u> על פי הקשר בסעיף א', אם נגדיר משתנים חדשים $y = T^2$ ו- $x = L$, נקבל שהקשר הנחקר הוא:

$$y = \frac{4\pi^2}{g}x + \frac{2\pi^2}{g}d$$

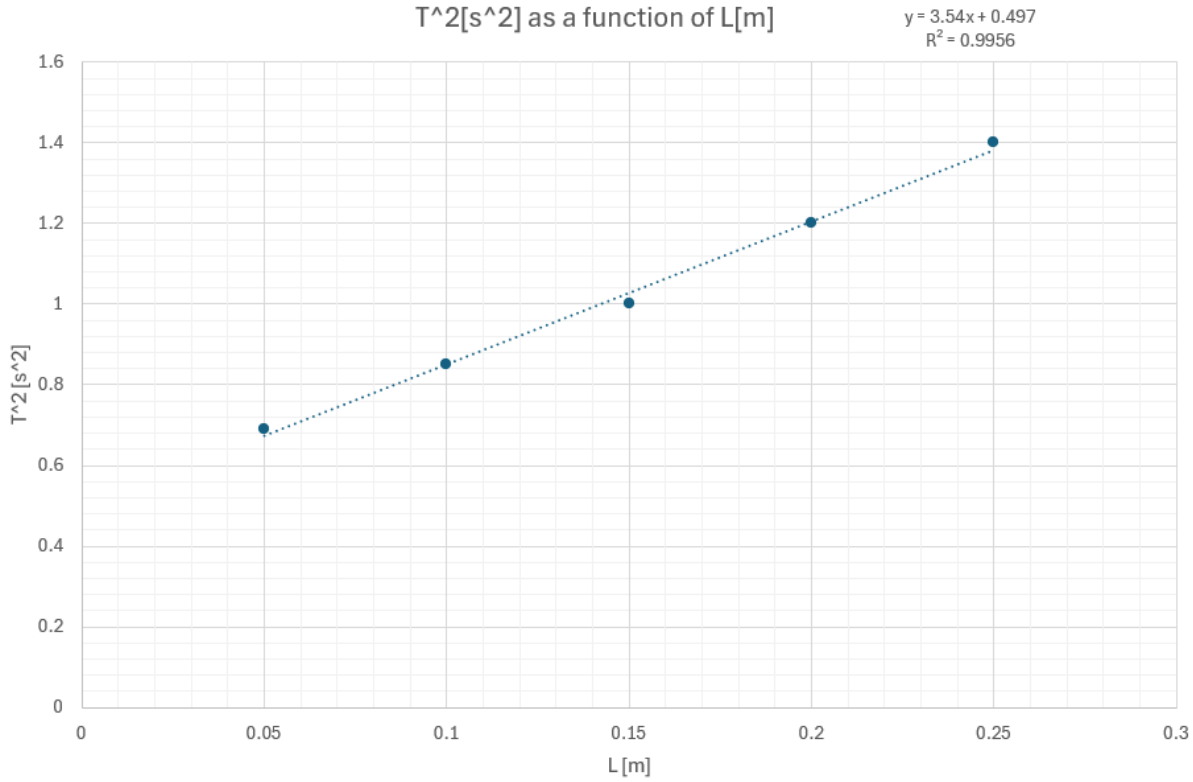
זהו קשר לינארי מהצורה $y = Ax + b$, כאשר המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא $A = \frac{4\pi^2}{g}$ והמשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך עם הציר האנכי היא $b = \frac{2\pi^2}{g}d$.

<u>סעיף ג</u>

מופיע בטבלה בשאלה 5.

שאלה 7

<u>סעיפים א-ב</u>



שאלה 8

על פי-משוואת הישר, שיפוע קו המגמה הוא $A = 3.54\frac{s^2}{m}$. המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הקו היא $A = \frac{4\pi^2}{g}$ וניתן למצוא באמצעותה את הערך של תאוצת הנפילה החופשית:

$$g = \frac{4\pi^2}{A} = \frac{4\pi^2}{3.54} = 11.15\frac{m}{s^2}$$

שאלה 9

ראשית, שתי התוצאות שהתקבלו בסדרות המדידות שונות באופן משמעותי זו מזו, כך שלא ניתן להסבירן על ידי מקורות אי-ודאות. ניתן להסיק מכך שהקשר הנחקר שפותח בשאלה 6 אינו תקף עבור (לפחות) אחת מהן. באופן ראשוני נראה שהמדידות בסדרה הראשונה מתאימות יותר לקשר הנחקר, לכן דרך ראשונה לשפר את הניסוי היא לבחור אורכי חוט שגדולים מהמוט המאריך, $L > d$.

שנית, על מנת שקשר זה יהיה תקף, בדומה למטוטלת מתמטית, דרוש להסיט את הכדור בזווית קטנה. כדי לשפר את הניסוי כדאי להסיט את הכדור בזוויות קטנות יותר.

שלישית, כדאי להקפיד שהחוט והמוט המאריך יהיו על אותו ישר. באופן הזה הנקודה הדמיונית שבמרכז המוט המאריך גם היא על אותו קו, שהוא המשך ישיר של החוט.

<u>דגש דידקטי:</u> תשובה מלאה לשאלה זו חייבת לכלול הצעות <u>קונקרטיות</u> תוך התבוננות בתוצאות המתקבלות והסקה ראשונית מהם (למשל: שהקשר תקף בתחום $L > d$ ולא תקף בתחום $L < d$). הצעות כלליות כמו "*הגדלת תחום המדידה*" או "*הקטנת אי-הוודאות*" הן תשובות שאינן מתייחסות לנתוני השאלה ולכן אינן הולמות כתשובה לשאלה זו ולא מעידות על הבנה.

שאלה 10

בשאלה 2 חושבה תאוצת הנפילה החופשית על סמך מדידה אחת של מטוטלת מתמטית. התקבל ערך קרוב לתאוצת הנפילה החופשית $g = 9.79\frac{m}{s^2}$ והדבר עשוי להעיד על התאמה בין המודל התיאורטי לתוצאות המתקבלות (קרי, ההשפעה של גורמי אי-וודאות היא קטנה באופן יחסי). לעומת זאת, בשאלה 8 התקבל ערך חריג לתאוצת הנפילה החופשית $g = 11.15\frac{m}{s^2}$. ההשפעה של גורמי אי-וודאות אינה יכולה להסביר פער כזה, לכן הדבר עשוי להעיד על אי-התאמה בין המודל התיאורטי לתוצאות המתקבלות.

מעבר לכך, על פי הקשר $T^2 = \frac{2\pi^2}{g}(2L + d)$ שפיתחנו בשאלה 6, ניתן להסיק כי המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך עם הציר <u>האופקי</u> היא $L = -\frac{d}{2}$, נמצא אותה על פי משוואת הישר שהתקבלה בשאלה 7:

$$T^2 = 3.54L + 0.497 \quad \Rightarrow \quad L = -\frac{0.497}{3.54} = -0.14m$$

כלומר:

$$-\frac{d}{2} = -0.14m \quad \Rightarrow \quad d = 0.07m$$

גם ערך זה חורג מאוד מערכו האמיתי של אורך המוט, והוא $d = 0.15m$.

לאור אי-ההתאמה בין ניבוי המודל לתאוצת הנפילה החופשית ולאורך המוט לבין התוצאות המתקבלות, ניתן להסיק שהקביעה לפיה מטוטלת דו-גופית התנהגה כמטוטלת מתמטית לא הייתה נכונה.

ייתכן שקביעה זו תהייה נכונה אם יתקיימו התנאים הבאים:

(1) אורך החוט יהיה גדול בהרבה מאורך המוט (כפי שנרמז בשאלה 9), $L \gg d$.

(2) זוויות התנודות קטנות (כמו במטוטלת מתמטית).

(3) הכדורים נעים יחד באותו קצב (החוט והמוט המאריך על אותו ישר).

חשוב להדגיש שתוצאות הניסוי מרמזות על תנאים אלה בלבד, בניסוי הנוכחי אין מספיק מידע אמפירי בכדי לקבוע באופן מובהק האם תחת תנאים אלה מטוטלת דו-גופית תתנהג כמו מטוטלת מתמטית.

שאלה 11

<u>סעיף א</u>

(1) ב-15 השניות הראשונות התקבלה תנועה לא מחזורית חסרת סדר, ללא קצב אחיד או מסלול קבוע.

(2) שתי דקות לאחר תחילת התנועה התקבלה תנועה מחזורית שבה שני הכדורים התנודדו יחד באותו הקצב.

<u>סעיף ב</u>

ניתן להסיק שהקביעה אינה נכונה כאשר הכדור התחתון מוסט בזווית גדולה השונה מזו של הכדור העליון. ניתן לראות שכאשר הזווית שונה, הכדורים לא מתנהגים כמטוטלת כלל, קרי תנועתם לא מחזורית. כאשר ניתן לכדורים זמן סביר "להסתדר" הם נעים יחד באופן מחזורי.
כאשר מסיטים את שני הכדורים יחד בזווית קטנה, הם נעים באופן מחזורי והתנהגות זו עשויה להיות דומה להתנהגות של מטוטלת מתמטית (יש כמובן לבדוק התאמה למודל התיאורטי המנבא את הקשר בין זמן המחזור לאורך המטוטלת כדי לקבוע זאת).

חלק ב: שאלות מניסויי החובה

בחלק זה סעיפים א-ב בשאלות 12-13 זהים. סעיפי ג בשתי השאלות אומנם שונים אך דומים זה לזה במהותם. הנבחנים נדרשו לענות על שאלות 12-13 יחסית לרשימה מוגדרת של ניסויי חובה בכל סדר שיבחרו. לכן, המענה על השאלות בחלק זה יחולק על פי ניסויי החובה במקום על פי החלוקה לשאלות ולסעיפים.

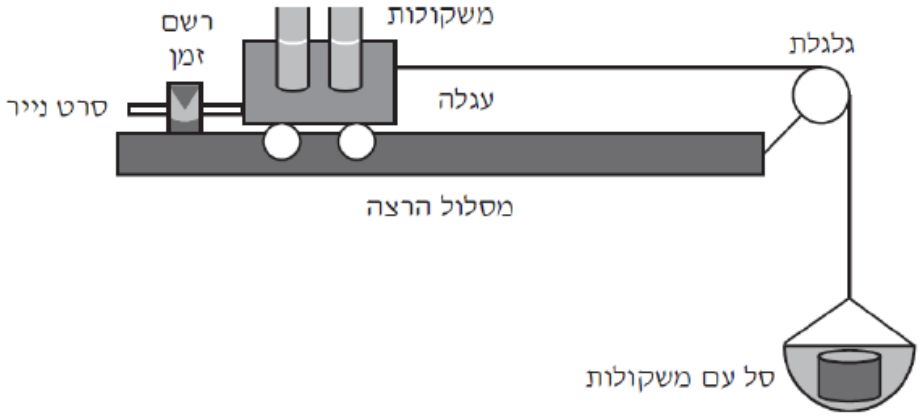
<u>דגש דידקטי:</u> בשאלה 13 סעיף ג' תלמידים נדרשו לסרטט גרף איכותי של תוצאות הניסוי. בניתוח תשובות נבחנים בבחינת הבגרות עלה שתלמידים רבים לא מבינים את המשמעות של "גרף איכותי" וסרטטו מערכת צירים עם שמות הצירים בלבד, ללא גרף. חשוב לחדד לתלמידים את המשמעות של המושג "גרף איכותי" ולחדד את ההבדל מגרף כמותי.

ניסוי 1: החוק השני של ניוטון

<u>סעיף א</u>

מטרת הניסוי היא אישוש החוק השני של ניוטון במערכת דו-גופית.

<u>סעיף ב</u>



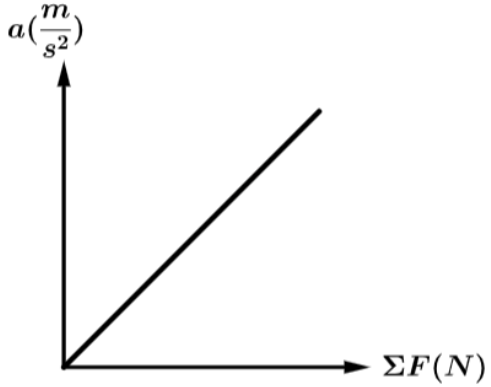
<u>סעיף ג (שאלה 12)</u>

<u>בחלק הראשון של הניסוי:</u> המשתנה הבלתי תלוי הוא הכוח והמשתנה התלוי הוא התאוצה. הגודל הקבוע הוא מסת המערכת.
<u>בחלק השני של הניסוי:</u> המשתנה הבלתי תלוי הוא המסה והמשתנה התלוי הוא התאוצה. הגודל הקבוע הוא הכוח.

סעיף ג (שאלה 13)

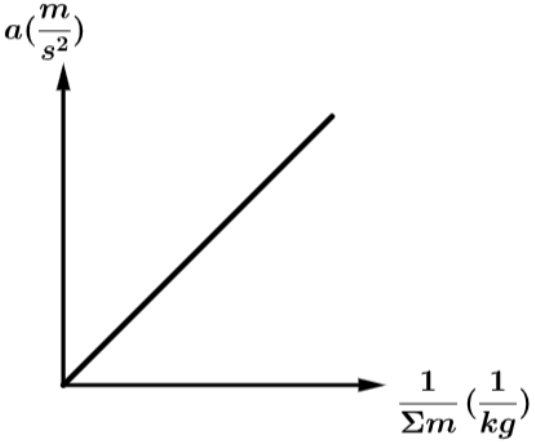
לאורך הניסוי מודדים את הזמן (ע"י תרשים העקבות), המרחק של כל עקבה מהראשית, והמסות של הסל עם המשקולות ושל העגלה עם המשקולות (יחד הם נקראים "המערכת").

בחלק הראשון של הניסוי: מסרטטים גרף של תאוצת המערכת (שהתקבלה מניתוח תרשים העקבות) כפונקציה של הכוח השקול הפועל על המערכת (שחושב על פי מסת הסל עם המשקולות). מסת המערכת נשארה קבועה.



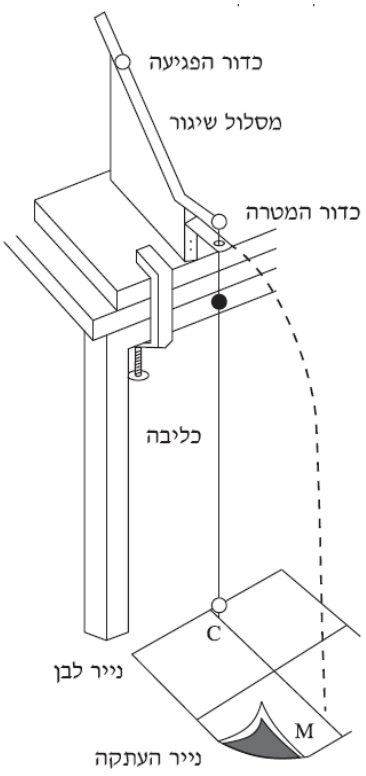
המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא $\frac{1}{\Sigma m}$, ניתן להשוות לערך שהתקבל במדידה ובכך לאשש (או להפריך) את החוק השני של ניוטון.

בחלק השני של הניסוי: מסרטטים גרף של תאוצת המערכת (שהתקבלה מניתוח תרשים העקבות) כפונקציה של ההופכי למסת המערכת (שחושבה על פי מסת המערכת). הכוח הפועל על המערכת נשאר קבוע.



המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא ΣF, ניתן להשוות לערך שהתקבל במדידה ובכך לאשש (או להפריך) את החוק השני של ניוטון.

ניסוי 2: התנגשות בשני ממדים



סעיף א

מטרת הניסוי היא בדיקת אופיו הווקטורי של חוק שימור התנע.

סעיף ב

(תרשים בצד שמאל)

סעיף ג (שאלה 12)

המשתנה הבלתי תלוי הוא זווית הפגיעה בין הכדורים והמשתנה התלוי הוא מרחק הפגיעה של כל כדור ברצפה.

סעיף ג (שאלה 13)

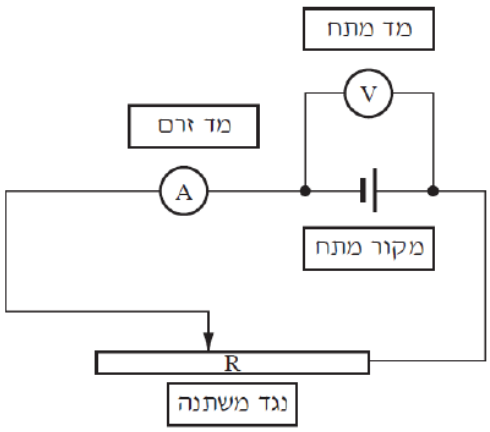
במהלך הניסוי נמדד מרחק הפגיעה של הכדורים ברצפה, עבור סט של חזרות, כאשר בכל סט שינו מעט את זווית הפגיעה בין הכדורים. מסרטטים תרשים המתאר את הסכום הווקטורי של שני המרחקים האופקיים שעברו הכדורים בהתנגשות והמרחק האופקי שעבר הכדור הפוגע לפני ההתנגשות. מהתרשים ניתן למצוא את הקשר בין התנע הכולל של הכדורים ברגע לפני ההתנגשות ובין התנע שלהם אחרי ההתנגשות. גם כאשר המסות שוות וגם כאשר המסות שונות. ניתן להסיק על אודות שימור (או אי-שימור) תנע באופן ווקטורי (קרי, בכל אחד משני הצירים), והוא אינו תלוי בזווית הפגיעה בין הכדורים.

ניסוי 3: כא"מ, מתח הדקים והתנגדות פנימית

סעיף א

מטרת הניסוי היא מציאת הכא"מ וההתנגדות הפנימית של סוללה.

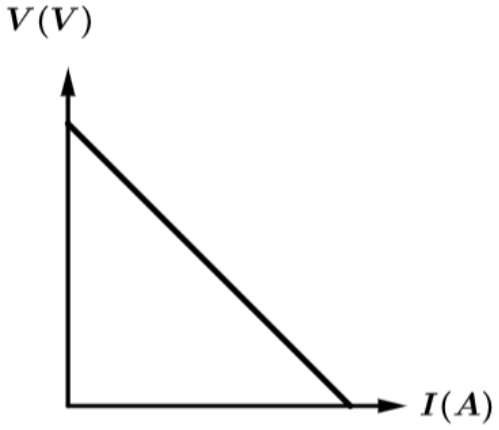
סעיף ב



סעיף ג (שאלה 12)

המשתנה הבלתי תלוי הוא הזרם והמשתנה התלוי הוא המתח. ההנחה היא שהכא"מ של הסוללה וההתנגדות הפנימית שלה הם גדלים קבועים.

סעיף ג (שאלה 13)



במהלך הניסוי שינו מספר פעמים את מיקום הגררה הניידת ובכל פעם מדדו את הוריית מד-המתח (מתח ההדקים) ואת הוריית מד-הזרם (הזרם דרך הסוללה). הוריית מד-המתח נמדדה בנוסף פעם אחת כאשר הגררה הניידת מנותקת (אין זרם), קריאה זו היא ערך הכא"מ.

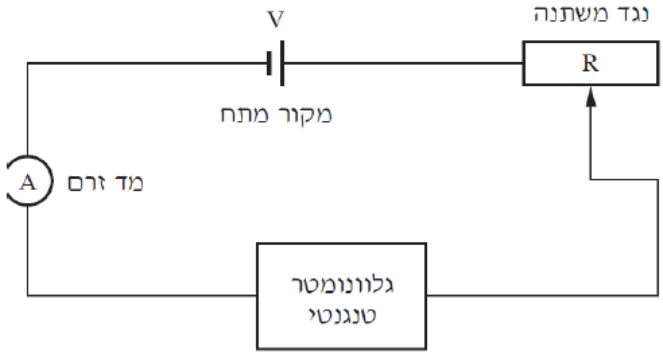
מסרטטים גרף של מתח ההדקים כתלות בזרם. המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא $-r$ ובכך ניתן למצוא את ההתנגדות הפנימית של הסוללה. המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך עם הציר האנכי היא הכא"מ ε. המשמעות הפיזיקלית של נקודת החיתוך עם הציר האופקי היא הזרם במצב קצר.

ניסוי 4: השדה המגנטי של סליל דק (גלוונומטר טנגנטי)

סעיף א

מטרת הניסוי היא חקירת הקשר בין השדה המגנטי במרכז הסליל ובין עוצמת הזרם ומספר הכריכות, והן מציאת הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ.

סעיף ב

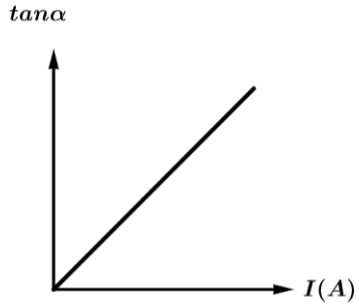


סעיף ג (שאלה 12)

בחלק הראשון של הניסוי: המשתנה הבלתי תלוי הוא עוצמת הזרם והמשתנה התלוי הוא זווית הסטייה של המצפן. מספר הכריכות ורדיוס הסליל נשארו קבועים.
בחלק השני של הניסוי: המשתנה הבלתי תלוי הוא מספר הכריכות והמשתנה התלוי הוא זווית הסטייה של המצפן. עוצמת הזרם ורדיוס הסליל נשארו קבועים.

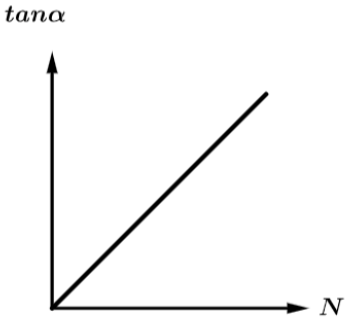
סעיף ג (שאלה 13)

לאורך הניסוי מודדים את עוצמת הזרם, מספר הליפופים, רדיוס הסליל, וזווית הסטייה של המצפן.



בחלק הראשון של הניסוי: מסרטטים גרף של טנגנס הזווית כתלות בעוצמת הזרם. המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא $\frac{\mu_0 N}{2RB_{E_\parallel}}$.

מתוך שיפוע הגרף ומידיעת מספר הליפופים ורדיוס הסליל, ניתן למצוא את הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי.



בחלק השני של הניסוי: מסרטטים גרף של טנגנס הזווית כתלות במספר הליפופים. המשמעות הפיזיקלית של שיפוע הגרף היא $\frac{\mu_0 I}{2RB_{E_\parallel}}$.

מתוך שיפוע הגרף ומידיעת עוצמת הזרם ורדיוס הסליל, ניתן למצוא את הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי.

נספח א: הצעה לפעילות חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי

בדיקת ביטוי פרמטרי היא מיומנות חשובה של בקרה וחשיבה ביקורתית.
בכדי לבדוק היתכנות ראשונית של ביטויים פרמטריים, וזאת עוד לפני מציאת הביטוי הנכון, ישנם מספר מבחנים שניתן לבצע ומגבלות שניתן לבדוק. להלן רשימה חלקית שלהם:

[1] ערכים בלתי אפשריים: בדיקה האם הביטוי מניב ערכים לא אפשריים. כמו למשל תאוצת מערכת דינמית הגדולה מתאוצת הנפילה החופשית, בהיעדר כוחות המכוונים בכיוון כוח הכבידה.

[2] יחידות לא מתאימות: בדיקת יחידות יכולה לבוא לידי ביטוי בשלושה היבטים מרכזיים:

(I) הביטוי כולו צריך להיות ביחידות המתאימות לגודל הפיזיקלי שהוא אמור לבטא;

(II) לא ייתכנו פעולות מתמטיות מסוימות עבור גדלים ביחידות שונות. למשל: הביטוי "$x + at$" חסר משמעות כי לא ניתן לסכום גודל שיחידותיו m עם גודל שיחידותיו $\frac{m}{s}$;

(III) לא ייתכנו פעולות מתמטיות מסוימות עבור גדלים שאינם חסרי יחידות. למשל: תחום ההגדרה של פונקציות טריגונומטריות הוא גדלים פיזיקליים חסרי יחידות (יחידות של זווית), אין משמעות פיזיקלית לביטויים כמו $\sin\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ או $\tan^{-1}\left(\frac{B_E}{\mu_0 I}\right)$.

[3] בחינת מקרי גבול: בדיקת התנהגות הביטוי במקרים גבוליים, למשל פרמטרים השואפים לערכים גדולים מאוד או לאפס.

[4] בחינת מקרה פרטי: אם ערכו של ביטוי ידוע מראש בערכים ידועים מסוימים של פרמטרים (מקרה פרטי), הביטוי אמור לשקף ערך זה.

[5] בדיקת מגבלה פיזיקלית: בדיקה האם הביטוי יכול במקרים מסוימים להוביל להפרה של מגבלה פיזיקלית, למשל: מהירות גדולה ממהירות האור, מקדם חיכוך שלילי, וכד'.

[6] בדיקת התאמה לסימטריה: במערכות פיזיקליות מסוימות החלפה בין נתוני שני גופים לא משנה דבר מבחינה פיזיקלית. במצב זה הביטוי חייב להיות סימטרי להחלפה ביניהם. למשל: בהתנגשות פלסטית בין שני גופים, ביטוי עבור האנרגיה הקינטית לאחר ההתנגשות חייב להישאר זהה תחת ההחלפות $m_1 \leftrightarrow m_2$ ו- $v_1 \leftrightarrow v_2$, וביטוי עבור המהירות המשותפת של הגופים חייב להישאר באותו גודל אך בסימן הפוך תחת החלפות אלה.

[7] בדיקת מונוטוניות: בדיקה האם כאשר פרמטר שהביטוי תלוי בו גדל או קטן, הביטוי גדל, קטן, (או לא משתנה) בהתאמה להתנהגות המצופה. לדוגמא: במטוטלת מתמטית, ככל שאורך החוט גדל כך זמן המחזור של התנודות גדל. ביטוי עבור זמן המחזור חייב לשקף זאת.

ביטויים פרמטריים שלא עומדים בלפחות אחד ממבחנים אלה (או מבחנים הגיוניים אחרים שתלמידים יכולים לחשוב עליהם) ניתנים לפסילה על הסף עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

בכדי לאפשר למורים לתרגל חשיבה ביקורתית עם תלמידיהם, על ידי הערכה של ביטויים פרמטריים, מוצעים בהמשך 14 דפי עבודה (7 במכניקה ו-7 בחשמל) המכילים ביטויים פרמטריים שהמורה פסל על הסף, כולל הצעות לפתרון. כל השאלות מנוסחות בהתאם לשאלה 2 סעיף ב' בבגרות במכניקה.

דפי העבודה מחולקים לפי נושאים כפי שמתואר בטבלה הבאה. המספרים הרשומים בסוגריים הם מספרי העמודים בו מופיעים כל אחד מן דפי עבודה.

מכניקה	**חשמל ומגנטיות**
קינמטיקה (55)	אלקטרוסטטיקה: כוחות ושדות חשמליים (69)
דינמיקה (57)	אלקטרוסטטיקה: אנרגיה חשמלית ופוטנציאל חשמלי (71)
תנועה במישור (59)	מעגלים חשמליים: זרם, מתח והתנגדות (73)
מתקף ותנע (61)	מעגלים חשמליים: הספק ונצילות (75)
עבודה ואנרגיה (63)	מגנטיות (77)
תנועה הרמונית פשוטה (65)	קיבול וקבלים (79)
כבידה (67)	השראה אלקטרומגנטית (81)

נדגיש שישנה <u>חזרתיות רבה</u> בין דפי העבודה, לכן אנו ממליצים למורים לבחור בקפידה את דפי העבודה והשאלות בהם הם מעוניינים לעשות שימוש לצרכיהם השונים. ייתכן ואין ערך מוסף בתרגול של כל דפי העבודה בצורה גורפת, ולכן יש לשקול מידתיות מסוימת.

בנוסף חשוב להדגיש שדפי העבודה מהווים <u>הצעה בלבד</u>. מורים המעוניינים לערוך את השאלות כרצונם (בהצעות לפתרון מוצגים הביטויים הפרמטריים הנכונים לכל תרחיש מתואר) או לחשוב על שאלות אחרות יכולים לעשות זאת.

בעמודים הבאים מופיעים דפי העבודה בזה אחר זה.

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – קינמטיקה

<u>שאלה 1</u>

בעת נהיגה ברכב, עובר זמן מסוים מהרגע בו הנהג מבחין בסכנה ועד שהנהג בולם את רכבו, זמן זה נקרא "זמן תגובה". במהלך זמן התגובה הרכב ממשיך בנסיעה במהירות קבועה. המרחק שעובר הרכב בזמן זה נקרא "מרחק תגובה". המרחק שעובר הרכב במהלך הבלימה נקרא "מרחק בלימה". מרחק העצירה הכולל מהרגע שהנהג מבחין בסכנה ועד שהרכב נעצר נקרא "מרחק עצירה".

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור מרחק העצירה Δx של רכב הנוסע במהירות שגודלה v_0, בולם בתאוצה שגודלה a, כאשר זמן התגובה של הנהג הוא T. תלמידים כתבו ביטויים שונים למרחק העצירה ובהם גם הביטויים האלה:

I. $\Delta x = vT + \frac{2a}{v^2}$

II. $\Delta x = vT - \frac{v^2}{2a}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>

שתי מכוניות A ו-B נעות זו לקראת זו במהירויות קבועות שגודלן v_A ו-v_B בהתאמה. המרחק בין המכוניות ברגע $t = 0$ הוא L.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור הזמן הדרוש Δt עד שהמכוניות תיפגשנה. תלמידים כתבו ביטויים שונים לזמן ובהם גם הביטויים האלה:

I. $\Delta t = \frac{L}{v_A - v_B}$

II. $\Delta t = \frac{L}{2v_A + v_B}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה של יחידות מידה. הביטוי Δx הוא בעל יחידות של m; הביטוי vT הוא בעל יחידות של $\frac{m}{s}\cdot s=m$; הביטוי $\frac{2a}{v^2}$ הוא בעל יחידות של $\frac{\frac{m}{s^2}}{\left(\frac{m}{s}\right)^2}=\frac{1}{m}$.

עבור ביטוי II יש 2 טענות מרכזיות לפסילת הביטוי: (1) לאור הקשר בין גודל התאוצה למרחק העצירה. ככל שהתאוצה גדולה יותר, מרחק הבלימה קטן יותר וכתוצאה מכך מרחק העצירה קטן יותר. בביטוי II ככל שגודל התאוצה גדול יותר כך מרחק הבלימה גדול יותר; (2) הביטוי vT הוא מרחק התגובה, לא ייתכן שמרחק העצירה קטן ממרחק התגובה, כפי שעולה מביטוי II.

<u>הביטוי הנכון:</u> $\Delta x=vT+\frac{v^2}{2a}$

<u>שאלה 2</u>

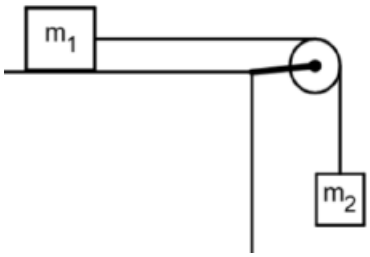
את ביטוי I יש לפסול עקב סימן הזמן. הזמן עד שהמכוניות תיפגשנה חייב להיות חיובי. בביטוי I עבור $v_A<v_B$ מתקבל זמן שלילי.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה לסימטריה. אם מכונית A נוסעת במהירות v_B ומכונית B נוסעת במהירות v_A (כלומר, $v_A\leftrightarrow v_B$) אזי אמור להתקבל אותו זמן עד שתיפגשנה, כי הבעיה שקולה מבחינה פיזיקלית. אולם, על פי ביטוי II, זמן זה יהיה $\Delta t=\frac{L}{2v_B+v_A}\neq\frac{L}{2v_A+v_B}$.

<u>הביטוי הנכון:</u> $\Delta t=\frac{L}{v_A+v_B}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – דינמיקה

<u>שאלה 1</u>



גוף שמסתו m_1 נע על משטח אופקי חסר חיכוך, וקשור באמצעות חוט העובר דרך גלגלת אידיאלית לגוף שמסתו m_2.

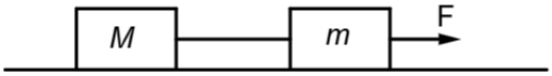
תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור מתיחות החוט T.
תלמידים כתבו ביטויים שונים למתיחות ובהם גם הביטויים האלה:

I. $T = m_2 g$

II. $T = \frac{m_2 g}{2}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>



שני גופים שמסותיהם m ו-M קשורים זה לזה באמצעות חוט שמסתו זניחה ומוצבים על משטח אופקי חסר חיכוך.
מושכים את הגוף שמסתו m בכוח שגודלו F.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור מתיחות החוט T. תלמידים כתבו ביטויים שונים למתיחות ובהם גם הביטויים האלה:

I. $T = \frac{m}{m+M} F$

II. $T = \frac{mM}{m+M} F$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 3</u>

בתרחיש בשאלה 2 תלמידים התבקשו לפתח ביטוי עבור תאוצת המערכת. תלמידים כתבו ביטויים שונים ובהם גם הביטוי: $a = \frac{F}{|M-m|}$. המורה פסל על הסף ביטוי זה. קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את הביטוי עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

שאלה 1

את ביטוי I יש לפסול עקב סתירה לחוקי ניוטון. עבור מתיחות שכזו, מסה m_2 מתמידה במצבה. הדבר אינו ייתכן כי m_1 לא מתמידה במצבה כל עוד יש מתיחות.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-תלות של התאוצה במסה. עבור מתיחות שכזו, תאוצת m_2 (שהיא גם תאוצת המערכת) תהייה $\frac{g}{2}$. לא ייתכן שתאוצת המערכת לא תלויה במסת המערכת.

הביטוי הנכון: $T = \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2} g$

שאלה 2

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה גבולי. במקרה בו $M \to \infty$ (כלומר $M \gg m$) המערכת במנוחה ואז $T = F$, וזה לא מה שמתקבל מביטוי I במקרה זה.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה של יחידות מידה. לביטוי $\frac{mM}{m+M}$ יש יחידות של $\frac{kg^2}{kg} = kg$ ואז לאגף הימני יש יחידות של $kg \cdot N$, אלו אינן יחידות של מתיחות.

הביטוי הנכון: $T = \frac{M}{m+M} F$

שאלה 3

ישנן שתי טענות מרכזיות על בסיסן יש לפסול את הביטוי: (1) היות ומדובר ביישום של החוק השני עבור מערכת, ע"פ $a = \frac{\Sigma F}{\Sigma m}$ במכנה של הביטוי חייב להיות מסת המערכת, קרי סכום המסות של הגופים, וזה אינו המצב; (2) במקרה הפרטי $M = m$ תאוצת המערכת מתבדרת ($a \to \infty$) והדבר אינו אפשרי מבחינה פיזיקלית.

הביטוי הנכון: $a = \frac{F}{m+M}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – תנועה במישור

<u>שאלה 1</u>

כדור נזרק אופקית במהירות v_0 מראש מגדל שגובהו h.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור גודל מהירות הפגיעה בקרקע v. תלמידים כתבו ביטויים שונים לגודל המהירות ובהם גם הביטוי:

$$v = \sqrt{v_0^2 - 2gh}$$

המורה פסל על הסף את הביטוי. קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את הביטוי עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>

כדור נזרק במהירות v_0 בזווית θ מעל האופק, ונוחת באותו גובה שממנו נזרק.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור המרחק בין נקודת הפגיעה לנקודת הזריקה d. תלמידים כתבו ביטויים שונים למרחק ובהם גם הביטוי:

$$d = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{g}$$

המורה פסל על הסף את הביטוי. קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את הביטוי עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 3</u>

מכונית נוסעת על מסלול מעגלי אופקי שרדיוסו R. מקדם החיכוך (הסטטי והקינטי) בין גלגלי המכונית לבין המסלול הוא μ.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור המהירות המקסימלית v בה המכונית יכולה לנסוע במסלול המעגלי. תלמידים כתבו ביטויים שונים למהירות ובהם גם הביטוי:

$$v = \sqrt{\frac{gR}{\mu}}$$

המורה פסל על הסף את הביטוי. קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את הביטוי עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

על פי הביטוי, במקרה בו $v_0 < \sqrt{2gh}$ לא מתקבל ערך ממשי למהירות הפגיעה v, למרות שבבירור הכדור פוגע ברצפה במהירות כלשהי. מעבר לכך, גם בתחום בו יש פתרון למהירות, ככל ש-h גדל מתקבל ש-v קטן, וזה אינו המצב.

<u>הביטוי הנכון:</u> $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$

<u>שאלה 2</u>

יש לפסול את הביטוי על פי אי-התאמה למקרה הגבולי $\theta = 90°$, מתקבל על פי הביטוי $d > 0$ אך זה אינו המצב שכן הכדור נזרק אנכית מעלה, ולכן יפגע באותו מקום ממנו נזרק.

<u>הביטוי הנכון:</u> $d = \frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{g}$

<u>שאלה 3</u>

במקרה הגבולי בו החיכוך קטן מאוד ($\mu \to 0$) המהירות המקסימלית קטנה מאוד, שכן בהיעדר חיכוך אין כוח רדיאלי המאפשר תנועה מעגלית, ולכן $v \to 0$. אך לפי הביטוי המהירות דווקא מתבדרת.

<u>הביטוי הנכון:</u> $v = \sqrt{\mu g R}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – מתקף ותנע

<u>שאלה 1</u>

עגלה A שמסתה m נעה במהירות v בכיוון החיובי של ציר x. עגלה B שמסתה m נעה במהירות $2v$ בכיוון החיובי של ציר y. העגלות מתנגשות, נצמדות זו לזו ונעות יחד לאחר ההתנגשות.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור המהירות המשותפת של העגלות u לאחר ההתנגשות (גודל וכיוון). תלמידים כתבו ביטויים שונים למהירות ובהם גם הביטוי:

$$u = \frac{3}{2}v \quad , \quad \theta = 45°$$

המורה פסל על הסף את הביטוי עבור גודל המהירות ואת הביטוי עבור כיוון המהירות.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את הביטוי עבור <u>גודל</u> המהירות עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את הביטוי עבור <u>כיוון</u> המהירות עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>

גוף 1 שמסתו m_1 נע במהירות ש<u>גודלה</u> v_1 בכיוון החיובי של ציר x.

גוף 2 שמסתו m_2 נע במהירות ש<u>גודלה</u> v_2 בכיוון השלילי של ציר x.

הגופים מתנגשים זה בזה, נצמדים ונעים יחדיו.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטויים עבור המהירות המשותפת של הגופים u ועבור <u>גודל</u> המתקף שהפעיל גוף 1 על גוף 2 $J_{1\to2}$. תלמידים כתבו ביטויים שונים ובהם גם הביטויים:

I. $u = \frac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2}$

II. $J_{1\to2} = \frac{2m_1^2}{m_1+m_2}v_1$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול כי הוא מתעלם מאופיו הווקטורי של שימור תנע. גודל התנע של גוף A הוא mv וגודל התנע של גוף B הוא $2mv$, לאור הזווית ביניהם, גודל התנע של המערכת חייב להיות קטן מ-$3mv$, גודל התנע של המערכת לאחר ההתנגשות הוא $2mu$ ולכן מתחייב ש- $u < \frac{3}{2}v$.

את ביטוי II יש לפסול משיקולים גיאומטריים. רכיב התנע בכיוון ציר y גדול יותר מאשר רכיב התנע בכיוון ציר x ולכן $45° < \theta < 90°$.

<u>הביטויים הנכונים:</u> $u = \frac{\sqrt{5}}{2}v \ \ , \ \ \theta = 63.43°$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה לסימן המהירות. ע"פ ביטוי I המהירות u תמיד חיובית, בעוד ייתכן שהגופים ינועו בכיוון השלילי או ייעצרו, כתלות בערכי המסות וגדלי המהירויות.

את ביטוי II יש לפסול עקב שיקולי סימטריה. המתקפים שהגופים מפעילים זה על זה חייבים להיות שווים בגודלם (חוק שלישי של ניוטון), כלומר $J_{1\to2} = J_{2\to1}$.
את $J_{2\to1}$ נקבל מיידית אם נחליף $m_1 \leftrightarrow m_2$ ו-$v_1 \leftrightarrow v_2$ בביטוי עבור $J_{1\to2}$, וזה אינו המצב.

<u>הביטויים הנכונים:</u>

I. $u = \frac{m_1v_1 - m_2v_2}{m_1+m_2}$

II. $J_{1\to2} = \frac{m_1m_2(v_1+v_2)}{m_1+m_2}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – עבודה ואנרגיה

שאלה 1

גוף קשור למטוטלת שאורכה L, מסיטים את המטוטלת בזווית θ יחסית לאנך.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור מהירות הגוף v בעוברו בנקודה הנמוכה ביותר. תלמידים כתבו ביטויים שונים למהירות ובהם גם הביטויים האלה:

I. $v = \sqrt{2gL\sin(2\theta)}$

II. $v = \sqrt{2gL(\sin\theta + \cos\theta)}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

שאלה 2

גוף שמסתו m מחליק במורד מישור משופע מחוספס. הגוף התחיל את תנועתו מגובה h על גבי המישור המשופע.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור מהירות הגוף v בתחתית המישור המשופע. תלמידים כתבו ביטויים שונים למהירות ובהם גם הביטוי:

$$v = \sqrt{2gh - \frac{2W_f}{m}}$$

המורה פסל על הסף את הביטוי.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את הביטוי עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה פרטי $\theta = 90°$: במצב זה הגוף משוחרר מגובה L ובבירור תהייה לו מהירות בהגיעו לנקודה הנמוכה ביותר. אך על פי הביטוי מתקבל $v = 0$.

את ביטוי II יש לפסול משתי סיבות עיקריות: (1) אי-התאמה למקרה פרטי $\theta = 0°$, במקרה זה המהירות תהייה $v = 0$ אך לפי הביטוי מתקבלת מהירות של $v = \sqrt{2gL}$; (2) עקב אי-התאמה לסימטריה: אין הבדל פיזיקלי בין שחרור בזווית θ וזווית $-\theta$ (אותה זווית מהכיוון השני). לכן הביטוי חייב להיות סימטרי להחלפה $\theta \leftrightarrow -\theta$ וזה אינו המצב.

<u>הביטוי הנכון:</u> $v = \sqrt{2gL(1-\cos\theta)}$

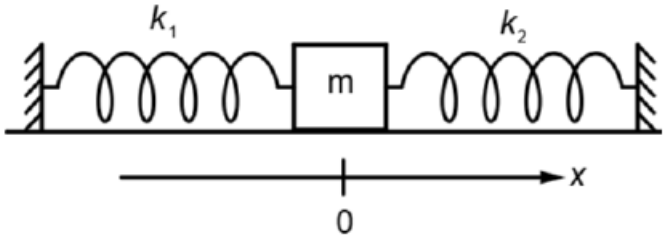
<u>שאלה 2</u>

את הביטוי יש לפסול עקב אי-התאמה לסימן האיבר שמכיל את עבודת כוח החיכוך. עבודת החיכוך היא בהכרח אי-חיובית, לכן הביטוי $-\frac{2W_f}{m}$ בהכרח אי-שלילי. המשמעות היא שעל פי ביטוי I המהירות תהייה גדולה יותר במקרה בו יש חיכוך מאשר במקרה בו אין חיכוך, והדבר אינו ייתכן. דרך נוספת לראות זאת: ככל שהחיכוך מבצע יותר עבודה, הביטוי W_f קטן יותר (עבודה שלילית גדולה יותר בערכה המוחלט). לפי הביטוי, המהירות גדולה יותר ככל שהחיכוך מבצע יותר עבודה, והדבר לא ייתכן.

<u>הביטוי הנכון:</u> $v = \sqrt{2gh + \frac{2W_f}{m}}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – תנועה הרמונית פשוטה

<u>שאלה 1</u>



תיבה שמסתה m מונחת על משטח אופקי חסר חיכוך, ומחוברת משני צדדיה לשני קפיצים בעלי קבוע קפיץ k_1 ו-k_2. מסיטים את התיבה מרחק קצר מנקודת שווי המשקל והיא מתנודדת בתנועה הרמונית פשוטה.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור זמן המחזור T של תנודות התיבה. תלמידים כתבו ביטויים שונים לזמן המחזור ובהם גם הביטויים האלה:

I. $T = 2\pi\sqrt{\frac{(k_1+k_2)m}{k_1k_2}}$

II. $T = 2\pi\left(\sqrt{\frac{m}{k_1}} + \sqrt{\frac{m}{k_2}}\right)$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>

גוף שמסתו m תלוי בשווי-משקל מקפיץ אנכי בעל קבוע k, מרחק הגוף מהתקרה במצב-שווי משקל הוא L. מסיטים את הגוף מרחק <u>אנכי</u> קצר מנקודת שווי המשקל והוא מתנודד בתנועה הרמונית פשוטה.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור זמן המחזור T של תנודות הגוף. תלמידים כתבו ביטויים שונים לזמן המחזור ובהם גם הביטויים האלה:

I. $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k+mg}}$

II. $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה פרטי בו $k_1 = k_2$, במקרה זה מקבלים ע"פ הביטוי

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2k_1 m}{k_1^2}} = 2\pi\sqrt{\frac{2m}{k_1}}$$

כלומר, זמן המחזור ארוך יותר מאשר במקרה של קפיץ בודד. זה לא ייתכן משום ששני הקפיצים מפעילים כוח באותו כיוון לכל אורך התנועה, דהיינו הם "עוזרים אחד לשני", ולכן זמן המחזור מתקצר.

את ביטוי II יש לפסול משלוש סיבות עיקריות: (1) הביטוי המתואר הוא סכום של זמני המחזור המתקבלים מכל קפיץ בנפרד, בעוד שני הקפיצים משפיעים על התנועה סימולטנית; (2) אי-התאמה למקרה גבולי $k_1 \to 0$ (קפיץ מאוד רך), במקרה זה רק קפיץ k_2 ישפיע על התנועה, וזמן המחזור אמור להתכנס לזמן סופי שהיה מתקבל רק בנוכחותו, אולם על פי הביטוי זמן המחזור מתבדר ($T \to \infty$); (3) אי-התאמה למקרה גבולי $k_1 \to \infty$ (קפיץ מאוד קשיח), במקרה זה התיבה לא תזוז, אולם על פי הביטוי זמן המחזור מתכנס ל- $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_2}}$.

<u>הביטוי הנכון:</u> $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1+k_2}}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה של יחידות מידה. k נמדד ביחידות $\frac{N}{m}$ ו-mg נמדד ביחידות N, סכום שלהם אינו מוגדר היטב (אין משמעות פיזיקלית לביטוי $k + mg$)

את ביטוי II ניתן לפסול עקב אי-התלות במסת הגוף ובקבוע הקפיץ. הביטוי מתאר זמן המחזור המתאים לתנודות מטוטלת, לא תנודות אנכיות.

<u>הביטוי הנכון:</u> $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – כבידה

<u>שאלה 1</u>

לוויין נע סביב כדור הארץ במסלול מעגלי בזמן מחזור T בהשפעת כבידה בלבד.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור רדיוס המסלול r של הלוויין. תלמידים כתבו ביטויים שונים לרדיוס המסלול ובהם גם הביטויים האלה:

I. $r = \sqrt[3]{\frac{4\pi^2}{GM_E T^2}}$

II. $r = \sqrt[3]{\left(\frac{T}{T_{\text{ירח}}}\right)^2} R_E$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>

לוויין נע סביב כדור הארץ במסלול מעגלי ברדיוס r בהשפעת כבידה בלבד.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור מהירות הלוויין v. תלמידים כתבו ביטויים שונים למהירות ובהם גם הביטויים האלה:

I. $v = \sqrt{\frac{GM_E r}{R_E^2}}$

II. $v = \frac{GM_E}{r}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I אפשר לפסול משתי סיבות מרכזיות: (1) אי-התאמה של יחידות מידה: האגף השמאלי נמדד ביחידות של m בעוד האגף הימני נמדד ביחידות של:

$$\sqrt[3]{\frac{1}{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}\cdot kg\cdot s^2}}=\sqrt[3]{\frac{1}{kg\cdot m\cdot s^{-2}\cdot m^2\cdot kg^{-1}\cdot s^2}}=\sqrt[3]{\frac{1}{m^3}}=\frac{1}{m}$$

(2) אי-התאמה לחוק השלישי של קפלר: על פי החוק השלישי $r^3\propto T^2$ אך ע"פ הביטוי $r\propto T^{-\frac{2}{3}}$.

את ביטוי II יש לפסול עקב ערכים לא הגיוניים מבחינה פיזיקלית. עבור $T<T_{\text{ירח}}$, שזהו מסלול אפשרי לכל לוויין המקיף את כדור הארץ במרחק קרוב יותר מהירח, מתקבל ש-$r<R_E$ והדבר אינו ייתכן.

<u>הביטוי הנכון:</u> $r=\sqrt[3]{\frac{GM_ET^2}{4\pi^2}}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב שלוש סיבות מרכזיות: (1) התלות של v ב-r: ככל שהרדיוס גדל, המהירות קטנה. לעומת זאת, בביטוי ככל שהרדיוס גדל המהירות גדלה; (2) אי-התאמה למקרה גבולי $r\to\infty$: על פי הביטוי $v\to\infty$, כלומר עבור מרחק גדול מספיק יתקבל $v>c$ והדבר אינו אפשרי; (3) התלות של v ב-R_E: המודל הניוטוני מתייחס לגרמי שמיים כאל גופים נקודתיים, לרדיוס שלהם לא אמורה להיות השפעה על הגדלים הפיזיקליים הקשורים ברדיוס המסלול.

את ביטוי II יש לפסול על הסף עקב אי-התאמה ליחידות מידה: האגף הימני בביטוי נמדד ביחידות של:

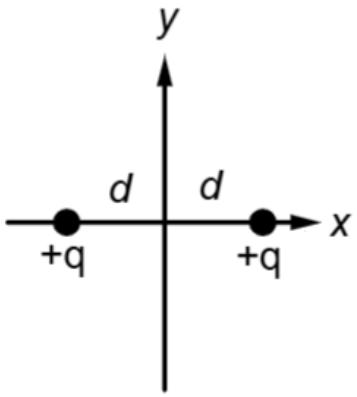
$$\frac{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}\cdot kg}{m}=\frac{kg\cdot m\cdot s^{-2}\cdot m^2\cdot kg^{-2}\cdot kg}{m}=m^2\cdot s^{-2}$$

אלו אינו יחידות של מהירות (אלא של v^2).

<u>הביטוי הנכון:</u> $v=\sqrt{\frac{GM_E}{r}}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – אלקטרוסטטיקה: שדות וכוחות חשמליים

<u>שאלה 1</u>



שני מטענים נקודתיים זהים $+q$ ממוקמים על ציר x במרחק $2d$ זה מזה (בנקודות $x=+d$ ו- $x=-d$).

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור השדה החשמלי על ציר y, $E(y)$. תלמידים כתבו ביטויים שונים לשדה החשמלי ובהם גם הביטויים האלה:

I. $E(y)=\frac{2kq}{d^2+y^2}$

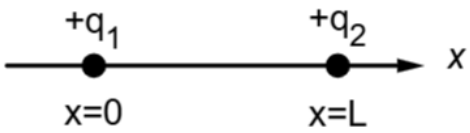
II. $E(y)=\frac{2kqy}{(d+y)^3}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>



מטען נקודתי חיובי $+q_1$ מוחזק בנקודה $x=0$,

מטען נקודתי חיובי $+q_2$ מוחזק בנקודה $x=L$.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור שיעור הנקודה x בה השדה החשמלי מתאפס. תלמידים כתבו ביטויים שונים לנקודה ובהם גם הביטויים האלה:

I. $x=L\cdot\left(1+\sqrt{\frac{q_1}{q_2}}\right)$

II. $x=\frac{L}{1+\sqrt{\frac{q_1}{q_2}}}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה הפרטי $y=0$ (ראשית הצירים). במצב זה השדות שיצרו המטענים שווים בעוצמתם ובכיוון הפוך, ולכן מתחייב ש- $E(0)=0$, אולם, על פי הביטוי מתקבל ש- $E(0)=\frac{2kq}{d^2}$.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה לסימטריה: (1) אם נחליף $d \leftrightarrow -d$, לא ישתנה דבר בשאלה (הכדור הימני ממוקם בצד שמאל והשמאלי בצד ימין) ולכן הביטוי חייב להיות זהה, אך זה אינו המצב, $\frac{2kqy}{(d+y)^3} \neq \frac{2kqy}{(-d+y)^3}$; (2) אם נחליף $y \leftrightarrow -y$, כלומר נתבונן בשדה החשמלי באזור השלילי של ציר y, אמורים משיקולי סימטריה לקבל אותו שדה כמו באזור החיובי אך בסימן הפוך [כלומר: הביטוי עבור השדה החשמלי חייב להיות פונקציה אי-זוגית], וזה אינו המצב: $\frac{2kqy}{(d+y)^3} \neq -\frac{2kq(-y)}{(d-y)^3}$.

<u>הביטוי הנכון:</u> $E(y)=\frac{2kqy}{(d^2+y^2)^{3/2}}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב ערכים לא הגיוניים מבחינה פיזיקלית. היות ששני המטענים חיוביים, הנקודה בה השדה מתאפס חייבת להיות ביניהם, כלומר $0<x<L$. אולם, על פי הביטוי, בהכרח $x>L$ והדבר אינו ייתכן.

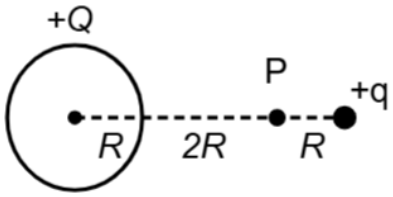
את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה $q_1>q_2$. במקרה זה, השדה החשמלי מתאפס קרוב יותר ל-q_2 ולכן $\frac{L}{2}<x<L$. לעומת זאת, על פי הביטוי, מתקבל ש- $x<\frac{L}{2}$:

$$\frac{q_1}{q_2}>1 \;\Rightarrow\; \sqrt{\frac{q_1}{q_2}}>1 \;\Rightarrow\; 1+\sqrt{\frac{q_1}{q_2}}>2 \;\Rightarrow x=\frac{L}{1+\sqrt{\frac{q_1}{q_2}}}<\frac{L}{2}$$

<u>הביטוי הנכון:</u> $x=\frac{L}{1+\sqrt{\frac{q_2}{q_1}}}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – אלקטרוסטטיקה: אנרגיה חשמלית ופוטנציאל חשמלי

<u>שאלה 1</u>



נתון כדור מוליך שרדיוסו R טעון במטען $+Q$, במרחק $4R$ ממרכז הכדור מוחזק מטען נקודתי $+q$.
נקודה P נמצאת על הקו המחבר בין מרכזי המטענים, במרחק $3R$ ממרכז הכדור ו-R מהמטען הנקודתי.

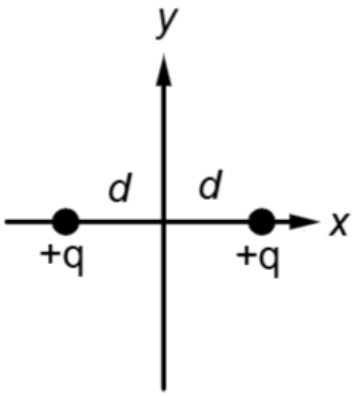
תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור הפוטנציאל החשמלי V_P בנקודה P. תלמידים כתבו ביטויים שונים לפוטנציאל ובהם גם הביטויים האלה:

I. $V_P = \frac{kQ}{3R} - \frac{kq}{R}$

II. $V_P = \frac{k(Q+q)}{3R}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>



שני מטענים נקודתיים זהים $+q$ ממוקמים על ציר x במרחק $2d$ זה מזה (בנקודות $x = +d$ ו- $x = -d$).

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור האנרגיה $U(x,y)$ הדרושה להעביר מטען חיובי $+q_0$ מאינסוף לנקודה (x,y) במערכת הצירים, תלמידים כתבו ביטויים שונים לאנרגיה ובהם גם הביטויים האלה:

I. $U(x,y) = \frac{4kqq_0d}{(x^2+y^2)^{3/2}}$

II. $U(x,y) = \frac{2kqq_0}{\sqrt{(x-d)^2+y^2}}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.
קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב סימן המינוס: (1) ביטוי זה שקול לסכום פוטנציאלים אם המטען q היה שלילי, שלא מתאים למצב בשאלה. פוטנציאל נסכם אלגברית (הוא סקלר) אז אם שני המטענים חיוביים הפוטנציאל להיות חיובי; (2) עבור $q > \frac{Q}{3}$ מתקבל פוטנציאל חשמלי שלילי, והדבר לא ייתכן במערכת עם שני מטענים חיוביים.

את ביטוי II יש לפסול מטעמי סימטריה: הבעיה <u>אינה</u> סימטרית להחלפה $q \leftrightarrow Q$, ועל כן הביטוי המבוקש אינו יכול להיות סימטרי להחלפה זו, אך זה המצב.

<u>הביטוי הנכון:</u> $V_P = \frac{kQ}{3R} + \frac{kq}{R}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול משתי סיבות עיקריות: (1) אי-התאמה של יחידות מידה, יחידות הביטוי הן:

$$\frac{N \cdot m^2 \cdot C^{-2} \cdot C^2 \cdot m}{(m^2)^{3/2}} = \frac{N \cdot m^3}{m^3} = N$$

אלו אינן יחידות של אנרגיה אלא של כוח; (2) אי-התאמה למקרה גבולי של ראשית הצירים: בגבול $(x,y) \to (0,0)$ האנרגיה אמורה להיות גודל סופי (יש ערך סופי לפוטנציאל החשמלי בנקודה זו). אך על פי הביטוי $U(0,0) \to \infty$.

את ביטוי II יש לפסול עקב סימטריה. הביטוי אמור להיות סימטרי יחסית לציר y, כלומר $U(-x,y) = U(x,y)$ וזה אינו המצב.

<u>הביטוי הנכון:</u> $U(x,y) = kqq_0\left(\frac{1}{\sqrt{(x-d)^2+y^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x+d)^2+y^2}}\right)$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – מעגלים חשמליים: זרם, מתח והתנגדות

<u>שאלה 1</u>

נתונה קופסה סגורה ובה מחוברים שלושה נגדים R_1, R_2, R_3 זה לזה באופן חיבור <u>לא ידוע</u>.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור ההתנגדות השקולה R_T של הקופסה. תלמידים כתבו ביטויים שונים להתנגדות ובהם גם הביטויים האלה:

I. $R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}$

II. $R_T = \frac{(R_2-R_1)(R_3-R_2)+(R_3-R_1)(R_2-R_3)+(R_1-R_2)(R_3-R_1)}{R_1+R_2+R_3}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>

תלמידים בנו מעגל חשמלי למציאת הכא"מ וההתנגדות הפנימית של סוללה מן הרכיבים הבאים:
סוללה בעלת כא"מ ε והתנגדות פנימית r, נגד משתנה R_x, ואמפרמטר <u>לא אידיאלי</u> שהתנגדותו R_A.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי למתח ההדקים V_{ab} כתלות בהתנגדות רכיבי המעגל. תלמידים כתבו ביטויים שונים למתח ההדקים ובהם גם הביטויים האלה:

I. $V_{ab} = \frac{\varepsilon \cdot R_A}{R_x+R_A+r}$

II. $V_{ab} = \frac{\varepsilon \cdot r}{R_x+R_A+r}$

III. $V_{ab} = \frac{\varepsilon \cdot R_x}{R_x+R_A+r}$

IV. $V_{ab} = \frac{\varepsilon \cdot (R_x+r)}{R_x+R_A+r}$

המורה פסל על הסף את ארבעת הביטויים I, II, III ו-IV.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי III עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי IV עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול משתי סיבות עיקריות: (1) בגבול $R_3 \to 0$ מתקבלת התנגדות $R_T \to \infty$ ע"פ הביטוי. אולם, במצב זה הקופסה מכילה 2 נגדים בלבד; (2) אי-התאמה למגבלה פיזיקלית, לא ייתכן שההתנגדות השקולה בקופסה גדולה מסכום ההתנגדויות של כל הנגדים בנפרד. אך למשל עבור $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 1\Omega$ ו- $R_3 = 0.5\Omega$ מתקבל ע"פ הביטוי $R_T = 20\Omega > 11.5\Omega$.

את ביטוי II יש לפסול משתי סיבות עיקריות: (1) במקרה הפרטי $R_1 = R_2 = R_3$ מתקבל ע"פ הביטוי ש- $R_T = 0$ ולא ייתכן שזה המצב; (2) הביטוי סימטרי להחלפה $R_1 \to R_2 \to R_3 \to R_1$ (או לחלופין בכיוון השני), בעוד אופן החיבור לא ידוע ולכן הביטוי הנכון לא אמור להיות סימטרי.

<u>הביטויים הנכונים (בלי הגבלת הכלליות):</u>

במקרה של חיבור שלושת הנגדים בטור: $R_T = R_1 + R_2 + R_3$;

במקרה של חיבור בטור של R_1, R_2 וחיבור מקביל ל-R_3: $R_T = \frac{R_3(R_1+R_2)}{R_1+R_2+R_3}$;

במקרה של חיבור במקביל של R_1, R_2 וחיבור בטור ל-R_3: $R_T = \frac{R_1R_2+R_3R_1+R_3R_2}{R_1+R_2}$;

במקרה של חיבור שלושת הנגדים במקביל: $R_T = \frac{R_1R_2R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_1R_3}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה גבולי: בגבול של אמפרמטר אידאלי $R_A \to 0$ מתקבל מתח הדקים $V_{ab} \to 0$ אך זה אינו המצב.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה גבולי: בגבול של סוללה אידאלית $r \to 0$ מתקבל מתח הדקים $V_{ab} \to 0$ אך זה אינו המצב.

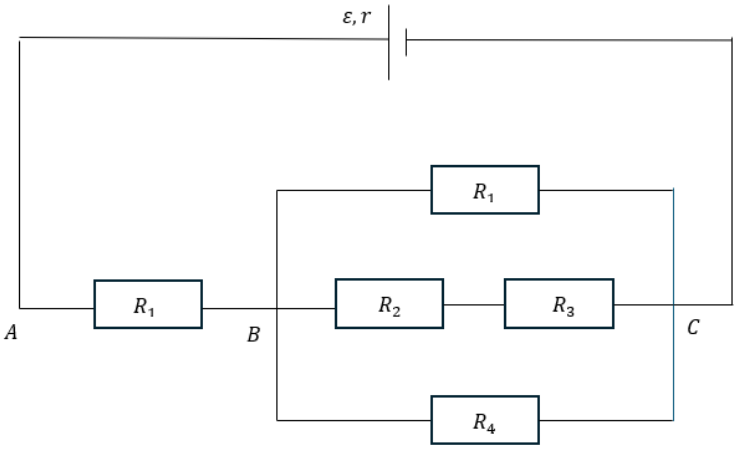
את ביטוי III יש לפסול משתי סיבות עיקריות: (1) בגבול של סוללה אידאלית $r \to 0$ מתקבל מתח הדקים שתלוי בהתנגדות R_x אך זה אינו המצב; (2) בגבול של $R_x \to 0$ מתקבל $V_{ab} \to 0$ למרות שזה <u>אינו</u> מצב של קצר כי לאמפרמטר יש התנגדות.

את ביטוי IV יש לפסול עקב אי-התאמה למקרה גבולי: בגבול של אמפרמטר אידאלי $R_A \to 0$ מתקבל מתח הדקים $V_{ab} = \varepsilon$ אך זה אינו המצב

<u>הביטוי הנכון:</u> $V_{ab} = \frac{\varepsilon \cdot (R_x+R_A)}{R_x+R_A+r}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – מעגלים חשמליים: הספק ונצילות

<u>שאלה 1</u>



נתון המעגל החשמלי בתרשים. ההתנגדות השקולה בין הנקודות B ו-C מסומנת ב-R_{BC}.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור נצילות המעגל η. תלמידים כתבו ביטויים שונים לנצילות ובהם גם הביטויים האלה:

I. $\eta = \frac{R_1+r}{R_{BC}+r}$

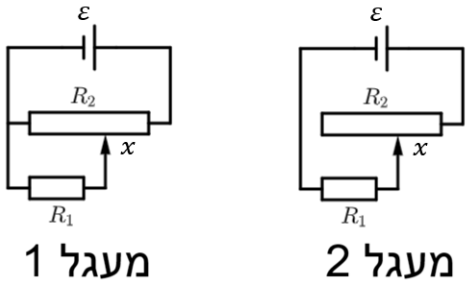
II. $\eta = \frac{\varepsilon^2(R_1+R_{BC})}{(R_1+r+R_{BC})^2}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>



נתון מקור מתח אידאלי בעל כא"מ ε, נגד קבוע R_1, ונגד משתנה שהתנגדותו המרבית היא $R_2 = 6R_1$, אורכו המלא הוא L והמרחק בין מיקום הגררה הניידת לקצהו הימני הוא x.

במעגל 1 מחברים את הנגד המשתנה חיבור פוטנציומטרי, נסמן ב-P_1 את ההספק <u>המרבי</u> שיכול להתפתח במעגל זה.

במעגל 2 מחברים את הנגד המשתנה חיבור ריאוסטטי, נסמן ב-P_2 את ההספק <u>המרבי</u> שיכול להתפתח במעגל זה.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור היחס בין ההספקים המרביים $\frac{P_1}{P_2}$. תלמידים כתבו ביטויים שונים ליחס ההספקים המרביים ובהם גם הביטויים האלה:

I. $\frac{P_1}{P_2} = \frac{6\varepsilon^2}{7R_1}$

II. $\frac{P_1}{P_2} = \frac{x}{L-x}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב מגבלה פיזיקלית על ערכי הנצילות. עקב אופן החיבור מתחייב ש- $R_{BC} < R_1$ ולכן על פי הביטוי בהכרח מתקבל ש- $\eta > 1$ והדבר לא ייתכן.

את ביטוי II יש לפסול עקב יחידות מידה. נצילות היא גודל חסר יחידות, אך לביטוי יש יחידות של:

$$\frac{V^2\Omega}{\Omega^2} = \frac{V^2}{\Omega} = W$$

<u>הביטוי הנכון:</u> $\eta = \frac{R_{BC}+R_1}{R_{BC}+R_1+r}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה ליחידות מידה: לביטוי יש יחידות של הספק $W = \frac{V^2}{\Omega}$ אולם יחס הספקים הוא גודל חסר יחידות.

את ביטוי II יש לפסול משתי סיבות עיקריות: (1) תלות הביטוי ב-x. ההספק המרבי בכל מעגל מתקבל עבור ערך מסוים של x, אותו ניתן להביע במידת הצורך באמצעות L ולאחר מכן להביע את ההספק באמצעות ε ו-R_1 <u>בלבד</u>. לכן היחס בין ההספקים המרביים לא יכול להיות תלוי ב-x; (2) בשני המעגלים לא ייתכן מצב של קצר, ולכן בשני המעגלים ההספק המרבי הוא סופי. מכאן שהיחס בין ההספקים הוא גודל סופי. למרות זאת, ע"פ הביטוי כאשר $x = L$ מתקבל $\frac{P_1}{P_2} \to \infty$ והדבר לא ייתכן.

<u>הביטוי הנכון:</u> $\frac{P_1}{P_2} = \frac{7}{6}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – מגנטיות

<u>שאלה 1</u>

תלמידים מבצעים את הניסוי למדידת $B_{E_\parallel}$, הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ (הניסוי "גלוונומטר טנגנטי"). הם משתמשים בסליל דק בעל N כריכות ורדיוס R, בו זורם זרם I ובמרכזו מצפן. הסליל מכוון כך שכאשר לא זורם זרם בסליל, המצפן מצביע בכיוון $0°$.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור הזרם I אותו יש להזרים בסליל על מנת שזווית הסטייה של המצפן תהייה $30°$. תלמידים כתבו ביטויים שונים לזרם ובהם גם הביטויים האלה:

I. $I = \frac{2RB_{E_\parallel}}{\mu_0 N}\cos 30°$

II. $I = \frac{2\mu_0 RB_{E_\parallel}}{\sqrt{3}N}$

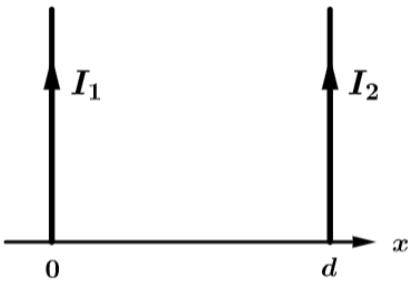
המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>

שני תילים אינסופיים מקבילים מוחזקים במרחק d זה מזה.
בתיל 1 זורם זרם I_1 והוא ממוקם בנקודה ששיעורה $x = 0$,
בתיל 2 זורם זרם I_2 והוא ממוקם בנקודה ששיעורה $x = d$.
מציבים תיל אינסופי I_3 במקביל לשני התילים.



תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור שיעור הנקודה x בה יש למקם את התיל השלישי על מנת שיהיה בשיווי משקל. תלמידים כתבו ביטויים שונים לשיעור הנקודה ובהם גם הביטויים האלה:

I. $x = \frac{I_2 d}{I_2 - I_1}$

II. $x = \frac{\mu_0 I_1 I_2 d}{I_1 + I_2}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול מסיבה גיאומטרית: זווית הסטייה של מחט המצפן קשורה בשדות לפי $\tan\alpha$, לא יכולה להיות לביטוי תלות ב-$\cos\alpha$.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה של יחידות מידה. היחידות של הביטוי הן:

$$\frac{\left(T\cdot\frac{m}{A}\right)\cdot m\cdot T}{1}=T^2\cdot\frac{m^2}{A}\neq A$$

<u>הביטוי הנכון:</u> $I=\frac{2RB_{E_\parallel}}{\sqrt{3}\mu_0 N}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב ערכים לא הגיוניים. מכיוון ששני הזרמים זורמים באותו כיוון, מתחייב ש-$0<x<d$. אולם ע"פ הביטוי התוצאה חורגת מטווח זה בכל אחד מן תחומי הזרמים:
(1) בתחום $I_2<I_1$ מתקבל $x<0$; (2) בתחום $I_2>I_1$ מתקבל $x>d$; (3) במקרה $I_2=I_1$ מתקבל $x\to\infty$.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה של יחידות מידה. לביטוי זה יש יחידות של:

$$\frac{\left(T\cdot\frac{m}{A}\right)\cdot A^2\cdot m}{A}=T\cdot m^2\neq m$$

<u>הביטוי הנכון:</u> $x=\frac{I_1 d}{I_1+I_2}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – קיבול וקבלים

<u>שאלה 1</u>

נתון קבל לוחות שקיבולו C_0 הטעון במטען Q_0 ומנותק ממקור המתח. בין לוחות הקבל שורר ריק. מכניסים בין לוחות הקבל חומר דיאלקטרי בעל מקדם דיאלקטרי ε_r הממלא את כל הנפח שבין הלוחות.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור השינוי באנרגיה האגורה בקבל ΔU בעקבות הכנסת החומר הדיאלקטרי. תלמידים כתבו ביטויים שונים לשינוי באנרגיה ובהם גם הביטויים האלה:

I. $\Delta U = \frac{Q_0^2}{2C_0}(\varepsilon_r - 1)$

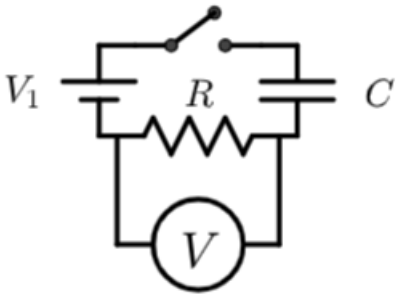
II. $\Delta U = \frac{1}{2}C_0V^2(\varepsilon_r - 1)$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>



במעגל החשמלי נתון קבל <u>לא טעון</u> שקיבולו C, נגד קבוע R ומקור מתח V_1, ברגע $t = 0$ סוגרים את המפסק והקבל מתחיל להיטען.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור המתח על הנגד $V_R(t)$ כפונקציה של הזמן. תלמידים כתבו ביטויים שונים למתח ובהם גם הביטויים האלה:

I. $V_R(t) = V_1\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

II. $V_R(t) = V_1e^{-\frac{t}{R}}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב סימן האנרגיה. קיבול הקבל בהכרח גדל בהכנסת החומר הדיאלקטרי, המטען על הקבל נשאר קבוע, לכן האנרגיה $U=\frac{Q^2}{2C}$ בהכרח קטנה, כלומר: $\Delta U<0$ בהכרח. אולם, ע"פ הביטוי, ΔU בהכרח חיובי כי $\varepsilon_r>1$, והדבר לא ייתכן.

את ביטוי II יש לפסול עקב תלות השינוי באנרגיה במתח על הקבל. הקבל אינו מחובר למקור מתח ולכן המתח על הקבל משתנה במהלך הכנסת החומר הדיאלקטרי (קיבולו משתנה בעוד המטען עליו נשאר קבוע), לא ייתכן שהאנרגיה תלויה במתח על הקבל.

<u>הביטוי הנכון:</u> $\Delta U=\frac{Q_0^2}{2C_0}\left(\frac{1}{\varepsilon_r}-1\right)$

<u>שאלה 2</u>

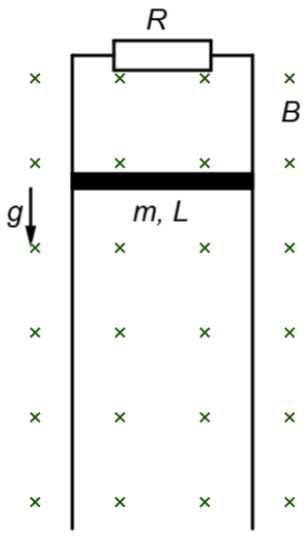
את ביטוי I יש לפסול עקב שלוש סיבות עיקריות: (1) אי-התאמה למקרה הפרטי $t=0$. במצב זה הקבל אינו טעון ולכן המתח על הנגד הוא $V_R=V_1$. אולם, על פי הביטוי, המתח הוא $V_R=0$; (2) אי-התאמה למקרה גבולי $t\to\infty$. במצב זה הקבל טעון במלואו והמתח על הנגד הוא $V_R=0$. אולם, על פי הביטוי, המתח הוא $V_R=V_1$; (3) בדיקת מונוטוניות: ככל שהזמן עובר, הקבל הולך ונטען, לכן המתח על הקבל הולך וגדל, וכתוצאה מכך המתח על הנגד הולך וקטן. על פי הביטוי, ככל שעובר הזמן המתח על הנגד הולך וגדל, בניגוד לתרחיש.

את ביטוי II יש לפסול עקב אי-התאמה של יחידות מידה. במעריך החזקה מופיע הביטוי $-\frac{t}{R}$ שהוא אינו חסר יחידות אלא בעל יחידות של $F=\frac{s}{\Omega}$. הביטוי $e^{-\frac{t}{R}}$ אם כן, חסר משמעות.

<u>הביטוי הנכון:</u> $V_R(t)=V_1e^{-\frac{t}{\tau}}$

חשיבה ביקורתית על ביטוי פרמטרי – השראה אלקטרומגנטית

<u>שאלה 1</u>



מוט מוליך שמסתו m ואורכו L משוחרר ממנוחה ונופל אנכית בהשפעת כוח הכובד על גבי שתי מסילות אנכיות מוליכות ומקבילות וחסרות חיכוך. המסילות מחוברות בקצה העליון דרך נגד שהתנגדותו R. המסילות ארוכות מאוד כך שהמוט לא מגיע לרצפה במהלך תנועתו.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור המהירות המרבית v_{max} של המוט. תלמידים כתבו ביטויים שונים למהירות ובהם גם הביטויים האלה:

I. $v_{max} = \frac{mgR}{BL}$

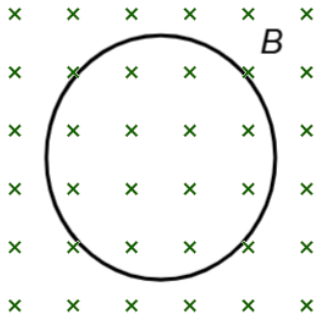
II. $v_{max} \to \infty$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

<u>שאלה 2</u>



טבעת שרדיוסה r והתנגדותה R נמצאת באזור בו שורר שדה מגנטי אחיד המשתנה בזמן על פי הביטוי $B(t) = B_0 + \beta t$.

תלמידי פיזיקה התבקשו לפתח ביטוי עבור הזרם המושרה $I(t)$ בטבעת כפונקציה של הזמן. תלמידים כתבו ביטויים שונים לזרם ובהם גם הביטויים האלה:

I. $I(t) = \frac{\pi r^2 B_0 \beta}{Rt}$

II. $I(t) = \frac{2\pi r \beta}{R}$

המורה פסל על הסף את שני הביטויים I ו-II.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי I עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

קבעו על בסיס איזו טענה פיזיקלית יש לפסול את ביטוי II עוד לפני מציאת הביטוי הנכון.

הצעה לפתרון

<u>שאלה 1</u>

את ביטוי I יש לפסול עקב אי-התאמה של יחידות מידה. לביטוי יש יחידות של מתח ולא של מהירות:

$$\frac{\left(kg\cdot\frac{m}{s^2}\right)\cdot\Omega}{T\cdot m}=\frac{(N)\cdot\Omega}{T\cdot m}=\frac{(T\cdot A\cdot m)\cdot\Omega}{T\cdot m}=A\cdot\Omega=V\neq\frac{m}{s}$$

את ביטוי II יש לפסול עקב שתי מגבלות פיזיקליות: (1) לא ייתכן שמהירות תהיה גדולה ממהירות האור בריק, לכן לא תיתכן מהירות אינסופית בשום מקרה; (2) לא ייתכן שהמוט יאיץ לנצח כי על המוט פועל כוח מגנטי (התלוי בכא"מ המושרה) המתנגד לכוח הכבידה. כוח זה גדל ככל שגדלה מהירות המוט, ולכן המוט יגיע בסופו של דבר לתנועה במהירות קבועה וסופית התלויה בנתוני הבעיה.

<u>הביטוי הנכון:</u> $v=\frac{mgR}{B^2L^2}$

<u>שאלה 2</u>

את ביטוי I יש לפסול משלוש סיבות עיקריות: (1) אי-התאמה ביחידות מידה. יש לשים לב ש-β הוא בעל יחידות של $\frac{T}{s}$ ולכן יחידות המידה של הביטוי הן: $A\cdot\frac{T}{s}\neq A$; $\frac{m^2\cdot T\cdot\frac{T}{s}}{\Omega\cdot s}=\frac{Wb\cdot\frac{T}{s}}{\Omega\cdot s}=\frac{V\cdot\frac{T}{s}}{\Omega}=A\cdot\frac{T}{s}\neq A$

(2) בביטוי ישנה תלות בזמן t. היות שהשטף המגנטי משתנה בצורה לינארית, הכא"מ המושרה המתפתח בטבעת הוא קבוע. לכן, הזרם המושרה צריך להיות קבוע ולא תלוי בזמן, וזה אינו המצב;

(3) בביטוי ישנה תלות ב-B_0. הערך B_0 הוא ערך התחלתי לשדה המגנטי, ואינו משפיע בשום צורה על הכא"מ המושרה שקשור בקצב השינוי בשטף. לכן, הזרם המושרה צריך להיות בלתי תלוי ב-B_0 וזה אינו המצב.

את ביטוי II יש לפסול משתי סיבות עיקריות: (1) אי-התאמה ביחידות מידה. היחידות של הביטוי הן: $A\neq\frac{A}{m}=\frac{V}{\Omega\cdot m}=\frac{Wb}{\Omega\cdot m\cdot s}=\frac{m^2\cdot T}{\Omega\cdot m\cdot s}=\frac{m\cdot\frac{T}{s}}{\Omega}$; (2) סיבה גיאומטרית: הזרם המושרה קשור בשטף דרך הטבעת, והשטף קשור בשטח הטבעת. $2\pi r$ הוא ביטוי להיקף הטבעת, ולא לשטח שלה.

<u>הביטוי הנכון:</u> $I(t)=\frac{\pi r^2\beta}{R}$