

דו"ח ניסוי 1 – שימור אנרגיה

נ"ר גבריאלוב 316081686

הדר שרביט 208287599

מעבדה חלקית בפיסיקה - שנה א

תקציר הניסוי:

ניסוי זה נערך בשני שלבים אשר מטרתם לחקור שימור אנרגיה ותנועה בליסטית. במהלך הניסוי מדדנו את תנועתם של כדורים במורד מסילה ואת המרחק אליהם הגיעו, במטרה למדוד את האנרגיה במערכת ולהסיק מסקנות בנוגע לחוקי שימור אנרגיה וצורת איבוד אנרגיה קינטית במערכת לא אידיאלית.

תוצאות החלק הראשון הצביעו על כך שכדור הנופל במורד מסילה מגיע למרחק קצר יותר מצפי התיאוריה למערכת בה נשמרת האנרגיה לחלוטין. בנוסף לכך, הגולות ששוחררו מגובה H כלשהו מעל משטח במהירות אופקית אכן נעו בתנועה בליסטית.

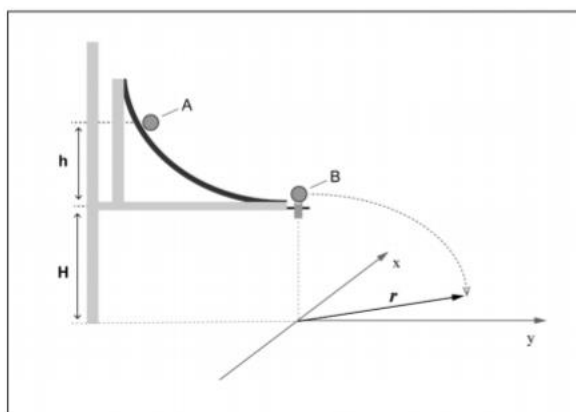
תוצאות החלק השני הצביעו על כך שהאנרגיה הקינטית של כדור ברגע עזיבת המסילה היא נמוכה יותר מהאנרגיה הפוטנציאלית ההתחלתית, כלומר במהלך התנועה במסילה "נאבדה" חלק מהאנרגיה, רובה בשל עבודת כוחות החיכוך השונים (אוויר, מסילה) על הכדור.

1. תיאור הניסוי

1.1. ציוד ופרטי המערכת:

1. כדור זכוכית וכדור מתכת (A)
2. מגלשה לכדורים (כמתואר בתרשים)
3. גיליונות נייר ונייר העתקה המאפשרים סימון של נקודות נפילת הכדורים מהמגלשה
4. משקל למדידת מסת הכדורים
5. סרגל למדידת מרחק

תרשים 1: תיאור המערכת



1.2. שיטות המדידה:

את מרחק הכדור A מהקרקע (H+h) ואת המרחק אליו מגיע כדור A מרגע ההינתקות מהמסילה ועד הפגיעה בקרקע (r) נמדוד באמצעות סרגל

את משקל הכדורים נמדוד באמצעות מד המשקל

1.3. מהלך הניסוי:

1.3.2. ייצוב המערכת: לפני כל מדידה וידאנו שכל המשתנים שעלולים להשפיע על תוצאות המדידה יישארו קבועים עד כמה שניתן: קיבענו את המסילה לגובה הרצוי על ידי הברגה, וידאנו שהפלט המוצב על המסילה מיושר, וידאנו שהמשקולות הקשורות מתחת לנקודה B מיושרות ביחס לנקודה שקבענו מראש והשתדלנו לשחרר את הכדור מהגובה הנדרש לכל מדידה עד כמה שניתן.

1.3.2. חלק ראשון – מטרת החלק ראשון היא לבדוק את המרחק r אליו הגיע כדור A, הנע בנפילה חופשית מרגע ההתנתקות מהמסילה, כתלות בגובה המסילה H. נשחרר את הכדור מגובה קבוע על המסילה (h) ונוודא שמהירותו ההתחלתית היא 0 מטרים לשנייה. במקביל, נשנה את גובה המגלשה H ונמדוד את המרחקים השונים של r שנובעים משינוי גובה זה.

ביצענו בדיקות משישה גבהים שונים ובכל גובה שחררנו את הכדור 5 פעמים או יותר. את נקודת הפגיעה של הכדור בקרקע אפיינו על ידי מיצוע כל הדגימות עבור אותו גובה.

1.3.3. חלק שני – מטרת החלק השני היא לבדוק את המרחק r אליו הגיע כדור A, הנע בנפילה חופשית מרגע ההתנתקות מהמסילה, כתלות בגובה הכדור h על המסילה. נשחרר את הכדור מגובה קבוע של המסילה מהקרקע (H) ונוודא שמהירותו ההתחלתית היא 0 מטרים לשנייה. במקביל, נשנה את גובה הכדור על המגלשה (h) ונמדוד את המרחקים השונים של r שנובעים משינוי גובה זה.

ביצענו בדיקות מחמישה גבהים שונים ובכל גובה שחררנו את הכדור 5 פעמים או יותר. את נקודת הפגיעה של הכדור בקרקע אפיינו על ידי מיצוע כל הדגימות עבור אותו גובה.

2. שגיאות מדידה:

נתייחס לשגיאות המדידה לאורך הניסוי, ממה הן נובעות ואיך טיפלנו בהן:

2.1. מדידות במד משקל – למד המשקל אי דיוק של ± 0.01 ק"ג.

2.2. מדידות עם הסרגל: לסרגל אי דיוק הנתון על ידי שליש שנתה אחד, המהווה מ"מ אחד כלומר: ± 0.03 ס"מ

2.3. דרך חישוב שגיאות מדידה וסטיות תקן:

את סטיית התקן חישובנו על ידי סכמת מיצוע התוצאות שהתקבלו וחלוקה במספר התוצאות שנמדדו באופן הבא:

2.3.1. חישוב ממוצע המדידות $\hat{\mu} : \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$

2.3.2. חישוב סטיית תקן $\hat{\sigma} : \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \hat{\mu})^2}$

2.3.3. שגיאה סטטיסטית: $\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}}$

כאשר A_i מייצג מדידה מסוימת ו N מייצג את מספר המדידות

2.3.4. ספרות משמעותיות: הזנחנו כל ספרה שניה לאחר הנקודה העשרונית משום שציוד המדידה שלרשותנו (הסרגל) איננו מדייק עד לרמה זו.

3. גדלים קבועים:

3.1. גובה הכדור על המסילה h (רלוונטי לחלק א בלבד) $0.03 \pm 14 \text{ cm}$

3.2. גובה המסילה H (רלוונטי לחלק ב בלבד) $0.03 \pm 15 \text{ cm}$

3.3. משקל כדור זכוכית : $0.01 \pm 5.1 \cdot 10^{-3} \text{ ק"ג}$

3.4. משקל כדור מתכת : $0.01 \pm 16.7 \cdot 10^{-3} \text{ ק"ג}$

3.5. רדיוס כדור זכוכית: $0.03 \pm 7.9 \cdot 10^{-3} \text{ מטר}$

3.6. רדיוס כדור מתכת : $0.03 \pm 8.3 \cdot 10^{-3} \text{ מטר}$

חלק א'

4. סיבות לאי דיוק המדידות:

נתבונן במדידה אחת עבור כדור הזכוכית, מגובה של 31 cm :

$H(\text{cm})$	$r(\text{cm})$
31	27.4
31	27.8
31	27.9
31	28
31	28.2

ניתן לראות שמרחק הנפילה r איננו אחיד.

הסיבות לשונות בתוצאות הפגיעה עבור H זהה יכולות לנבוע ממספר גורמים:

4.1. שחרור לא אחיד של הכדור, נגיעה קלה לכיוון מסוים שתשנה את מהירותו וכיוון תנועתו

4.2. תזוזות במערכת המסילה ו"הסטנד" שלה

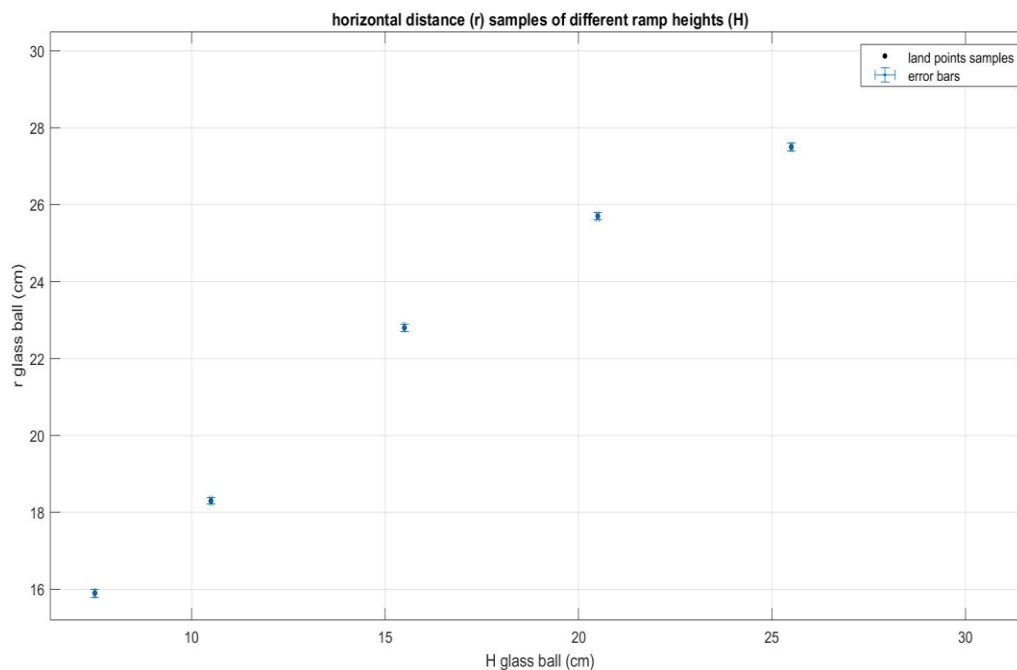
4.3. לכדור אין מרקם אחיד ב-100% בכל חלקיו, לדוג' שאריות אבק שנצמדו אליו במקומות מסוימים, ולכן בשחרור באוריינטציות שונות צמיגות האוויר תשפיע עליו מעט אחרת

4.4. "מכשולים" (פירורים, אבק...) במסילה שישפיעו על תאוצתו במורד המסילה ואח"כ על מהירותו ההתחלתית לנפילה

גורמים אלו ועוד יוצרים התפלגות תוצאות עבור כל אחת מהזריקות.

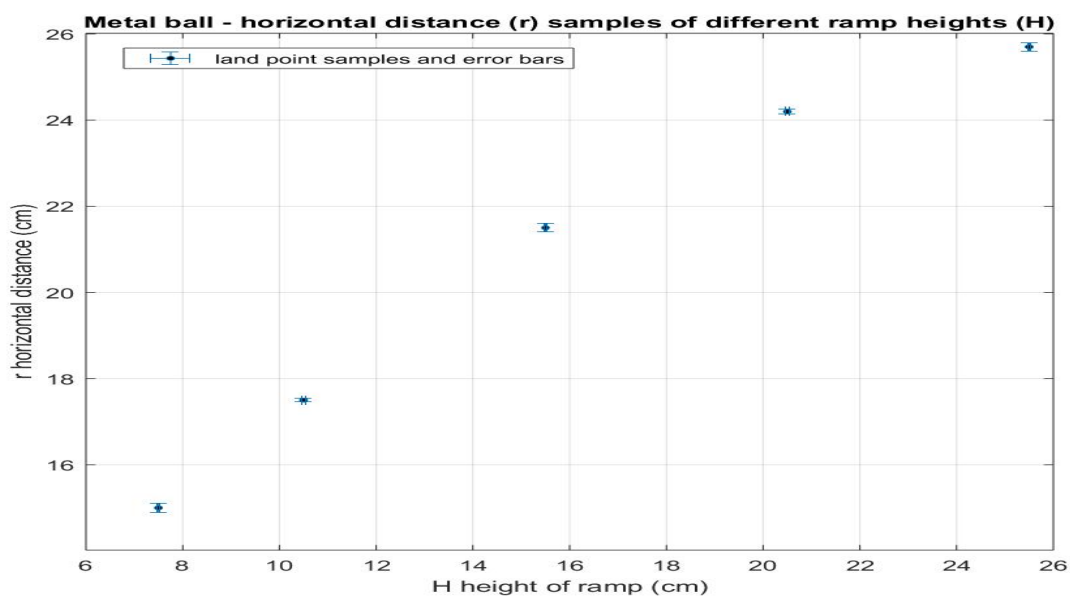
5. תוצאות הניסוי:

5.1. דגימות מרחק נפילת כדור הזכוכית (r) כפונקציה של גובה ההפלה H :



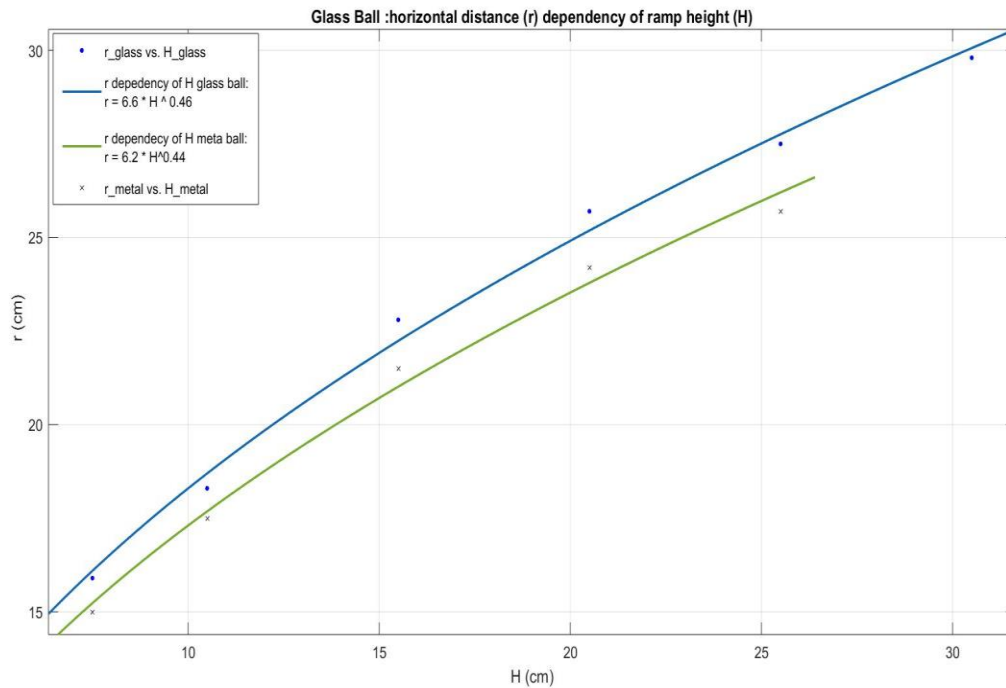
תרשים 2: דגימות מרחק נפילת כדור הזכוכית

5.2. דגימות מרחק נפילת כדור המתכת (r) כפונקציה של גובה ההפלה H :



תרשים 3: דגימות מרחק נפילת כדור המתכת כפונקציה של גובה

5.3. התלות הפונקציונלית עבור מרחק נפילת הכדורים (r) כפונקציה של גובה ההפלה H:



תרשים 4: התלות הפונקציונלית עבור מרחק נפילת הכדורים כפונקציה של גובה ההפלה

$$r_{\text{glass}} = a \cdot H^b, a = 6.6 \pm 0.5, b = 0.45 \pm 0.03$$

$$r_{\text{metal}} = a \cdot H^b, a = 6.2 \pm 0.7, b = 0.44 \pm 0.1$$

6. מסקנות

6.1. ניתן לראות שבשני המקרים מתקבלות תוצאות יחסית דומות, וזאת תוך התחשבות בשגיאות המתוארות לעיל. עובדה זו מסתדרת עם הנחת התיאוריה המפורטת בסעיף 6.3, המציגה קשר בין r ל H שאיננו תלוי במסת הכדורים. בכל זאת, התוצאות לא זהות לחלוטין.

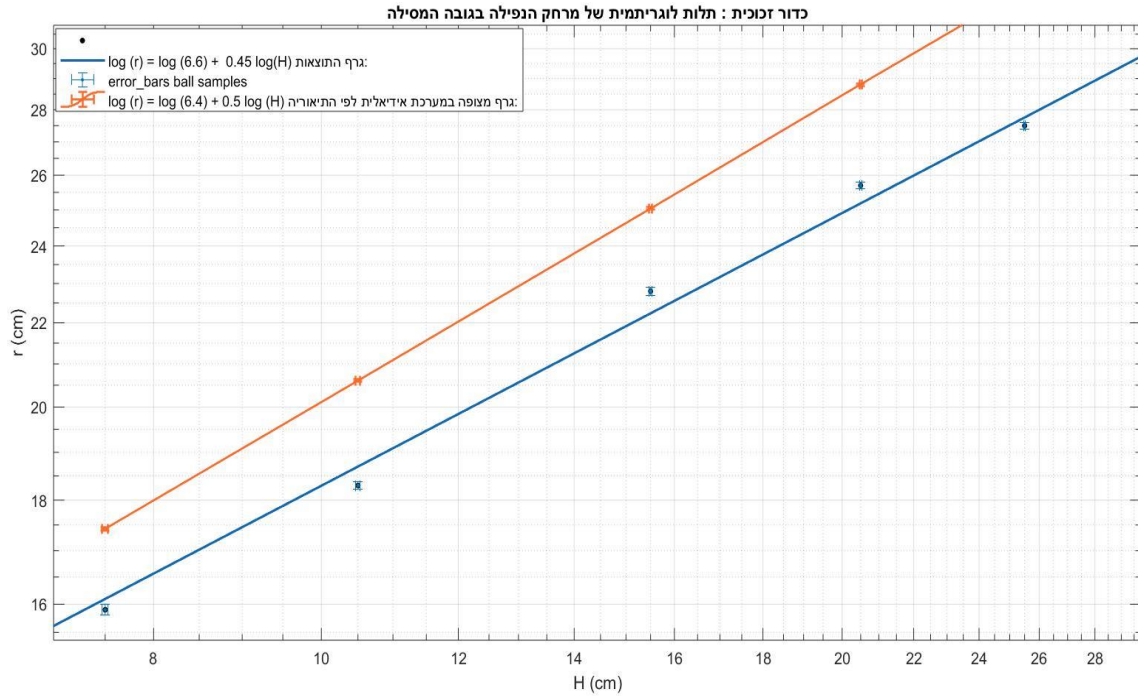
מדוע התוצאות שונות?

6.1.1. ניתן להניח שמשום שהכדורים עשויים מחומר שונה, מקדם החיכוך שלהם עם המשטח שונה. מקדם חיכוך שונה מוביל לכך שכמות האנרגיה הנשמרת במהלך תנועת כל כדור איננה זהה, דבר שבתורו משפיע על מהירות הכדורים והמרחק אליהם הם מגיעים. ניתן להניח שבהתאם לתוצאות שהתקבלו, מקדם החיכוך של כדור הזכוכית נמוך יותר ממקדם החיכוך של כדור המתכת.

נציין כי אין בהערה זו חד משמעיות, משום ששגיאות המדידה מעידות שהשוני הנמדד בין המרחקים של שני הכדורים חופפים בחלק מטווח השגיאה.

6.2. מסתמן כי התלות היא בקירוב שורשית, נאמת השערה זו עם גרף בתצוגה לוגריתמית ונצפה לתלות לינארית: (בשל חוק חזקה)

נתבונן בתלות הלוגריתמית עבור כדור הזכוכית בהשוואה לתלות התיאורטית:



תרשים 5: תלות לוגריתמית מהניסוי ומהתיאוריה עבור כדור זכוכית

6.2.1. התלות הפונקציונלית: $\ln(r) = 0.45 \ln(H) + \ln(6.6)$

6.2.2. התלות הפונקציונלית לפי התיאוריה: $\ln(r) = \frac{1}{2} \ln(H) + \ln(6.4)$

כפי שניתן לראות, התלות היא בקירוב לינארית. דבר המעיד על תלות חזקתית בין המשתנים. גם במקרה זה, ניתן לראות שקיים הבדל בין גרף התיאוריה לגרף הניסוי. בדומה לנאמר בסעיף 6.1.1, ניתן להבין שבתנאי המעבדה לא מתקיים שימור אנרגיה מוחלט. למעשה – חלק מהאנרגיה נאבדת כתוצאה מעבודת כוח החיכוך. מעבר לחיכוך שמשפיע על מהירות הכדור, ניזכר בסיבות לאי דיוק המדידות המתוארות בסעיף 4. שילוב של אלה מביא אותנו להבנה שאכן מצופה שהגרף הניסויי יהיה "מתחת" לגרף התיאורטי.

הערה על נקודת החיתוך עם ציר ה-z: היה מצופה שנקודת החיתוך עם ציר ה-z של הישר המתואר על ידי תוצאות הניסוי תהיה נמוכה מנקודת החיתוך של הישר התיאורטי. עם זאת, לפרמטר זה יש טווח שגיאה הגדול מ-0.2 ועל כן תוצאה זו תיתכן ואיננה סותרת את התיאוריה.

6.3. פיתוח תיאורטי

6.3.1. בציר הנפילה Y (מהמסילה למשטח) הגוף נע בתאוצה קבועה g ולכן תנועתו ניתנת להצגה באופן הבא:

$$H(t) = H_0 - V_{0H}t - 1/2gt^2$$

הגוף מתחיל מנפילה בגובה H במהירות 0 ונופל בתאוצה קבועה g עד שמגיע למשטח (גובה 0) לכן תנועתו עד הפגיעה במשטח נתונה על ידי:

$$0 = H - 1/2gt^2$$

נבודד את t:

$$t = \sqrt{\frac{2}{g}H}$$

בציר z (מישור xy, מקביל לבסיס המסילה) הוא נע במהירות קבועה (המהירות איתה עזב את המסילה) ומתקדם לאורך ציר זה עד הפגיעה במשטח לכן תנועתו:

$$r(t) = r_0 + V_{0r}t, \text{ when } r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

נציב את זמן התנועה t:

$$r = \sqrt{\frac{2V_{0r}^2}{g}} * \sqrt{H}$$

זוהי משוואת הגרף המצופה בהתאם לפיתוח התיאורטי. המקדם המתאים לגרף לפי פיתוח זה הוא $a = \sqrt{\frac{2V_{0r}^2}{g}}$

6.3.2. מהירות היציאה מהמסילה:

נחשב את מהירות הכדור בעת עזיבתו את המסילה במצב תיאורטי של שימור אנרגיה בין זמן הפלת הכדור עד ליציאתו מהמסילה:

$$E_0 = E_f$$

$$E_{p0} = E_{pf} + E_{kf}$$

כאשר מתחשבים בתנועה שהיא בקירוב ללא החלקה נקבל:

$$mgh = \frac{1}{2}mV_{0r}^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}mV_{0r}^2 + \frac{1}{2} \cdot I \frac{V_{0r}^2}{r^2}$$

נבודד את V_{0r} , ונשתמש בכך שמומנט האינרציה של כדור הוא בקירוב $I = \frac{2}{5}mr^2$:

$$V_{0_glass} = \sqrt{\frac{10}{7}} \cdot \sqrt{gh} \rightarrow V_{0r} = \sqrt{\frac{10 \cdot 9.81 \cdot 0.14}{7}} \approx 1.4 \frac{m}{s}$$

באותו אופן נקבל:

$$V_{0_metal} = 1.37 \frac{m}{s}$$

6.3.3. מהירות לפי התוצאות:

כפי שניתן לראות בסעיף 6.3.1, המהירות נתונה על ידי המקדם a בצורה הבאה:

$$a = \sqrt{\frac{2V_{0r}^2}{g}} \rightarrow V_{0r} = \sqrt{\frac{a^2 g}{2}}$$

נשתמש בתוצאות שקיבלנו עבור a :

$$V_{0_glass} \approx 1.4 \frac{m}{s}, \quad V_{0_metal} \approx 1.3 \frac{m}{s}$$

ניתן לראות כי המהירויות המתקבלות מסתדרות עם חישובי המהירויות שתוארו בסעיף 6.3.2.

6.3.4. פיתוח התלות הסופית $r(H)$:

נחזור לקשר הראשוני שהוצג בסעיף 6.3.1: נציב את V_{0r} בביטוי המקשר בין r ל H מהסעיפים הקודמים:

$$r = \sqrt{\frac{2V_{0r}^2}{g}} \cdot \sqrt{H} \rightarrow r = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{10gh}{7}}{g}} \sqrt{H} = \sqrt{\frac{20h}{7}} \sqrt{H} = 1.7\sqrt{hH}$$

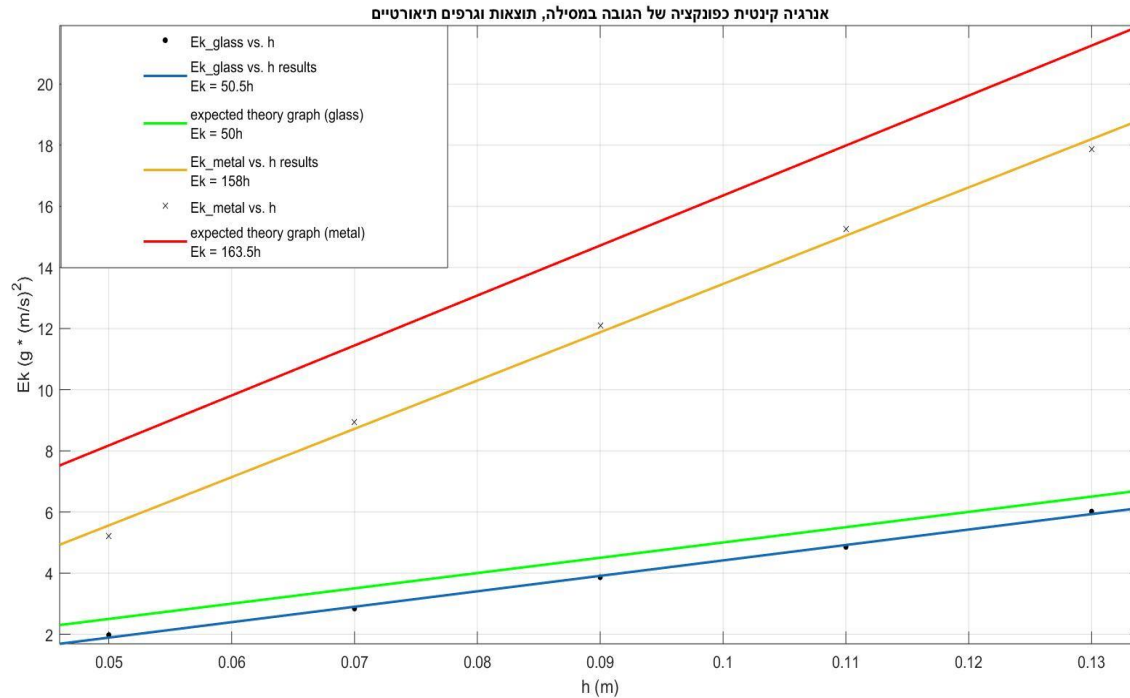
לכן הקשר התיאורטי: $r = 1.7\sqrt{hH}$

*כאשר h הוא קבוע (לפי סעיף 3.1)

חלק ב:

בהתאם למהלך הניסוי המתואר בסעיף 1.3.3. נמדוד את האנרגיה הקינטית של הכדור כתלות במרחק ההפלה של הכדור מהמסילה.

7. התלות הפונקציונלית עבור מרחק נפילת הכדורים (r) כפונקציה של גובה ההפלה h :



תרשים 6: אנרגיה קינטית כפונקציה של גובה המסילה

$$E_{k_{glass}} = 50.5h, \quad E_{k_{metal}} = 158h$$

8. ניתוח תוצאות

8.1. תלות תיאורטית

כאמור, האנרגיה הקינטית של הכדור ברגע עזיבתו את המגלשה היא:

$$E_k = \frac{1}{2}mV_{0r}^2 + \frac{1}{2} \cdot I \frac{V_{0r}^2}{r^2} = \frac{1}{2}mV_{0r}^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5}mr^2 \frac{V_{0r}^2}{r^2} = 0.7mV_{0r}^2$$

$$r = \sqrt{\frac{2V_{0r}^2}{g}} \cdot \sqrt{H} \rightarrow V_{0r} = \sqrt{\frac{gr^2}{2H}}$$

נציב את ערכי V לפי

$$E_k = 0.7m \frac{gr^2}{2H}, H = 0.15m \rightarrow E_k = \frac{7}{3}mgr^2$$

לפי קשר זה, מדדנו את המרחק r (המשתנה עקב השינוי בגובה h), וחישבנו את האנרגיה הקינטית

8.2. הפער בין הישרים:

השווינו בצורה גרפית את האנרגיה הקינטית של הכדור עם האנרגיה ההתחלתית עבור הגבהים השונים. ניתן לראות כי בכל נקודת מדידה, האנרגיה ההתחלתית שהתקבלה מהתיאוריה גבוהה מהאנרגיה הקינטית שנמדדה בניסוי. נשווה את האנרגיה הקינטית שהתקבלה עם האנרגיה הפוטנציאלית ההתחלתית ונבדוק את הגובה המתקבל מכך:

$$E_k = mgh \rightarrow h = \frac{E_k}{mg}$$

עבוד המדידה $E_k = 6.01 \frac{gr \cdot m^2}{sec^2}$ נקבל $h = 12.3 \text{ cm}$. מעשית, אנרגיה קינטית זו התקבלה כאשר הכדור שוחרר מגובה של 13 ס"מ. שוני זה מעיד על כך שהאנרגיה ההתחלתית לא נשמרה.

במצב אידאלי בו האנרגיה הייתה נשמרת לחלוטין לאורך התגלגלות הגולה במסילה האנרגיה הקינטית ברגע עזיבת המסילה הייתה שווה לאנרגיה ההתחלתית, כלומר בשחרור גולה מגובה 13 ס"מ היינו

$$E_k = U_p = mgh = 6.4 \frac{gr \cdot m^2}{sec^2} \text{ כזו:}$$

8.3. משמעות השיפוע: נצפה שבגלל איבודי אנרגיה אלה, ככל שהגובה h גדל, כך גדל גם הפער בין האנרגיה הפוטנציאלית לאנרגיה הקינטית. עובדה זו מומחשת על ידי כך שהישרים המתוארים בגרף אינם מקבילים – ככל שנגדיל את הגובה h אכן יגדל הפער בין האנרגיות הקינטיות.

8.4. ממה נובע איבוד אנרגיה זה?

כפי שתואר בסעיפים הקודמים, הגורם העיקרי שאחראי על איבוד האנרגיה המתואר לעיל הוא עבודת כוחות החיכוך השונים – חיכוך הכדור עם האוויר וחיכוך הכדור עם המסילה. חיכוך זה גרם להאטה מסוימת של הכדור, מה שהביא בתורו להקטנת האנרגיה הקינטית.

9. נספחים

9.1. נספח א' : תוצאות חלק א'

H(cm)	כדור זכוכית r (cm)	כדור מתכת r (cm)
30.5 ± 0.03	29.8 ± 0.1	
25.5 ± 0.03	27.5 ± 0.1	25.7 ± 0.1
20.5 ± 0.03	25.7 ± 0.1	24.2 ± 0.05
15.5 ± 0.03	22.8 ± 0.1	21.5 ± 0.1
10.5 ± 0.03	18.3 ± 0.08	17.5 ± 0.04
7.5 ± 0.03	15.9 ± 0.1	15 ± 0.1

9.2. נספח ב' : תוצאות חלק ב'

בעת חישוב האנרגיה קינטית הומרו מידות האורכים למטר בכדי לקבל תוצאות בסדר גודל קרוב יותר ל – 1.

h(cm)	כדור זכוכית		כדור מתכת	
	r (cm)	$Ek (g * (\frac{m}{s})^2)$	r (cm)	$Ek (g * (\frac{m}{s})^2)$
13 ± 0.03	22.7 ± 0.1	6.01	21.6 ± 0.1	17.87
11 ± 0.03	20.4 ± 0.1	4.86	20 ± 0.04	15.26
9 ± 0.03	18.2 ± 0.1	3.87	17.8 ± 0.1	12.09
7 ± 0.03	15.6 ± 0.1	2.84	15.3 ± 0.1	8.96
5 ± 0.03	13 ± 0.1	1.97	11.7 ± 0.1	5.22