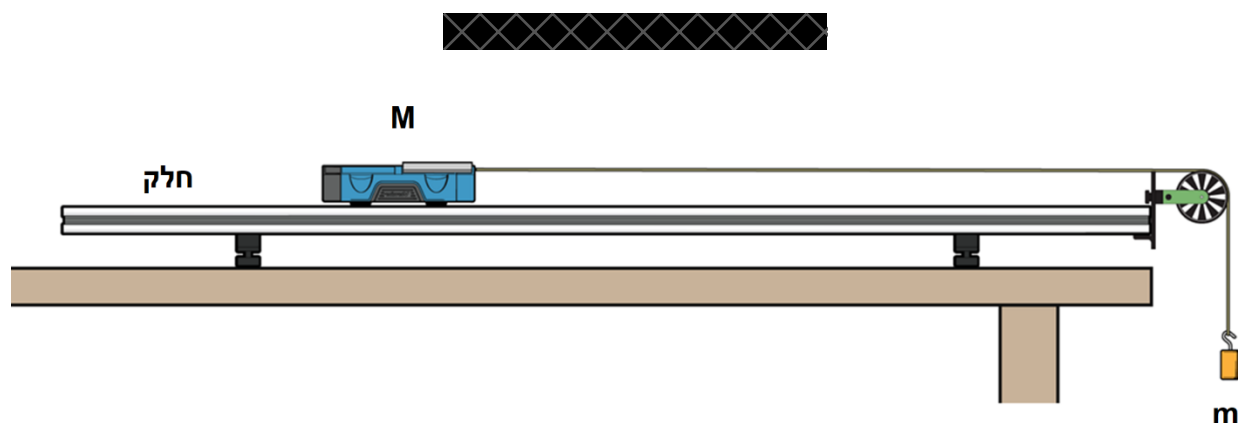


הכנה לניסוי מעבדה - החוק השני של ניוטון

האיור מתאר עגלה שמסתה M הנעה על גבי שולחן אופקי חלק. המסה M מחוברת, באמצעות חוט (שמסתו זניחה), סביב גלגלת (שהחכוך בינה לבין החוט זניח), למתלה שמסתו m .

א. רשמו ביטוי לתאוצת המערכת כתלות ב- M , m , g (ניתן לפתור על ידי סימון כוחות על כל גוף בנפרד

או ע"י פתרון כמערכת, הקפידו על בחירת צירים נכונה!): $a = \frac{mg}{M+m}$.

בניסוי המתוכנן, המסה M הינה עגלה ובתוכה משקולות. אנו נמדוד את מהירות העגלה בעזרת חיישן מרחק, המחובר למחשב, ונקבל גרף מהירות-זמן. מתוך שיפוע הגרף נוכל לדעת את תאוצת המערכת.

המסה m הינה מתלה שעליו ניתן לתלות משקולות. במהלך הניסוי הראשון נעביר בכל מדידה חלק מהמשקולות שעל העגלה למתלה ובכל פעם נמדוד את תאוצת המערכת. המסה הכוללת $M+m$ של המערכת תישאר קבועה בחלק הראשון של הניסוי (כלומר לא נוסיף משקולות מבחוץ, אלא רק נעביר משקולות מהעגלה למתלה).

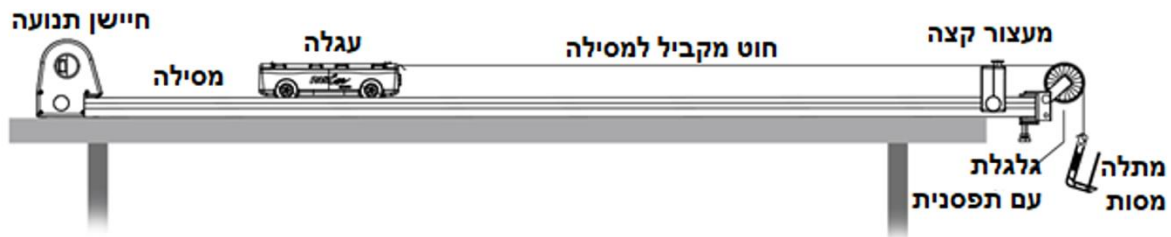
ב. הביטוי על הביטוי שקיבלתם/ בסעיף א. אם החוק השני של ניוטון אכן מתקיים, נקבל יחס ישר בין a לבין m

ג. שיפוע הגרף יהיה קבוע וערכו יהיה שווה ל: $\frac{g}{M+m}$ (קבענו כי $M+m$ קבוע).

הנחיות לביצוע הניסוי - אישור החוק השני של ניוטון בעזרת חיישנים ממוחשבים

מטרת הניסוי: אישור החוק השני של ניוטון.

ציוד: מסלול חלק, עגלה, משקולות, מתלה משקולות, חוט, גלגלת, חיישן מרחק, מחשב, תוכנת PASCO, מאזניים אלקטרוניים.

הכנה לביצוע המדידה

תמונה 1

(1) **תיאור המערכת:** מערכת הניסוי מורכבת מעגלה, הנעה על מסילה אופקית חלקה, וממתלה מסות, המחוברים ביניהם באמצעות חוט מקביל למסילה (מסת החוט זניחה), הכרוך סביב גלגלת (החיוך בין החוט לגלגלת זניח). על המסילה מותקן 'חיישן תנועה', השולח גלי קול לכיוון העגלה - ובעזרת ההחזר שלהם, מזהה את מיקום העגלה בכל רגע ורגע.

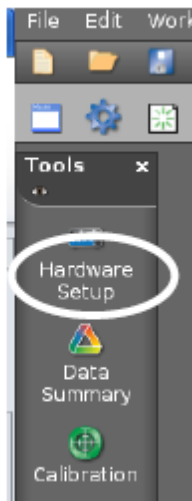
(2) **חיבור המערכת:** יש לחבר את חיישן התנועה למחשב באמצעות כבל USB או באמצעות Bluetooth. בצד אחד של המסילה יישב החיישן בצידה השני של המסילה יש להתקין אביזר שנקרא 'מעצור קצה', ואליו יש לחבר את הגלגלת (המערכת ככל הנראה כבר תהיה מותקנת על שולחנכם).

הפעלת התוכנה: יש לפתוח את התוכנה PASCO CAPSTONE, הנמצאת על המחשב.

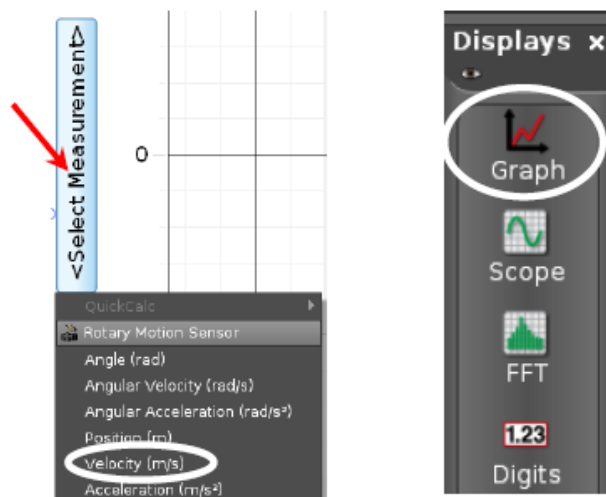
א. ראשית נוודא שהתוכנה מזהה את החיישן: נלחץ על כפתור Hardware Setup (סרגל Tools, בחלק השמאלי של המסך), ונוודא ש-MOTION SENSOR מופיע.

ב. ניצור מערכת צירים "מהירות-זמן":

בסרגל Displays בצד ימין נבחר ב-Graph ונגרור אותו למסך הראשי. ע"י לחיצה על מקש ימני בעכבר על שמות הצירים - נשנה את הצירים להיות מהירות וזמן (Velocity, Time). ראו תמונה 3.

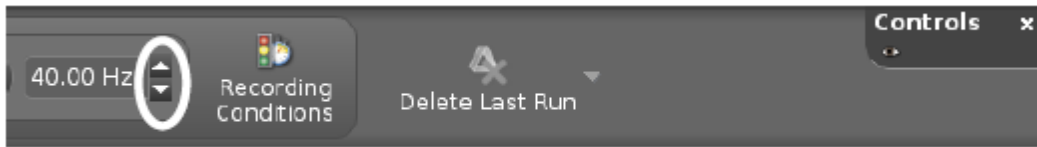


תמונה 2



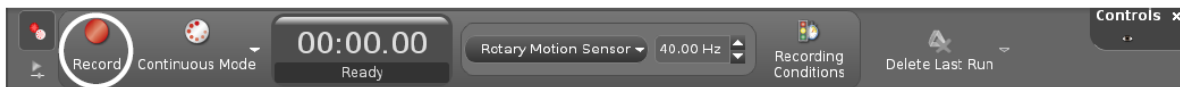
תמונה 3

ג. נשנה את תדירות הקריאה ל-40Hz בסרגל Controls בתחתית המסך (40 דגימות בשנייה).



תמונה 4

ד. נלחץ על כפתור ההקלטה האדום "Record" ונזיז מעט את העגלה, נוודא שהחיישן מזהה אותה ע"י קריאת נתונים על הגרף.



תמונה 5

ביצוע המדידה

- א. מדדו את מסתו של מתלה המשקולות כאשר הוא ריק : 5.0 גרם
- ב. מדדו את מסת העגלה כשהיא ריקה ממשקולות : 250.9 גרם
- ג. רשמו את מסתן של כל המשקולות יחדיו : 60.0 גרם
- ד. המדידה הראשונה תתבצע כאשר כל המסות בתוך העגלה והמתלה ריק, לכן במדידה זו (רשמו את התשובות ביחידות של ק"מ):

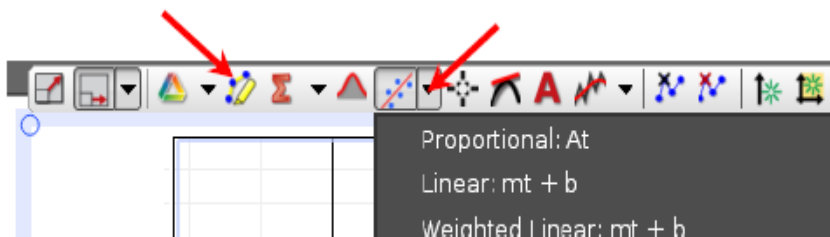
$$m = 0.005 \text{ ק"ג}$$

$$M = 0.3109 \text{ ק"ג}$$

$$m + M = 0.3159 \text{ ק"ג}$$
- ה. כרכו את החוט סביב הגלגלת, וודאו שהמסילה מאוזנת.
- ו. החזיקו את העגלה. בקשו מתלמיד נוסף ללחוץ על כפתור "Record" בתוכנה ושחררו את העגלה. צפו בתנועת העגלה, ועצרו את העגלה מספר סנטימטרים לפני שהיא פוגעת בגלגלת.
- ז. על המסך מתקבל גרף מהירות-זמן. נמצא את השיפוע שלו :

סמן על הגרף קטע המתאים לתנועת העגלה בתאוצה קבועה. לשם כך, הקלק על כלי בחירה בסרגל הכלים של התצוגה הגרפית (תרשים 6) – באזור הגרף יופיע מלבן שצבעו תואם את צבע הגרף. גרור את המלבן אל הקטע, והתאם את רוחבו של המלבן לקטע זה באמצעות הזזת צלעותיו.

התאם פונקציה קווית לקטע שבחרת: בסרגל הכלים של התצוגה הגרפית, לחץ על המשולש הקטן הנמצא מימין מהכפתור , ובחר Linear מתוך רשימת הפונקציות (תרשים 6). במקרא קו המגמה תמצא את מאפייני הקו, כאשר m הוא שיפועו. רשום את ערך השיפוע בטבלה שהכנת.



תרשים 6

ניסוי 1 - הזנת התוצאות בטבלת הנתונים

מומלץ להכין, כבר כעת, טבלת תוצאות באקסל:

#	mass m (kg)	measure 1	measure 2	avg. acceleration (m/s ²)
1.0000	0.0050	0.0726	0.0727	0.0727
2.0000	0.0150	0.3720	0.3730	0.3725
3.0000	0.0250	0.6690	0.6810	0.6750
4.0000	0.0350	0.9690	0.9700	0.9695
5.0000	0.0450	1.2800	1.2600	1.2700
6.0000	0.0550	1.5700	1.5700	1.5700
7.0000	0.0650	1.8900	1.8900	1.8900

חזרו על כל מדידה פעמיים (כל זוג מבצע מדידה אחת) והזינו בטבלה הבאה את ערכי המסה m והתאוצה עבור שתי המדידות. לאחר מכן חשבו (לא בעזרת מחשבון! אלא כנוסחה באקסל!) את התאוצה הממוצעת \bar{a} עבור שתי המדידות (שימו לב למספר הספרות העשרוניות אחרי הנקודה). רצוי להזין את הטבלה ישירות באקסל לחיסכון בזמן ועבודה. בכל מקרה עליכם/לצרף לדו"ח את טבלת הנתונים באקסל כאשר היא מלאה! (ניתן לשלב את הטבלה כאן או כנספח בסוף הדו"ח).

כעת, בכל מדידה, נעביר בכל פעם חלק מהמשקולות למתלה (כל פעם עוד קצת). יש לשמור על מספר כולל קבוע של סה"כ המשקולות בעגלה ובמתלה (כלומר כל המשקולות חייבות 'להשתתף בניסוי' בכל מדידה). נרשום בטבלה את ערכי המסה m ונבצע שוב את הניסוי (נמדוד את התאוצה פעמיים ונמצע).

ניסוי 1 - עיבוד התוצאות

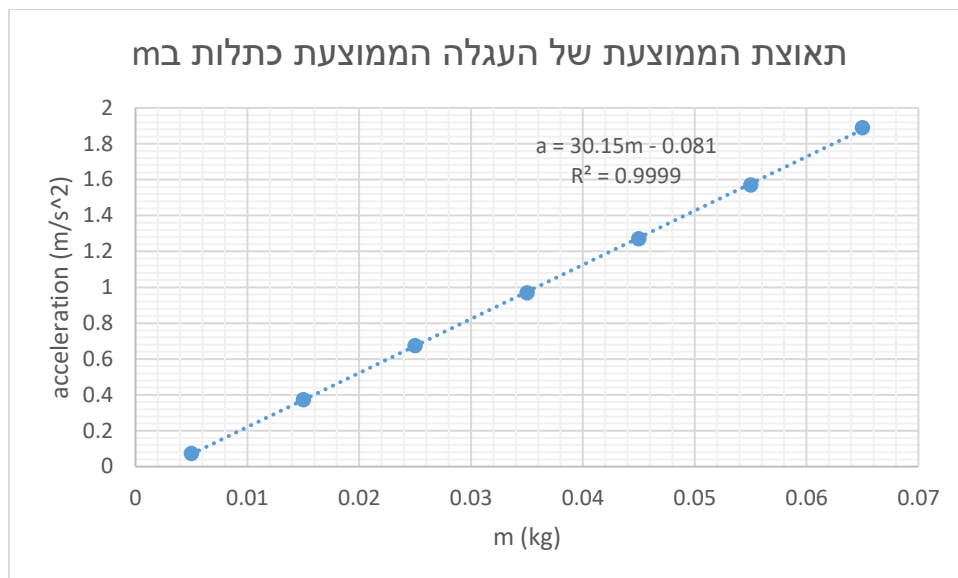
1. צרו באקסל גרף פיזור (נקודות בלבד) של התאוצה a כתלות במסה m . הקפידו על: שמות לצירים, היחידות של הצירים, כותרת מילולית לגרף, הוסיפו לנקודות בגרף: קו מגמה לינארי + הצג משוואה בתרשים + הצג ערך R^2 , שנו את המשתנים x ו- y במשוואת קו המגמה למשתנים המתאימים בניסוי. לבסוף, הוסיפו לגרף מקסימום קווי רשת אופקיים ואנכיים.

2. מהו שיפוע הגרף (כולל יחידות)? איזה גודל הוא מייצג? שיפוע הגרף שווה ל- $\frac{g}{M+m}$.

3. מהי נקודת החיתוך עם הציר האנכי (כולל יחידות)? מה ערכה 'אמור' להיות בתיאוריה? נקודת החיתוך עם הציר האנכי היא 0.00269 (kg) . בתיאוריה, נקודת החיתוך אמורה להיות 0 בדיוק (נובע מהמשוואה

$$a = \frac{g}{M+m} \cdot m$$

(ניתן לשלב את הגרף כאן או כנספח בסוף הדו"ח).



שיפוע הגרף: $30.15 \left(\frac{m}{kg \cdot s^2} \right)$

ניסוי 1 - מסקנות

4. האם התקבלה פונקציה ליניארית? כן.
5. מה מעיד ערך R^2 שקיבלתם? המשתנה R^2 מייצג את רמת ההתאמה של קו המגמה לגרף הפיזור (הנקודות). כאשר R^2 גדול יותר (ויש לו חסם עליון של 1), כך קו המגמה מתאים יותר לגרף הפיזור. התנועה של העגלה מאוד קרובה לתנועה שוות תאוצה (תנועה ליניארית), עם טעות קלה שנובעת מחיכוך עם המסלול, חיכוך עם האוויר, טעויות מדידה של התוכנה ועוד.

הערה. בניסוי זה יצא לנו $R^2 = 0.9999$, **ולא 1!** כמובן שקיבלנו תוצאה מאוד מאוד קרובה ל1, ולכן "ניתן" לומר כי התנועה של העגלה היא בדיוק תנועת שוות תאוצה.

6. האם ערך השיפוע של הגרף תואם לגודלו הידוע? חשבו את הגודל הידוע ואת אחוז הסטייה בין ערך השיפוע שהתקבל בניסוי לבין ערך השיפוע שאמור להתקבל על פי הגודל הידוע. (יש להראות את אופן החישוב ולא לרשום רק תשובה סופית).

במציאות, קיבלנו שהשיפוע $30.15 \left(\frac{m}{kg \cdot s^2} \right)$, בתיאוריה השיפוע אמור להיות $31.02 \left(\frac{m}{kg \cdot s^2} \right) = \frac{9.8}{0.3159}$.
 אחוז הסטייה בין הערכים הוא $2.8\% = \frac{|31.02 - 30.15|}{31.02} \times 100$

7. האם אושר החוק השני של ניוטון? נמקו! (גם תשובה שלילית היא אפשרית, כל עוד מסבירים את הבעיות, ואת המקורות לשגיאות בפרק הבא).

כן, החוק השני של ניוטון כן אושר בניסוי זה. לפי החוק השני של ניוטון ($F = ma$), ניתן למצוא משוואה לתיאור תאוצת הגופים כתלות במסה שלהם (a כפונקציה של m), ובניסוי התאוצה שנמדדה עבור כל מסה תואמת (עבור אחוז סטייה נמוך) לתאוצה שחישבנו בתאוריה, בעזרת החוק השני של ניוטון. על שגיאות במדידה נדון בהמשך.

ניסוי שני

- בניסוי זה נשאר את המסה m קבועה, ונוסיף כל פעם משקולות **מבחץ** לעגלה. כלומר M , מסת העגלה + המשקולות בתוכה משתנה. עבור כל M נמדוד את תאוצת המערכת פעמיים ונמצע.
- ניעזר בביטוי לתאוצה שפיתחנו קודם: $a = \frac{mg}{M+m}$ ממבט ראשוני על ביטוי זה קשה לחשוב על קשר לינארי בין המשתנה התלוי (התאוצה) לבין המשתנה הבלתי תלוי (M).
- נשתמש ב'טריק' המתמטי הבא:

$$\begin{aligned}\frac{1}{a} &= \frac{M+m}{mg} \\ \frac{1}{a} &= \frac{M}{mg} + \frac{m}{mg} \\ \frac{1}{a} &= \frac{M}{mg} + \frac{1}{g} \\ \frac{1}{a} &= \frac{1}{mg}M + \frac{1}{g}\end{aligned}$$

שקיבלנו:

לביטוי זה
לינארית
מהצורה:

$\frac{1}{a}$	=	$\frac{1}{mg}$	·	M	+	$\frac{1}{g}$
		משוואה		יש מבנה של		
y	=	a	·	x	+	b
המשתנה התלוי שהוא הציר האנכי בגרף	=	קבוע השווה לשיפוע הגרף	·	המשתנה הבלתי תלוי שהוא הציר האופקי בגרף	+	קבוע השווה לנקודת החיתוך של הגרף עם הציר האנכי

- איזה גרף לינארי ניתן לשרטט על סמך תוצאות הניסוי והביטוי שקיבלנו? הגרף של אחד חלקי התאוצה כתלות ב(מסת העגלה + המשקולות בתוכה).

- בגרף זה השיפוע ייצג את $\frac{1}{mg}$.
- ונקודת החיתוך עם הציר האנכי תייצג את $\frac{1}{g}$.

תהליך זה נקרא "**לינארזציה**" - השתמשנו בפונקציה לא לינארית ושינינו אותה כך שנוכל לצייר גרף לינארי. פעולה זו היא נפוצה למדיי בניתוח ניסויים מדעיים משום שניתוחו של גרף לינארי הינו פשוט יחסית. חזרו על המדידות עבור הניסוי השני.

ניסוי 2 - הזנת התוצאות בטבלת הנתונים (בניסוי 2 המסה m נשארת קבועה וערכה שווה 45 גרם)

מומלץ להכין, כבר כעת, טבלת תוצאות באקסל:

#	mass M (kg)	measure 1	measure 2	avg. acceleration(m/s ²)	1/acceleration (s ² /m)
1	0.2509	1.34000	1.350	1.345	0.7435
2	0.2609	1.31000	1.320	1.315	0.7605
3	0.2709	1.28000	1.280	1.280	0.7813
4	0.2809	1.25000	1.230	1.240	0.8065
5	0.2909	1.21000	1.220	1.215	0.8230
6	0.3009	1.17000	1.170	1.170	0.8547
7	0.3109	1.13000	1.130	1.130	0.8850

חזרו על כל מדידה פעמיים (כל זוג מבצע מדידה אחת) והזינו בטבלה הבאה את ערכי המסה M והתאוצה עבור שתי המדידות. לאחר מכן חשבו (לא בעזרת מחשבון! אלא כנוסחה באקסל!) את התאוצה הממוצעת \bar{a} ואת $\frac{1}{\bar{a}}$ עבור שתי המדידות (שימו לב למספר הספרות העשרוניות אחרי הנקודה). רצוי להזין את הטבלה ישירות באקסל לחיסכון בזמן ועבודה. בכל מקרה עליכם/ לצרף לדו"ח את טבלת הנתונים באקסל כאשר היא מלאה! (ניתן לשלב את הטבלה כאן או כנספח בסוף הדו"ח).

כעת, בכל מדידה, נוסף בכל פעם חלק מהמשקולות לעגלה (כל פעם עוד קצת). יש לשמור על מסה קבועה של **המתלה + המשקולות בתוכה**. נרשום בטבלה את ערכי המסה M ונבצע שוב את הניסוי (נמדוד את התאוצה פעמיים ונמצע).

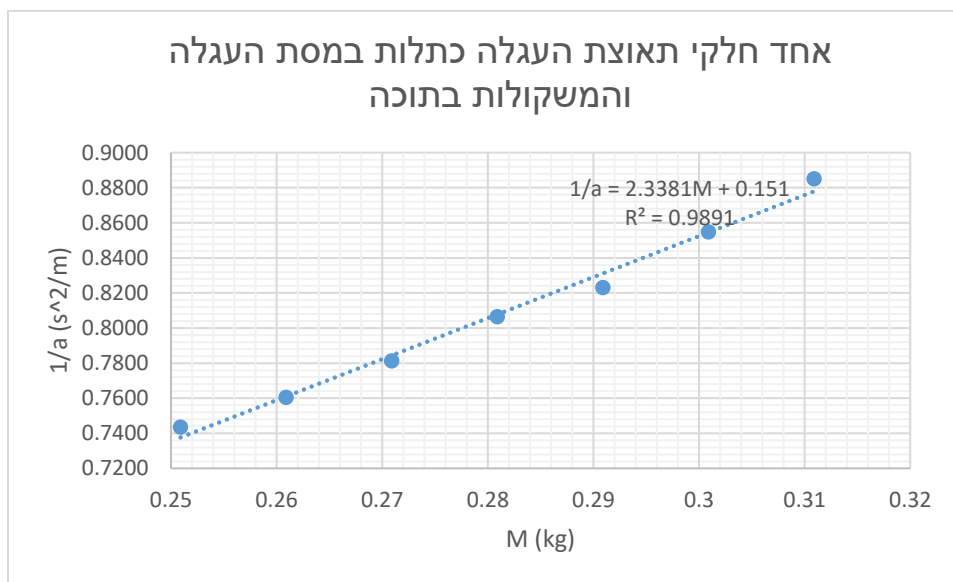
ניסוי 2 - עיבוד התוצאות

1. צרו באקסל גרף פיזור (נקודות בלבד) של $1/a$ (אחד חלקי התאוצה) כתלות במסה M . הקפידו על: שמות לצירים, היחידות של הצירים, כותרת מילולית לגרף, הוסיפו לנקודות בגרף: קו מגמה לינארי + הצג משוואה בתרשים + הצג ערך R^2 , שנו את המשתנים x ו- y במשוואת קו המגמה למשתנים המתאימים בניסוי. לבסוף, הוסיפו לגרף מקסימום קווי רשת אופקיים ואנכיים.

2. מהו שיפוע הגרף (כולל יחידות)? איזה גודל הוא מייצג? השיפוע הוא $2.3381 \left(\frac{s^2}{kg \cdot m} \right)$, והוא מייצג את הערך של $\frac{1}{mg}$.

3. מהי נקודת החיתוך עם הציר האנכי (כולל יחידות)? מה ערכה 'אמור' להיות בתיאוריה? נקודת החיתוך עם הציר האנכי היא $0.151 \left(\frac{s^2}{m} \right)$. בתיאוריה, הנקודת חיתוך אמורה להיות $\frac{1}{g}$ (כלומר, בניסוי קיבלנו קירוב לג: $\frac{1}{g} \approx 0.151$).

(ניתן לשלב את הגרף כאן או כנספח בסוף הדו"ח).



ניסוי 2 - מסקנות

4. האם התקבלה פונקציה לינארית? כן.
 5. האם ערך השיפוע של הגרף תואם לגודלו הידוע? חשבו את הגודל הידוע ואת אחוז הסטייה בין ערך השיפוע שהתקבל בניסוי לבין ערך השיפוע שאמור להתקבל על פי הגודל הידוע. (יש להראות את אופן החישוב ולא לרשום רק תשובה סופית).

$$\frac{1}{mg} = \frac{1}{0.045 \cdot 9.8} = 2.267 \left(\frac{s^2}{m \cdot kg} \right), 2.3381 \left(\frac{s^2}{m \cdot kg} \right) \text{ בתיאוריה השיפוע אמור להיות}$$

$$\frac{|2.267 - 2.3381|}{2.266} \times 100 = 3.1\% \text{ אחוז הסטייה בין הערכים הוא}$$

6. האם אושר החוק השני של ניוטון? נמקו! (גם תשובה שלילית היא אפשרית, כל עוד מסבירים את הבעיות, ואת המקורות לשגיאות בפרק הבא).

כן, החוק השני של ניוטון כן אושר בניסוי זה. לפי החוק השני של ניוטון ($F = ma$), ניתן למצוא קשר בין התאוצה של גוף לבין המסה שלו. בניסוי הזה, הגענו לקשר הבא:

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{mg} \cdot M + \frac{1}{g}$$

כאשר:

- a מייצג את תאוצת המערכת
- m – מסת המשקולות (גוף 2)
- M – מסת העגלה (גוף 1) + מסת המשקולות (גוף 2) = המערכת
- g – קבוע הכובד בכוכב לכת עליו נעשה הניסוי.

בניסוי שלנו, המדידות נעשו על פני כדור הארץ (ועל כן $g = 9.8 \left(\frac{m}{s^2} \right)$), ואכן בניסוי קיבלנו כי

$$g = 9.504 \left(\frac{m}{s^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{mg} = 2.3381 \text{ (טעות של } 3.082\% \text{)} \left(\frac{1}{mg} = \frac{|9.8 - 9.504|}{9.8} \times 100 \right) \text{ על שגיאות במדידה נדון בהמשך.}$$

דיון בשגיאות

1. רשמו בטבלה הבאה את כל השגיאות שהיו עשויות להשפיע על תוצאות הניסוי. עבור כל שגיאה רשמו מהו הגורם לה להערכתכם? (המודד, מערך הניסוי, כלי המדידה) ומהו סוג השגיאה? (שיטתית, אקראית, גם וגם).

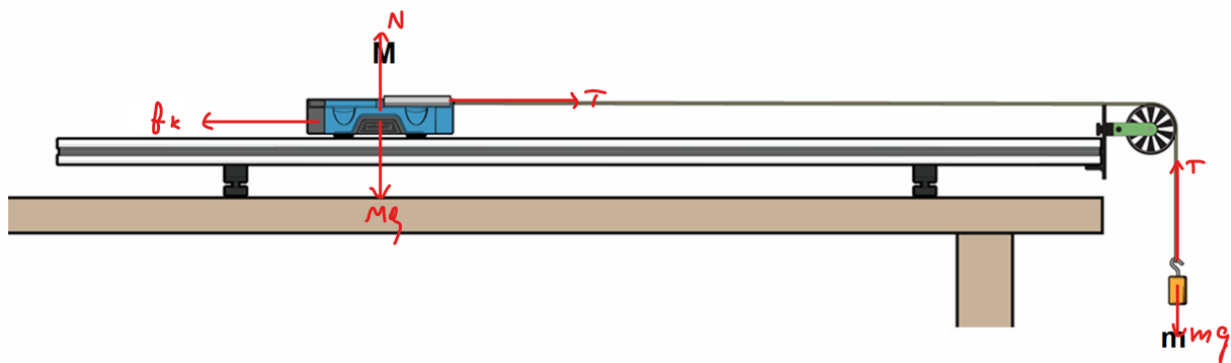
תיאור השגיאה	מקור השגיאה	סוג השגיאה
1. חיכוך המכוננית עם המסילה והאוויר	מערך ניסוי	אקראית
2. משקולות לא מדויקות	מכשור	שיטתית
3. מדידה וחישוב לא מדויקים	מכשור	אקראית
4. מסילה בשיפוע (לא אופקית בדיוק)	מודד	שיטתית
5. רעשים שהחיישו תנועה קולט	מכשור	אקראית

2. אילו מהשגיאות בניסוי הייתם יכולים/ות למנוע/לצמצם? כיצד? נוכל לצמצם את השגיאות 1,2,4 :

1. ניתן לצמצם את החיכוך בעזרת שימוש בשמן על המסילה, ובנוסף ניתן לבצע את הניסוי מתחת לוואקום, ובכך אין חיכוך עם האוויר.
2. ניתן להשיג משקולות יותר מדויקות ולבצע שקילות יותר מדויקות.
4. ניתן לבדוק מספר פעמים כי המסילה אופקית, מונחת בצורה ישרה על המשטח ואין גורמים חיצוניים שיזיזו את המסילה ממקומה לפני ביצוע הניסוי.

שאלה נוספת

במעבדה זו התעלמנו מהחיכוך הקיים בין גלגלי העגלה לבין המשטח. נתחו את הכוחות הפועלים במערכת ורשמו ביטוי פרמטרי לתאוצה a שהייתה מתקבלת אם היה חיכוך, כתלות ב- μ_k , g , m , M



ומכאן נובע:

$$\Sigma F_x = Ma$$

$$T - f_k = Ma \quad (1)$$

$$\Sigma F_y = ma$$

$$mg - T = ma \quad (2)$$

$$(1) + (2): mg - f_k = (m + M)a$$

$$a = \frac{mg - f_k}{m + M} = \frac{mg - \mu_k N}{m + M} = \frac{mg - \mu_k Mg}{m + M} = \frac{m - \mu_k M}{m + M} g$$

יש להגיש: בזוגות או יחידים/ות קובץ word המכיל:

- תדריך זה של המעבדה.
- שתי טבלאות מלאות באקסל של תוצאות הניסוי ה-1 וה-2
- שני גרפים באקסל של עיבוד תוצאות הניסוי ה-1 וה-2
- תשובות לכל השאלות במהלך התדריך.

הגשה עד שבוע מיום ביצוע הניסוי.

בהצלחה!!!

מוטי