

מדידת תאוצת הנפילה החופשית

א. מטרת הניסוי

מדידת תאוצת הנפילה החופשית

ב. מבוא תיאורטי

גופים המשוחררים ממנוחה בקרבת כוכב לכת או ירח של כוכב לכת, ובהזנחת כוח החיכוך עם האוויר במקרים בהם יש לכוכב הלכת אטמוספירה, נעים בתאוצה שגודלה קבוע וכיוונה בכיוון מרכז כוכב הלכת או הירח. גודלה של תאוצה זו שונה מכוכב לכת אחד לאחר (או מירח לירח), אבל הוא נחשב בקירוב טוב כקבוע בקרבת פני אותו כוכב לכת או ירח. בקרבת פני כדור הארץ, גודלה של תאוצה זו הוא 9.8m/s^2 , בקרבת פני הירח גודלה של תאוצה זו הוא 1.67m/s^2 , על פני מאדים תאוצה זו שווה ל- 3.71m/s^2 ועל פני השמש כ- 275m/s^2 .

מכיוון שתאוצה זו נובעת מכוח הכובד הפועל על הגוף הנופל, היא נקראת **תאוצת הכובד**, ומסומנת באות g (מהמונח הלועזי gravity acceleration). לכן ניתן להגדיר:

תאוצת הכובד היא תאוצת הגופים הנופלים על פני כוכב הלכת בהשפעת כוח הכובד.

כאמור, גודלה של תאוצת הכובד בקרבת פני כדור הארץ הוא 9.8m/s^2 , בערך.

הגדרה: נפילה חופשית היא תנועת גוף בהשפעת כוח הכובד בלבד.

הגופים הנופלים חופשית על פני כוכב לכת (כלומר הנעים בהשפעת כוח הכובד של כוכב הלכת, בלבד), נעים בתאוצה שהיא תאוצת הכובד, ומכיוון שתנועת גופים אלה נקראת נפילה חופשית, תאוצתם נקראת גם תאוצת **הנפילה החופשית**. ברור שתאוצת הנפילה החופשית שווה בגודלה ובכיוונה לתאוצת הכובד.

תכונות תאוצת הכובד בסביבת כדור הארץ

1. כיוון תאוצת הכובד הוא כלפי מרכז כדור הארץ.
 2. תאוצת הכובד אינה תלויה במסת הגוף הנופל. תאוצה זו תלויה רק במסת כדור הארץ, ובמרחק ממרכז כדור הארץ. בקרבת פני כדור הארץ, המרחק ממרכז כדור הארץ נחשב לקבוע, לכן בקרבת פני כדור הארץ גודלה של תאוצת הכובד נחשב לקבוע.
 3. ככל שמתרחקים מפני הקרקע תאוצת הכובד תקטן בהדרגה, ובמרחקים גדולים מאוד (אינסופיים), תאוצת הכובד מתאפסת.
 4. על פני כדור הארץ תאוצת הכובד משתנה ממקום למקום במידה קטנה מאוד. תאוצת הכובד בקו המשווה שווה ל- 9.76m/s^2 , ואילו בקטבים היא שווה ל- 9.83m/s^2 . הבדלים אלה נובעים משתי סיבות בעיקר. הסיבה הראשונה היא שכדור הארץ אינו כדורי במדויק. הוא פחוס מהקטבים. מרחק הקטבים ממרכז כדור הארץ קטן ממרחק נקודה כלשהי על קו המשווה ממרכז כדור הארץ. כתוצאה מכך תאוצת הכובד בקטבים גדולה יותר מאשר בקו המשווה. מרחק הקטבים ממרכז כדור הארץ הוא $6,357\text{km}$, ומרחק הנקודות על קו המשווה ממרכז כדור הארץ הוא $6,378\text{km}$.
- הסיבה השנייה היא סיבוב כדור הארץ סביב צירו (ציר שעובר דרך הקטבים). סיבוב זה מקטין אף הוא את תאוצת הכובד בקו המשווה לעומת תאוצת הכובד בקטבים.

ג. מכשור וציוד

- 1) ספק מתח חילופין.
- 2) חוטי חשמל.

(3) סרט נייר באורך כ-80 ס"מ, ונייר דבק.

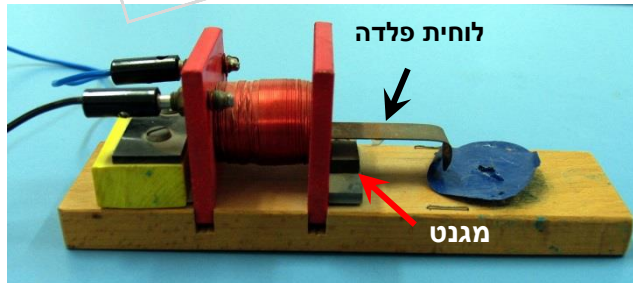
(4) משקולת.

(5) קליבה.

(6) סרגל ארוך (עדיף באורך מטר).

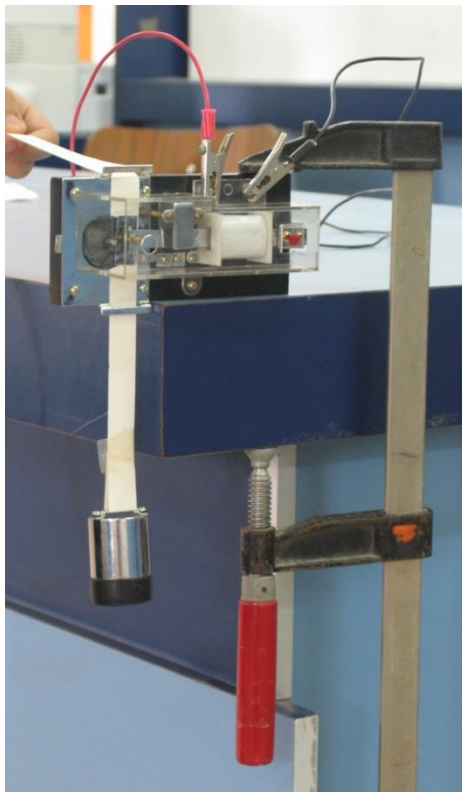
(7) רשם זמן; רשם זמן, המתואר באיור

1, הוא מכשיר המורכב מסליל המוצב על בסיס. דרך מרכז הסליל עוברת לוחית פלדה, הבולטת החוצה מהסליל. צד אחד של לוחית זו מהודק במשטח מוגבה, כך שהלוחית עוברת דרך הסליל ויש לה חופש להתנדנד. צדה האחר של הלוחות, שמסתיים בראש חד, חופשי להתנדנד ונמצא מעל מגנט



איור 1: רשם זמן

המודבק על בסיסו של רשם הזמן (ראה איור 1). כאשר מחברים את הסליל אל מקור מתח חילופין, נוצר בתוך הסליל שדה מגנטי שהופך את הכיוון שלו באותו תדר כמו זרם החילופין שעובר דרכו. כתוצאה מכך, לוחית הפלדה הופכת למגנט, אבל עם קטבים מגנטיים אשר מתחלפים ביניהם בתדר של הזרם. לכן קצה הלוחית שנמצא מעל המגנט משתנה מדרומי לצפוני באופן רציף דבר שגורם לכך שהכוח המגנטי המופעל בין הקצה החופשי של הלוחית ובין המגנט שנמצא מתחתיו משתנה ממשיכה לדחיה באופן רציף, באותו תדר כמו הזרם. כתוצאה מכך, קצה הלוחית מתנדנד למעלה ולמטה ונוקש על הבסיס בתדר הזרם החילופין. אם מחברים את רשם הזמן לרשת החשמל הארצית, כלומר לזרם חילופין שמשנה את הכיוון שלו בתדירות של כ-50 Hz, נקבל שרשם הזמן מבצע במקרה זה 50 נקישות בשנייה. לכן, הזמן בין כל שתי נקישות עוקבות הוא $1/50$ מהשנייה כלומר 0.02s.



איור 2

ד. מהלך הניסוי (הרכבת המערכת, וביצוע הניסוי)

(1) הדק את רשם הזמן בקצה השולחן באמצעות הקליבה,

במצב שבו רשם הזמן ניצב לפני השולחן כפי שרואים באיור 2, וזאת על מנת להפחית את החיכוך בין סרט הנייר לרשם זמן במהלך נפילת המשקולת. בנוסף, יש לדאוג לכך שקצה רשם הזמן יבלוט החוצה ביחס לקצה השולחן, אחרת לא ניתן לבציע את הניסוי.

(2) חבר את רשם הזמן לספק המתח (לא להפעיל אותו בשלב זה).

(3) חבר סרט הנייר למשקולת, והעביר את הסרט ברשם הזמן. החזיק את סרט הנייר כך שהמשקולת נמצאת במנוחה בגובה מסוים מעל לרצפת החדר (ראה איור 2).

(4) הפעל את רשם הזמן (את ספק המתח), ולאחר מכן שחרר את המשקולת. המשקולת נופלת וסרט הנייר נע איתה, ותוך כדי כך רשם הזמן מסמן נקודות על הסרט. כאמור הזמן בין כל שתי נקודות עוקבות הוא 0.02s.

התוצאות בניסוי זה מתקבלות כנקודות (סימנים) על סרט הנייר כפי שמתואר באיור 3. נקודות אלה נוצרות

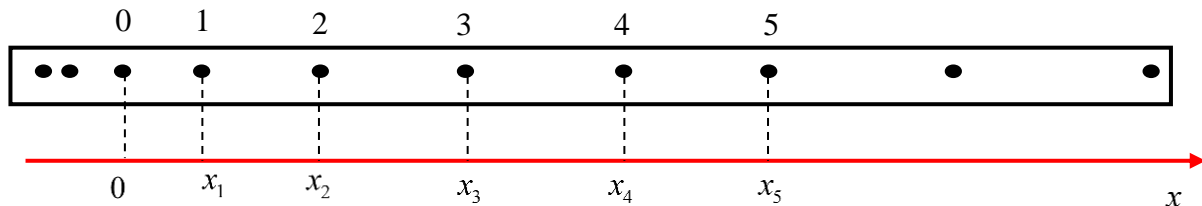
מהפגיעות של הראש החד ברשם זמן המתנדנד בתדירות 50Hz, זאת במהלך תנועת סרט הנייר בתאוצה השווה לתאוצת המערכת (תאוצת הכובד). מכיוון שהמשקולת נעה בתאוצה, המרחק בין הנקודות על סרט הנייר הולך וגדל עם התקדמות הזמן (ראה איור 3).



איור 3

ה. עיבוד וניתוח התוצאות

(1) בחר נקודה על הסרט הקרובה לקצה הסרט בתחילת התנועה, וסמן אותה ב-0. את שאר הנקודות שבאות אחריה מספר ב-1, 2, 3, ... כפי שמתואר באיור 4.



איור 4

(2) קבע $x=0$ בנקודה המסומנת ב-0, ומדוד, באמצעות סרגל, את שיעורי שאר הנקודות ביחס לנקודה $x=0$ (ראה איור 4).

(3) בחר $t=0$ בנקודה 0. וערוך טבלה הכוללת שלוש עמודות: בעמודה הראשונה רשום את המספר הסדורי של הנקודה, בשנייה את הזמן עד לנקודה זו ביחס ל- $t=0$ ובשלישית את המיקום של נקודה זו ביחס ל- $x=0$, כפי שמתואר בטבלה הבאה. שים לב שפרק הזמן בין כל שתי נקודות עוקבות הוא 0.02s.

n	$t(s)$	x_n
0	0	0
1	0.02	x_1
2	0.04	x_2
3	0.06	x_3
4	0.08	x_4
\vdots	\vdots	\vdots

(4) הסתמך על הטבלה הקודמת, והכן טבלה חדשה המתארת את מהירות המערכת בכל אחד מהזמנים שבטבלה הקודמת (המהירות הרגעית). על מנת להסביר כיצד עושים זאת, נניח שרוצים לחשב את המהירות הרגעית בנקודה n (בזמן t_n). נבחר שני זמנים הקרובים ביותר לזמן t_n , אחד לפני ואחד אחרי, כלומר הזמנים t_{n-1} ו- t_{n+1} , ומחשבים את הגודל:

$$(1) \quad v_n = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{t_{n+1} - t_{n-1}} = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{0.04s}$$

הגודל $\Delta x = x_{n+1} - x_{n-1}$ מחולק בגודל $\Delta t = t_{n+1} - t_{n-1}$ מבטא את המהירות הממוצעת בפרק הזמן $\Delta t = t_{n+1} - t_{n-1}$. אבל, מכיוון שפרק זמן זה קטן מאוד (0.04s), גודל מהירות זו קרוב מאוד למהירות הרגעית בזמן t_n כפי שהסברנו ברקע התיאורטי בניסוי זה.

בנוסף, ניתן להוכיח (ראה שאלת הכנה מס' 3) שהמהירות הממוצעת בפרק זמן Δt , עבור גוף הנע בתאוצה קבועה, שווה למהירות הרגעית במחצית פרק זמן זה. לכן הגודל:

$$(2) \quad \bar{v}(t_{n+1} \rightarrow t_{n-1}) = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{t_{n+1} - t_{n-1}} = v(t_n)$$

- הערה: שים לב לכך שלא ניתן לחשב את המהירות הרגעית בנקודה הראשונה בטבלה הנ"ל כי אין נקודה לפניה, וגם לא את המהירות הרגעית בנקודה האחרונה בטבלה כי אין נקודה אחריה. (5) שרטט, באמצעות הטבלה שהכנת בסעיף הקודם, גרף המתאר את מהירות המשקולת במהלך נפילתה כפונקציה של הזמן.
- (6) הסתמך על הגרף וחשב את תאוצת המשקולת שהיא תאוצת הנפילה החופשית.
- (7) השווה את התאוצה המתקבלת מהניסוי לערך הידוע עבור תאוצת הנפילה החופשית וחשב את אחוז השגיאה.



ו. שאלות הכנה

- (1) הגדר את התאוצה וקבע מהי היחידה של גודל זה במערכת היחידות SI.
- (2) הגדר נפילה חופשית וקבע את גודלה של תאוצת הנפילה החופשית על פני כדור הארץ.
- (3) הסבר מדוע גודל תאוצת הנפילה החופשית על פני כדור הארץ בקו המשווה קטן יותר מגודל תאוצת הנפילה החופשית בקטבים.
- (4) הוכח שבתנועה בתאוצה קבועה, המהירות הממוצעת של הגוף בפרק זמן מסויים, שווה למהירות הרגעית שלו באמצע פרק זמן זה.
- (5) הגרף המתקבל בניסוי זה והמתאר את מהירות הגוף כפונקציה של הזמן, הוא גרף לינארי. קבע מה מייצג שיפוע גרף זה ומה מייצגת נקודת חיתוך הגרף עם הציר האנכי.
- (6) הסבר מדוע הגרף המתקבל בניסוי זה אינו עובר בראשית מערכת הצירים למרות שהמשקולת התחילה את תנועתה ממנוחה.