

כוחו של חיישן הכוח!

רלו שוורץ, בית ספר תיכון עירוני ה', חיפה

תקציר: המאמר מתאר שורת ניסויים בעזרת מערכת מולטילוג שלאחרונה נוסף לה חיישן כוח למדידה ישירה של כוח. תודות למערכת זו ניתן לערוך גם ניסויי חקר שלא נתאפשרו קודם לכן. מובאות דוגמאות מפורטות של תנועה מעגלית במישור אופקי ואנכי.

מילות מפתח: מערכת מולטילוג, חיישן כוח, תנועה מעגלית במישור אופקי ואנכי

מבוא

בשנים האחרונות הורגש הצורך להכניס יותר ויותר את טכנולוגיות המחשב לניסויי המעבדה בפיסיקה. הדבר נבע לא רק מההכרח לחדש אלא ובעיקר בגלל מספר יתרונות של הניסוי הממוחשב:

- * ביצוע הניסוי דורש הרבה פחות זמן אם כי לא על חשבון התכנון וההכנה שממשיכים לדרוש טיפול קפדני.
- * הניסוי "זורם" לעיני התלמיד בעזרת חיישנים שונים והגרף המוצג בו-זמנית מספק את סקרנותו ומאפשר לו להחליט כבר בשלב מוקדם אם הניסוי מתרחש בהתאם לציפיות.
- * בתנאים של זמן מוגבל, יכול התלמיד להקדיש את רוב המאמץ לחקר התוצאות ולניתוחן.

המערכת שתופסת כנראה את רוב ההתעניינות של מורי הפיסיקה בארץ היא ה"מולטילוג" או כפי שהוא ידוע גם בשם "DB-Lab".

ה-DB-Lab מצויד במספר חיישנים סטנדרטיים המאפשרים ביצוע דגימות והצגתן בזמן אמת על צג מחשב. בשנים האחרונות התווסף לסל החיישנים, בין היתר, חיישן שחיכינו לו זמן רב, הוא **חיישן הכוח**.

התחלתי להשתמש בחיישן זה במיוחד בשני ניסויים: תנועה של קפיץ עמוס והדגמת התנגשויות, אך נראה לי כי הפוטנציאל הטמון בו הרבה יותר גדול במדידת כוחות במצבים דינמיים וסטאטיים.

כך נולד הרעיון להשתמש בחיישן הכוח "לרענון" הניסוי "הכוח בתנועה המעגלית"¹.

בשורות הבאות אתאר את הניסוי העוסק בתנועה המעגלית כאשר, הודות לחיישן החדש, נוספו גם היבטים על התנועה במישור אנכי, שלא התאפשרו בניסוי הקודם.

(I) תנועה מעגלית במישור אופקי

הציוד הדרוש: לוח מוקצף בעל ממדים $1 \times 60 \times 60$ ס"מ, מערכת ה-DB Lab, חיישן כוח כדור מתכת עם וו בעל מסה 120 – 150 גרם חוט ניילון (דייגים) סרגל 1 מטר,

כן שהוכן במיוחד (יתואר בהמשך).

הרכבת המערכת : בהתאם לתרשים 1 :

הכן שנבחר לניסוי הוא הכן המשמש לניסויים עם גלגל האופניים, הודות לציביותו הטובה.

המערכת $a - a'$ מיועדת להחזקת החיישן במרחק סביר משולחן העבודה כך שלא יפריע לסיבוב חוט המטוטלת.

תפקיד המוט b הוא למנוע תנודות מערכת התמיכה $a - a'$ בכיוון הדגימה. (החיישן עדיין יזוז קצת בכיוון **מאונך** לכיוון הדגימה אך השפעת גורם זה לא מורגשת בתוצאות הסופיות).

אין לתלות את חיישן הכוח על כן מעבדה רגיל: התנודות

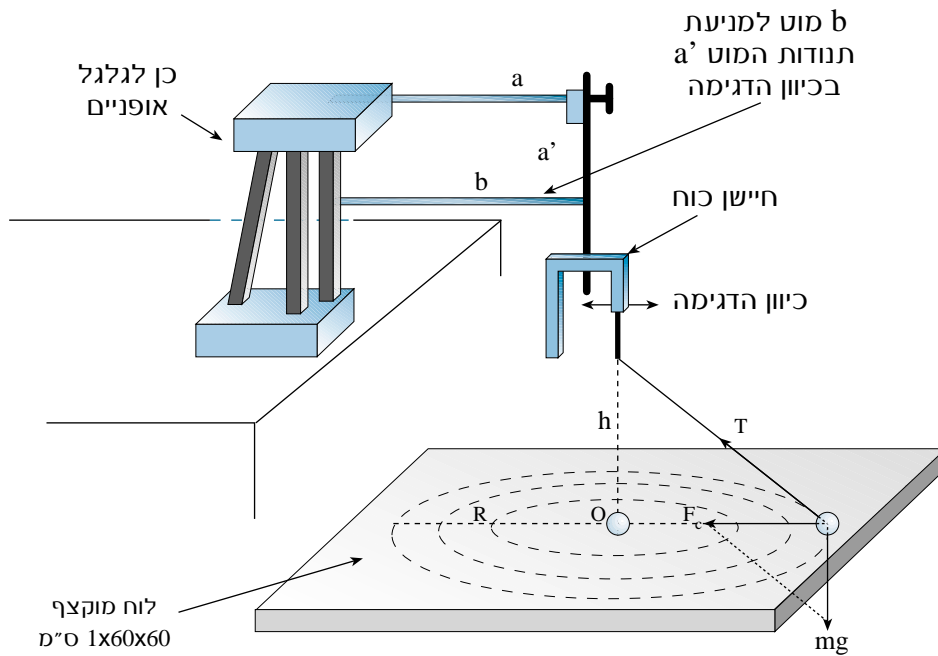
העצמיות של הכן מעוותות לגמרי את מדידות הכוח.

הכנת הלוח המוקצף: על לוח זה יש לסרטט 5 מעגלים משותפי מרכז בעלי רדיוסים: 10, 15, 20, 25 ו-30 ס"מ (ניתן להוסיף מעגל בעל רדיוס 35 ס"מ, אך הדבר תלוי בגודל מקום העבודה).

המשקולת ותלייתה: יש להשתמש במשקולת כדורית בעלת מסה 100 - 150 גרם. מסות קטנות מדי גורמות להופעת כוחות צנטריפטליים קטנים והטעות היחסית במדידתם גדלה.

חוט התלייה יכול להיות חוט תפירה דק וחזק שאינו מתארך בזמן הניסוי או חוט דייגים דק (ליפוף חוט תפירה סביב וו החיישן נוח יותר).

גורמים המשפיעים על הכוח המרכזי בניסוי זה הם כידוע : מסת הגוף, תדירות הסיבוב ורדיוס המעגל.



תרשים 1: המערכת המורכבת לחקר תנועה מעגלית במישור אופקי

מטרת הניסוי הממוחשב

התנועה המעגלית היא היחידה בה לומד התלמיד לחקור תנועה שמסלולה איננו קו ישר. ניסוי בעזרת חיישן הכוח מרחיב את אפשרויות החקר של התנועה ואף קושר אותה ישירות לתופעות וחוקים יסודיים אחרים במכניקה המוכרים לתלמיד, כגון: תנועה הרמונית פשוטה, חוקי שימור התנע והאנרגיה וכו'.

בניסוי המתואר בחלקו השני של המאמר נוספו היבטים הקשורים לתנועה המעגלית **במישור אנכי** שלא ניתן לחקור באופן כמותי ללא חיישן הכוח. בניסויים שיובאו מאמתים התלמידים ישירות את הביטויים הבאים:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{h}{g}} \quad ; \quad \vec{F}_{cp} = m \cdot \omega^2 \vec{r}$$

$$\vec{F}_{cp} = \vec{T} + m\vec{g} \quad \text{או:}$$

ובכך מחזקים את האמון בידע התיאורטי הנרכש.

מהלך הניסוי

חיישן הכוח מכויל כך שהלוחית עם הוו קולטת דגימות רק בכיוון אחד (אומנם בשתי המגמות) אך במצב המתואר **בתרשים 3א**, הדרוש לכיול החיישן, מומלץ להפעיל את החיישן כשהזרוע המחזיקה את הלוחית נמצאת למטה.

אין שום קושי לשנות את המסה והרדיוס, אולם שינוי תדירות הסיבוב של מטוטלת קונית דורש שינוי האורך h של חוט התלייה (תרשים 1).

היות שהלוח המוקצף מונח על הרצפה מומלץ שאורך חוט המטוטלת במצב שיווי משקל יוכל להשתנות בין 50 ס"מ לבין 100 ס"מ; בנוסף, עבור h נבחר יש **לאפשר את קביעות ערכו במעבר מרדיוס אחד לשני**.

את הדרישות הנ"ל ניתן לקיים ב-2 צעדים:

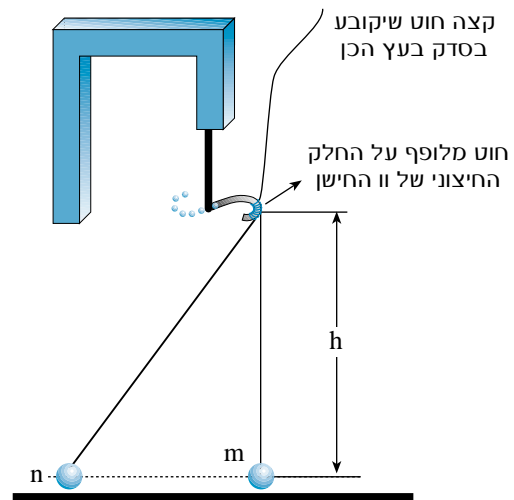
* שינויים גדולים יחסית באורך החוט ניתן להשיג בעזרת אורך מתאים של המוט a' , **שלאורכו**

מזיזים את החיישן יחד עם המטוטלת

כך שהכדור יימצא במרחק של כ-1 ס"מ מעל הלוח.

* כדי לאפשר h קבוע, נוסף מספר ליפופים על וו החיישן באופן שבמעבר מרדיוס אחד לשני נשחרר את החוט **כך שבמצב נטוי (תרשים 1)** אכן יימצא מרכז הכדור במרחק של כ-1 ס"מ מעל הלוח.

תרשים 2 מתאר את הצעדים הנ"ל:



תרשים 2: פרוט מוגדל של חיישן הכח; ליפוף החוט ומצבי הכדור במערכת המתוארת בתרשים 1

הערה:

בתרשים 2 גודל הוו מוגזם כדי לאפשר את "סימון" הליפופים של החוט.

לכן נפעיל את המכשיר כשאין שום עומס על החיישן ונבדוק אם הקו על המסך מתלכד עם ה-"אפס". אם לא, נסובב בעדינות, בעזרת מברג שענים קטן, את הבורג שעל גוף החיישן עליו רשום "zero".... עד לתיקון המצב.

מומלץ לתלות משקולת שמסתה ידועה – 100 גרם למשל – ולהיווכח כי משקלה הנמדד בניוטונים אכן נכון.

איתחול המולטילוג:

קצב הדגימה: 10Hz; מספר נקודות הדגימה: 200 (או 500)

הניסוי עצמו:

1. חקר הקשר $F_{cp} = f(r)$; הגובה h (ולכן גם התדירות f)

והמסה m קבועים.

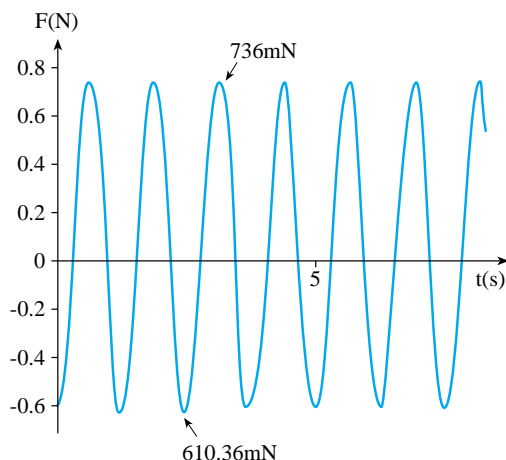
* יש לבצע מרכז של הכדור יחסית ללוח הניסוי, באופן שמרכז הכדור יימצא בגובה של כ-1 ס"מ מעל הלוח.

* קבועים h מסוים ומשחררים חוט מהליפופים שעל הווגבה h מעל הלוח כאשר עוברים ממעגל למעגל (תרשים 2). (למעשה, אין צורך לדייק בגובה זה: מחזור המטוטלת לא יושפע מהשינויים הקטנים האפשריים).

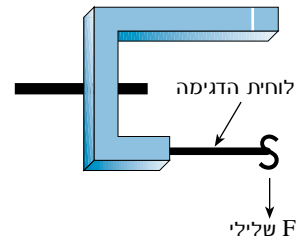
* אוזנים בחוט קרוב לנקודת התלייה ומתחילים לסובבו כך שבמבט מלמעלה מסלולו מתלכד עם המעגל הראשון, ומרפים ממנו.

* לאחר 3-4 סיבובים, הזמן הדרוש לתנועה מסודרת של המטוטלת, מפעילים את המכשיר: התמונה על צג המחשב מגלה סדרה של סינוסואידות (כמעט! למה?) (תרשים 4). נעצור את הדגימה כעבור 10 סינוסואידות בערך.

* נחזור על כל הצעדים הנ"ל עבור כל אחד מהמעגלים, (לא לפני שעשינו "save" לגבי כל אחד). בסוף סדרה זו מקבלים 5 תמונות אותן יש לתרגם לנתונים לבניית הגרף.



תרשים 4: תמונה שנקלטה במחשב בזמן הניסוי בו המשקולת נעה על פני מעגל מסויים



תרשים 3: החיישן במצב הדרוש לכיול



תרשים 3: תצלום חיישן הכוח

בתרשים 1 מותקן חיישן הכוח כך שיתאים לקליטת דגימות של גוף הנע בתנועה מעגלית במישור אופקי. כיוון הדגימה של הלוחית עם 2 המגמות האפשריות מסומן בעזרת חצים.

א. חקר הנוסחה

$$(1) \quad F_{cp} = m\omega^2 r$$

בתנועה מעגלית אופקית:

$$(2) \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}} = \sqrt{\frac{g}{h}}$$

שינוי אחד מן הגורמים בנוסחה יביא לשינוי הכוח המרכזי שיימדד ישירות על ידי חיישן הכוח בהתאם לתרשים 1. איפוס המולטילוג: לפני התחלת הניסוי יש לדאוג לאיפוס ה-DB-Lab: בדרך כלל החיישנים המסופקים יחד עם המכשיר כבר מאופסים בצאתם מפס הייצור.

בניסוי הנוכחי לוחית הדגימה מתעוותת ומודדת פעמיים את הכוח הצנטריפטלי, בהתאם להיטלי מיקומו של הכדור על קוטר המעגל המתלכד עם כיוון הדגימה של הלוחית (תרשים 1).

כיוון שבמחזור אחד החיישן מודד פעמיים את הכוח הצנטריפטלי (הכוח המקסימלי שהוא מודד) ובגלל העובדה כי כיוול המכשיר נעשה כמתואר בתרשים 3, כשהלוחית מתעוותת בכיוון אחד, יש צורך להתחשב בממוצע של ערכי שני הכוחות המרכזיים שאינם שווים ביניהם.

של h (תרשים 1) **בצורה משמעותית**. (יכול להיווצר הרושם כי מספיק להסיט את המטוטלת ממעגל אחד לשני כדי לגרום לשינויים בגובה: הדבר נכון תיאורטית אך אינו מעשי בניסוי כי השינויים המתקבלים יהיו קטנים מדי).

אם כן:

* הסדרה של 5 המעגלים שקיבלנו ב-1א היא גם ההתחלה בחקר זה: היא התקבלה עבור גובה מסוים h (נסמנו עכשיו ב- h_1).

* נזיז את החיישן לאורך המוט a' (תרשים 1) כך שנקבע גובה אחר h_2 – למשל 75 ס"מ, ונחזור על כל הצעדים המתוארים ב-1א.

* נחזור פעם נוספת (או אולי יותר אם הזמן מאפשר) ונקבע גובה h_3 .

א3: חקר הקשר $F_{cp} = f(m)$; הגובה h ו-1 הרדיוס r קבועים; השפעת המסה על הכוח בתנועה זו מובנת מייד לתלמידים כי הביטוי הבסיסי הנ"ל הוא למעשה החוק השני של ניוטון והוא מהווה נושא בפני עצמו בעבודה במעבדה. נראה לי כי אין הכרח לבצע גם את הבדיקה הזאת. התוצאות של סדרת הניסויים - 1א ו-2א נתונות **בטבלה 1**.

אפשר לראות בקלות כי למרות הדמיון הרב, העקומה איננה בדיוק סינוסואידה והסיבה היא כי בזמן סיבוב המשקולת, לוחית הדגימה זזה יחד איתה.

יש לציין עוד כי בתנאי הניסוי, עבור חוט ארוך ומספר קטן של סיבובים, גורם הריסון כמעט אינו מורגש כפי שאפשר לראות מן התרשים.

העקומות המתקבלות – סדרה של 5 (כמספר המעגלים) - מאפשרות למדוד ישירות את **הכוח הצנטריפטלי ומחזור (או תדירות) התנועה**.

ערך הכוחות הצנטריפטליים נתון על ידי הערך המוחלט של שיאי העקומה, שניים בכל מחזור. ניתן לראות כי בדגימות הנ"ל קיימים הבדלים בין שני השיאים, דבר שמחייב אותנו להתחשב בערך הממוצע שלהם.

בכל מקרה יש לחתור לעקומה בה השיאים שווים ככל האפשר, אם כי אפשר להסתפק ב-3-4 שיאים כדי להצביע על אמינות המדידה.

א2: חקר הקשר $F_{cp} = f(f)$; המסה m והרדיוס r קבועים מהלך זה יבוצע שוב כשנגרום לסיבוב הכדור מעל כל מעגל. כדי לשנות את תדירות הסיבוב f יש צורך לשנות את ערכו

$h_1(m)$	$h_2(m)$	$h_3(m)$	$F_{c_1}(N)$	$F_{c_2}(N)$	$F_{c_3}(N)$	$T_1(s)$	$T_2(s)$	$T_3(s)$	$r(m)$
			0	0	0				0
1.1	0.773	0.6	0.145	0.169	0.218	2.06	1.75	1.55	0.10
1.1	0.773	0.6	0.194	0.219	0.316	2.06	1.75	1.53	0.15
1.1	0.773	0.6	0.242	0.340	0.437	2.06	1.73	1.55	0.20
1.1	0.773	0.6	0.315	0.412	0.558	2.06	1.75	1.55	0.25
1.1	0.773	0.6	0.372	0.509	0.679	2.10	1.75	1.53	0.30

טבלה 1

$$\frac{F_{c_1}}{F_{c_2}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \quad \frac{F_{c_2}}{F_{c_3}} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^2 \quad \frac{F_{c_3}}{F_{c_1}} = \left(\frac{T_1}{T_3}\right)^2$$

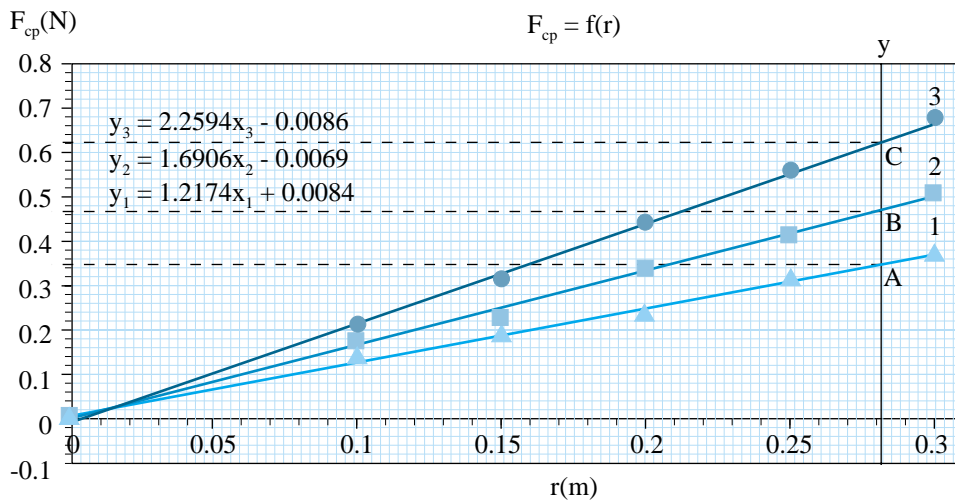
העברת הישר y שבגרף (בחירה מטעמי נוחיות אך לא רלוונטית לגבי המסקנות) מובילה לתוצאות בדיוק של 6%-4% והדבר תלוי בקריאת ערכי הכוח הצנטריפטלי שצריכה להיעשות בדיוק של לפחות 0.02 ניוטון. (excel מאפשר קביעת סקלה מתאימה).

ניתוח התוצאות

(1) סרטוט הגרף $F_{cp} = f(r)$

התלות הקווית בין F_{cp} ל- r ברורה מן הגרף. כדי להבטיח שניתוח התוצאות נעשה עבור **רדיוס קבוע**, נעביר בגרף קו אנכי - y כך שיחתוך את שלושת הישרים בנקודות B, A ו-C (תרשים 5).

כל נקודה על הקו y מאופיינת על-ידי m ו- r **קבועים**. עבור כל 2 נקודות מתוך השלוש צריך להתקיים:



תרשים 5: הגרף של $F_{cp} = f(r)$ כאשר m עבור כל ישר קבועים

שיפוע גרף זה מייצג את ערכה של מסת הכדור שלא השתנתה במשך הניסוי כולו.
לפי השיפוע: $m = 0.1309 \text{ kg}$; המסה הנשקלת: $m_0 = 0.1293 \text{ kg}$;
הטעות היחסית נתונה על ידי:

$$\frac{\Delta m}{m_0} = \frac{m - m_0}{m_0} = \frac{0.1309 - 0.1293}{0.1293} = 1.23\%$$

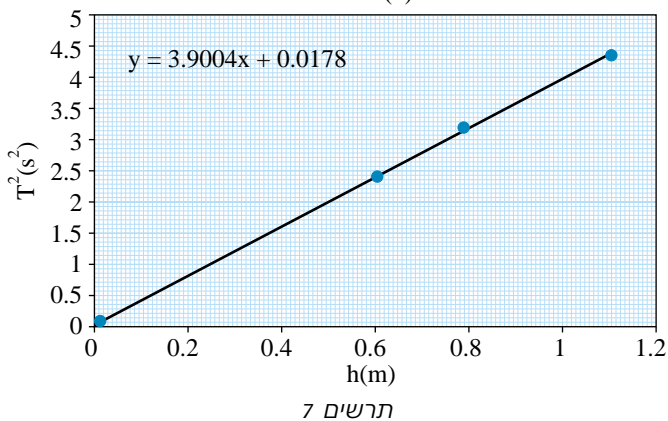
(3) מציאת תאוצת הכובד - g

בניסוי זה שינינו את אורך חוט המטוטלת במצב שיווי משקל שלוש פעמים וקיבלנו עבור הגובה את שלושת הערכים: h_1, h_2, h_3 .

בעזרת התוצאות עבור T ו- h מטבלה 1 והנוסחה $\omega = \sqrt{\frac{lg}{h}}$

נסרטט את הגרף $T^2 = f(h)$:

$$T^2 = f(h)$$



תרשים 7

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{g}\right) \cdot h = 3.9004 \cdot h \longrightarrow g = 10.11 \text{ m/s}^2$$

והטעות היחסית: $\frac{\Delta g}{g} = 3\%$

(2) אימות החוק השני של ניוטון

התוצאות שהופקו מן הניסוי מאפשרות אימות מהיר ופשוט של חוק התנועה: נרכיב טבלה נוספת (טבלה 2) הנגזרת מן הטבלה 1:

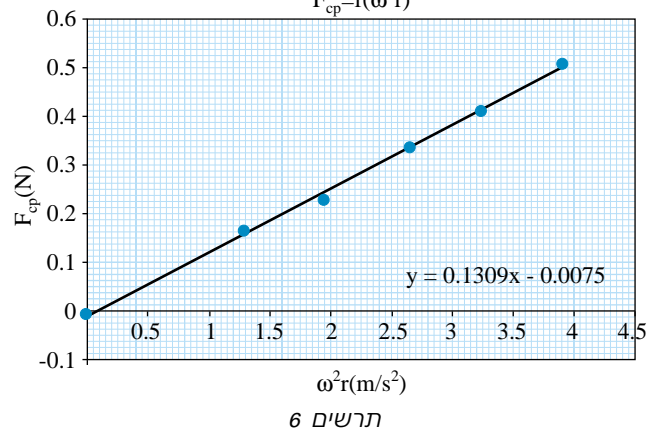
F_{c1}	F_{c2}	F_{c3}	$\omega_1^2 r$	$\omega_2^2 r$	$\omega_3^2 r$
0	0	0	0	0	0
0.145	0.169	0.218	0.92846	1.28778	1.64156
0.194	0.219	0.316	1.39404	1.93168	2.52713
0.242	0.340	0.437	1.85872	2.63546	3.28311
0.315	0.412	0.558	2.32340	3.21946	4.10389
0.372	0.509	0.679	2.68288	3.86335	5.05426

טבלה 2

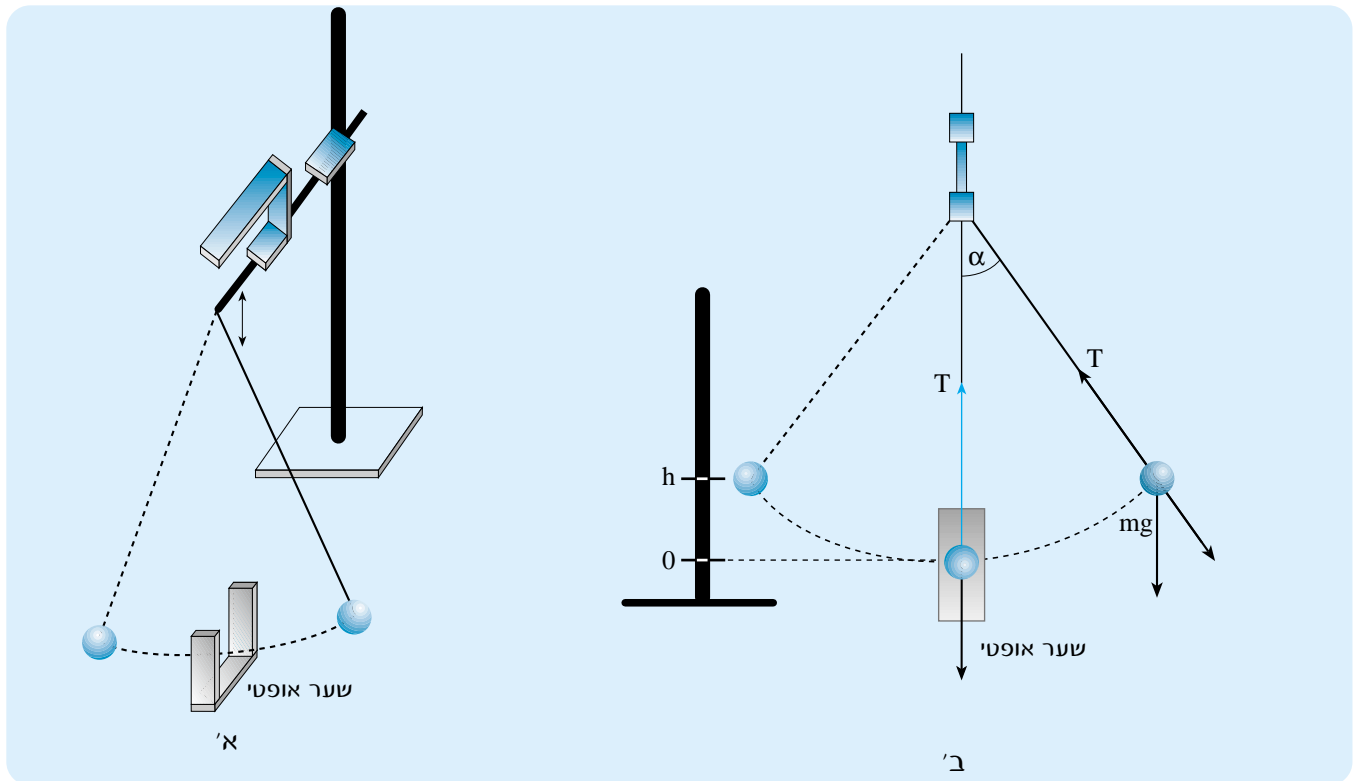
ניתן, כמובן, להוסיף עמודות מתאימות לטבלה 1 ולוותר על טבלה 2. כל גרף $F_{cp} = f(\omega^2 r)$ ייתן את הקשר הנדרש.

למשל, עבור $F_{cp2} = f(\omega_2^2 r)$ נקבל:

$$F_{cp} = f(\omega^2 r)$$



תרשים 6



תרשים 8: מערך הניסוי

עם משקלו (שקילה מוקדמת של הכדור) נותן את ערכו של הכוח הצנטריפטלי.

תאורטית, יכולה התנועה להתבצע בחצי מעגל אנכי אך בגלל מגבלות טכניות לא כדאי לעבור זוויות של $75^\circ - 80^\circ$. רעיון הניסוי נובע ישירות מרב-תכליתיותו של חיישן הכוח בכל הקשור במדידת כוחות במצב דינמי.

ביצוע הניסוי מובן מתרשים 8 ב':

- * בעזרת כן מעבדה נוסף עליו השחלנו 2 גומיות לסימון גבהים, מסמנים את נקודת "האפס" של כדור המטוטלת (מצב שיווי המשקל בתוך השער האופטי) ואת הגבהים השונים אליהם מסיטים את המטוטלת.
- * משחררים את המטוטלת כשכיוון החוט עובר דרך מרכז המסה של הכדור, דבר שימנע תנועה לא מסודרת שלו.
- * עוצרים את הכדור מיידי ברגע צאתו מהשער.
- * רושמים את זוג הערכים - המתיחות המקסימלית T ופרק הזמן Δt של מעבר קוטר הכדור דרך השער.
- * חוזרים על מהלך זה כ-6 פעמים; אין להסיט את המטוטלת לגובה גדול מדי - בוודאי לא לזווית של 90° בגלל הזעזועים במערכת הניסוי המשבשים את התוצאות.

(II) תנועה מעגלית אנכית - חקר היבטים אחדים

הציוד הדרוש:

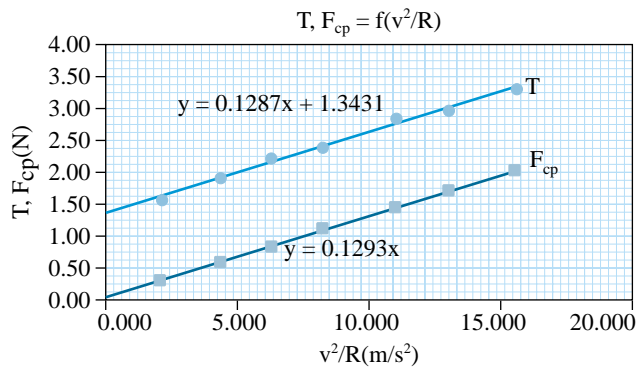
כמו בחלק (I) ובנוסף, מערכת מדידת זמן של Pasco: שער אלקטרוני + timer דיגיטאלי וכן מעבדה רגיל בגובה של כ- 50 ס"מ: על מוט הכן הושחלו 2 טבעות גומי (ראה תרשים 8).

מערך הניסוי (תרשים 8)

- * חיישן הכוח יורכב כך שיוכל למדוד לאורך הציר האנכי (תרשים 8א').
- * במבט מלפנים (תרשים 8ב') ניתן לראות את החיישן ואת השער האופטי ניצבים לאורך האנך. בעזרת הכן עם הגומיות ניתן למדוד בקלות שינויים בגובה הכדור.

מהלך הניסוי:

מערכת הניסוי (תרשים 8) מאפשרת חקר היבטים מסוימים של התנועה במעגל אנכי, כאשר השימוש בחיישן הכוח מאפשר מדידה ישירה של המתיחות T. צירוף המערכת הדיגיטאלית למדידת הזמן מאפשר מדידה מדויקת של מהירות הכדור בעוברו דרך השער האופטי, ויחד



תרשים 9

$$mg = 1.3431 \text{ N} \rightarrow g = mg/m_{(דמדמ)} = 1.3431/0.1293 = 10.4 \text{ m/s}^2$$

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{10.4 - 9.81}{9.81} = 5.9\% \quad \text{הסטייה היחסית}$$

ב. הקשר בין F_{cp} לבין התאוצה v^2/R הוא אימות החוק השני.

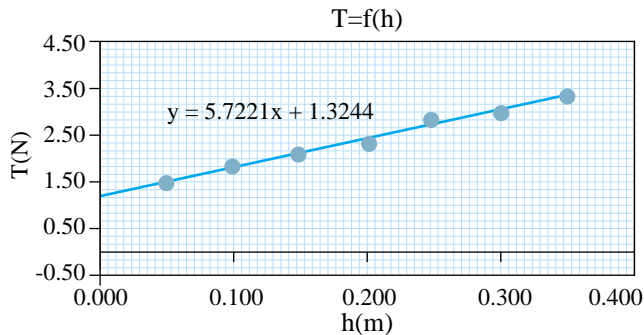
הגרף סורטט כדי לאמת גם בניסוי זה את חוק התנועה של ניוטון.

ג. הקשר בין T ו-h

$$T = mg + \frac{m \cdot v^2}{R} \quad \text{מנוסחה (3) מתקבל:}$$

$$(4) \quad T = mg + \frac{2mg}{R} \cdot h = mg(1 + \frac{2h}{R})$$

הגרף המתואר על-ידי (4) נתון בתרשים 10:



תרשים 10

עבור $h = 0$, $T = mg = 1.324 \text{ N}$, מסת הכדור הנשקל היא

$$m = 0.1293 \text{ kg}$$

$$g = 1.3244/0.1293 = 10.24 \text{ m/s}^2 \quad ; \quad \Delta g/g = 4.4\%$$

ריכוז התוצאות בטבלה 3:

לפני התחלת הניסוי מודדים את אורך המטוטלת $R = 0.46 \text{ m}$,

מסת הכדור $m = 0.1293 \text{ kg}$ ($mg = 1.27 \text{ N}$) וקוטר הכדור

$$\Delta x = 0.03 \text{ m}$$

בזמן הניסוי מודדים את Δt , זמן מעבר הכדור דרך השער,

הגובה h והמתיחות T .

$F_e = \frac{mv^2}{R}$	T(N)	v^2/R	v^2	v(m/s)	h(m)	Δt (s)
0.28	1.58	2.188	1.007	1.0033	0.050	0.030
0.58	1.92	4.479	2.060	1.4354	0.100	0.021
0.83	2.21	6.389	2.939	1.7143	0.150	0.018
1.08	2.41	8.358	3.845	1.9608	0.200	0.015
1.43	2.84	11.061	5.088	2.2556	0.250	0.013
1.70	2.99	13.145	6.047	2.4590	0.300	0.012
2.02	3.33	15.597	7.175	2.6786	0.350	0.011

טבלה 3

ניתוח התוצאות

לפי תרשים 8 ניתן לראות כי המישור האנכי שעובר דרך החיישן וחוט המטוטלת במצב של שיווי משקל, כולל גם את השער האופטי.

כאשר מסיטים את הכדור לגובה h ממצב הייחוס – תרשים 8 ב' – ומרפים ממנו, בעוברו שוב דרך השער האופטי, נמדדים בבת אחת שני הגדלים העיקריים של הניסוי:

* המתיחות T בחוט עבור זווית $\alpha = 0^\circ$ ופרק הזמן Δt בו הכדור בעל הקוטר Δx עובר דרך השער האופטי.

מתרשים 8 ב' מקבלים, עבור זווית $\alpha = 0^\circ$, את הביטוי המוכר:

$$(3) \quad T - mg = \frac{m \cdot v^2}{R} = F_{cp}$$

את הכוח הצנטריפטלי ניתן למצוא, אם כן, בשתי דרכים:

1. מתוך מדידת המתיחות המקסימלית עבור $\alpha = 0^\circ$ ושקילת הכדור.

2. מתוך מדידת המהירות המרבית של הכדור וידיעת המסה m ואורך החוט R .

א. הקשר בין המתיחות T והכוח הצנטריפטלי F_{cp} לבין התאוצה הצנטריפטלית v^2/R

הקו התחתון בתרשים 9 מתאר את F_{cp} לעומת v^2/R ; הקו העליון מתאר את T לעומת v^2/R . לפי נוסחה (3) המייצגת את הגרף של T , המקדם 0.1287 הוא מסת הכדור והוא מתאים בדיוק רב לערך הנמדד לפני הניסוי.

האיבר החופשי הוא mg ממנו ניתן למצוא את תאוצת הכובד g :

נעשה אקסטרפולציה של הקו ונראה כי:
ניתן לראות כי עבור $h = 0.46\text{m}$ (אורך החוט שהוא הרדיוס)
מקבלים: $T \sim 4\text{N}$ השווה בקירוב ל- $3mg$:
 $T = 3mg = 3 \cdot 0.1293 \cdot 10.24 = 3.97\text{ N}$

סיכום

צירוף חיישן הכוח ל- Data Logger הרחיב באופן משמעותי את אפשרויות המדידה של המערכת.

ניסויים רבים בדינמיקה שנעשו בעבר במאמץ לא קטן מוצאים היום פתרון מהיר ויפה בעזרת חיישן זה. מדידה ישירה של הכוח הצנטריפטלי והמתוחות כמו בניסוי תנועה מעגלית שתואר כאן, פותחת מגוון רחב של אפשרויות חקר. מלבד היכולות שהובלטו במאמר זה ניתן להוסיף, באותו נושא, היבטים הקשורים במתקף ותנע, שימור אנרגיה, תנודה הרמונית ועוד ועוד.

החומר שהוצג כאן מתאים לשתי עבודות מעבדה לפחות באחד מהנושאים "הכבדים" של בחינת הבגרות וכמובן הוא פתוח ליוזמה הפרטית של מורי הפיסיקה לחקר היבטים נוספים.

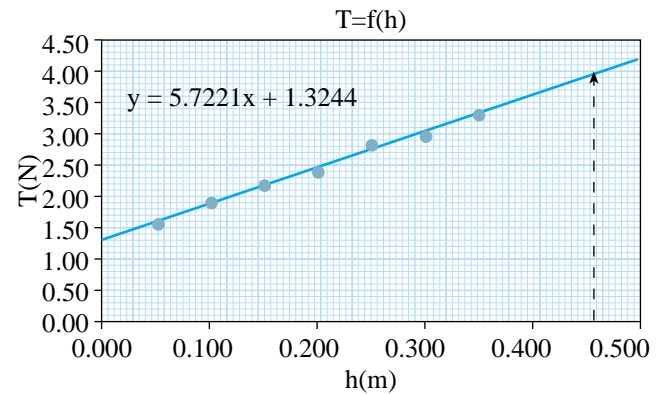
מראה מקום:

1. שוורץ, ר., הכוח בתנועה המעגלית, תהודה, (2) 12, 1987.

תהודה

הערך של g מדויק יותר וזאת מכיוון שהפעם לא השתמשנו בגורם v^2/R המוסיף אי ודאות לתוצאה.

- מעניין גם המקרה $h=R$, כלומר המקרה בו הכדור היה משתחרר מגובה הרדיוס – כלומר זווית של 90° :
הביטוי האחרון נותן במקרה זה $T=3mg$.
היות שאין אפשרות למדוד את המתוחות במצב קיצוני זה-הסיבות הוזכרו לעיל, בודקים את הגרף שבתרשים 11.



תרשים 11

אל מגישי/מגישות מאמרים לפרסום ב"תהודה"

על מנת להקל על המערכת ולרזז את קצב הדפסת מאמר המוצע לפרסום ב"תהודה" נא למלא אחר ההנחיות הבאות:

1. לשלוח את המאמר כשהוא מודפס על מחשב PC כקבץ WORD בפורמט DOC. עדיף לשלוח את המאמר בדאר האלקטרוני attachment- לפי הכתובת: hanna.goldring@weizmann.ac.il, בצרוף עתק מודפס של המאמר. אם הדבר אינו אפשרי, יכולים לשלוח דיסקט + עתק מודפס לפי הכתובת: חנה גולדרינג ורחל ברדה, מערכת "תהודה", המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות 76100.

2. סרטטים ותצלומים המצורפים למאמרים.

א. סרטטים

רצוי שהסרטטים יהיו "שתולים" כתמונות בטקסט המאמר. אם אפשר כדאי להכין את הסרטטים ב-paintshop pro בפורמט tif ולשלוח אותם על דיסקט נפרד. אם הדבר אינו באפשרותכם, אנו שלחו לנו סרטוט ברור ונקי.

ב. תצלומים

רצוי לשלוח תשליל (נגטיב) של התצלום. רצוי ל"שתול" גם את התצלומים בטקסט המאמר. אם אין בידכם תשליל, אנא שלחו תצלום באיכות טובה. כל סרטוט וכל תצלום יש למספר לפי הופעתו במאמר (תרשים 1, תרשים 2 וכו').

כל מאמר שישלח אלינו לפרסום, יוגש לבדיקה למורי פיזיקה ו/או מדענים מומחים בתחום בו עוסק המאמר. המערכת שומרת לעצמה את הזכות לבקש מהכותב שינויים ו/או הבהרות במאמר בהתאם להמלצות הבודקים. מאמרים שלא יתקבלו לפרסום, יוחזרו לכותבים.

בשאלות ובירורים נא לפנות לחנה או לרחל, בטלפון 08-9342981, או בפקס: 08-9344174.

בכל דבר דואר שישלח בפקס נא להוסיף עבור "מערכת תהודה".