

סמסטר ב' תשס"ב

שם הבודק : _____

תאריך הבדיקה : _____

ציון הדו"ח :

I

II

דו"ח מסכם בניסוי : _____

חלק : _____

שם מדריך הניסוי (שם מלא) : _____ גרישה זלטיץ

תאריך ביצוע הניסוי : _____ 11.12.19

תאריך הגשת הדו"ח : _____ 24.12.19

הדו"ח מוגש על ידי:

I	בר	כחלון	207630864	II	נועם	אלמליח	207480930
	שם פרטי	משפחה	ת.ז.		שם פרטי	משפחה	ת.ז.
		הנדסת חשמל ואלקטרוניקה	03		F		
		מסלול הלימוד	מס' קבוצת המעבדה		תת קבוצה	מספר עמדה	

הערות הבודק לנושאים לקויים בדו"ח:

רקע תאורטי

תנועה הרמונית פשוטה

מיקום של גוף המבצע תנועה הרמונית פשוטה בציר x ניתנת לתיאור על ידי משוואה (1) כאשר ω , A ו- ϕ הם קבועים ממשיים.

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

קיים קשר בין התדירות הזוויתית ω לבין התדירות f וזמן המחזור T .

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

מטוטלת מתמטית

מטוטלת מתמטית בזוויות הטייה קטנות $\theta \ll 1$ (ברדיאנים) מתקיים $\sin \theta \approx \theta$ והמשוואה תבצע תנועה הרמונית פשוטה עם תדירות זוויתית $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, כאשר g הינה תאוצת הכובד ו- l אורך חוט המטוטלת. נשתמש בקשר (2) לקבל את זמן המחזור:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3)$$

מטוטלת פיזיקלית

בזוויות הטייה קטנות יתקבל תנועה הרמונית פשוטה עם תדירות זוויתית $\omega = \sqrt{\frac{I_0 mg}{I}}$, כאשר m הינה מסת המטוטלת, l הינו המרחק בין מרכז המסה לציר הסיבוב ו- I הינו מומנט ההתמד של המטוטלת סביב ציר הסיבוב. נשתמש במשפט שטיינר והקשר (2) לקבל את זמן המחזור של מטוטלת פיזיקלית:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 I_0}{mgl} + \frac{4\pi^2}{g} l \quad (4)$$

רדיוס ההתמד

רדיוס ההתמד המסומן ב- κ , הינו מרחק התלייה בעל זמן המחזור המינימלי ונתון על ידי (5).

$$\kappa = \sqrt{\frac{I_0}{m}} \quad (5)$$

מומנט ההתמד

עבור מטוטלת פיזיקלית הכוללת מוט באורך L ומסה M , עליו מקובעת דיסקה בעלת רדיוס r ומסה m , כך שהמרחק בין מרכז מסת הדיסקה ומרכז מסת המטוטלת הינו a , והמרחק בין מרכז מסת המוט ומרכז מסת המטוטלת הינו A .

ניתן לרשום את מומנט ההתמד הכולל סביב מרכז המסה של המטוטלת:

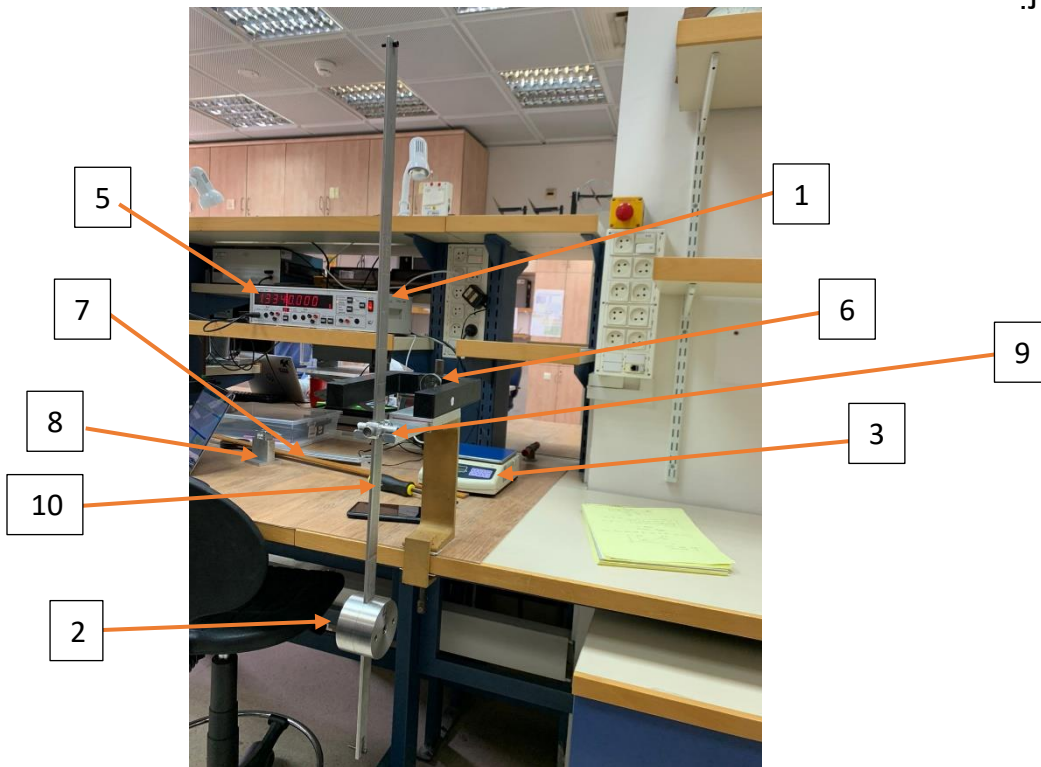
$$I_0 = I_{rod} + I_{disk} = M \left(\frac{L^2}{12} + A^2 \right) + m \left(\frac{r^2}{2} + a^2 \right) \quad (6)$$

מטרת ניסוי - אימות המודל התיאורטי של מטוטלת פיזיקלית וחישוב רדיוס ההתמד של המטוטלת ותאוצת נפילת הכובד.

מהלך ניסוי

רשימת ציוד:

1. מערכת מטוטלת פיסיקאלית הכוללת מוט מתכת ארוך.
2. משקולת מתכת גלילית מוברגת על המוט (סרגל ארוך).
3. מאזני שקילה דיגיטליים ברזולוציה 0.1 גרם.
4. קליבר ברזולוציה 0.001 ס"מ.
5. מונה זמן דיגיטלי ברזולוציה של 0.001 שניה.
6. שער אופטי
7. סרגל ברזולוציה 0.01 ס"מ.
8. מתקן למציאת מרכז המסה
9. מעמד נדנוד המטוטלת.
10. מברג אלן.



איור (1) – תיאור מערכת הניסוי

תחילה נמדדו הגדלים הבאים - על ידי המשקל הדיגיטלי נמדדו מסת המשקולת הגלילית, מסת המוט ומסת וו התליה של המטוטלת, לאחר מכן נמדד אורך המוט על ידי הסרגל ואורך הקוטר של המשקולת הגלילית נמדד על ידי הקליבר. מיד אחר כך הורכבה המערכת, כאשר המשקולת הגלילית חוברה במרחק של כ-30 ס"מ מקצה המוט, וקובעה על ידי מברג אלן למוט. נמדד מרכז המסה של המערכת על ידי הסרגל ומתקן הקיבוע למדידת מרכז מסה. לאחר מכן הוצבה המטוטלת על מעמד הנדנוד, כאשר מיקום וו התליה שנמדד מקצה המוט, שונה 13 פעמים, כאשר תחילה וו התליה מוקם בנקודה מרוחקת ממרכז המסה, כאשר בכל מדידה וו התליה התקדם בקפיצות של 10 ס"מ לכיוון מרכז הכובד עד לנקודה בה ניתן להבחין כי זמן המחזור של המטוטלת גדל, מאותה נקודה והלאה נלקחו עוד מספר מדידות בקפיצות של 2.5 ס"מ עד לנקודה הקרובה ככל הניתן אל המשקולת. נמדד בשנית מרכז המסה של המערכת באופן דומה למדידת מרכז המסה הקודמת. לאחר מכן נלקחו עוד מספר מדידות ממיקומים הנמצאים באזור נקודת זמן המחזור המינימלי שנמדד עבור המטוטלת. בכל מדידה נלקחו 8 דגימות של זמן המחזור.

תכנון עיבוד תוצאות

לכל מדידת גובה שונה נלקחו מס' קבוע של מדידות זמן, יחושב לזמנים אלו זמן מחזור ממוצע $\bar{T}$. סטיית התקן של מדידת זמני המחזור תחושב על פי נוסחה (3.9) מחוברת עיבוד הנתונים, והשגיאה הסטטיסטית ΔT_{stat} תחושב על פי נוסחה (3.10) מחוברת עיבוד הנתונים.

היות וה"שנתות" על פני הטיימר מתפלגות באופן אחיד, נחשב את שגיאת המכשיר ΔT_{meas} על פי נוסחה (3.4) מחוברת עיבוד הנתונים. השגיאה הכוללת במדידת הזמן ΔT תחושב על פי הנוסחה לחישוב שגיאות כוללת ממצגת עיבוד הנתונים שקופית 3.3.

ריבוע זמן המחזור יהיה פשוט $\bar{T}^2$, ושגיאיתו, שתחושב על פי הנוסחה לחישוב שגיאות עקיפות (4.17) בחוברת עיבוד הנתונים, תהייה:

$$\Delta T^2 = 2T\Delta T \quad (7)$$

מההנחה כי "שנתות" המשקל מתפלגות בצורה אחידה, שגיאת המכשיר Δm_{inst} תחושב על פי נוסחה (3.4) מחוברת עיבוד הנתונים. המסה הכוללת תהייה:

$$m_{total} = m_{rod} + m_{weight} + m_{hook} \pm \sqrt{3} \Delta m_{inst} \quad (8)$$

ושגיאתה תחושב על פי הנוסחה לחישוב שגיאות עקיפות (4.17) בחוברת עיבוד הנתונים.

מההנחה שהשנתות על פני הסרגל מתפלגות באופן אחיד, שגיאת הרזולוציה של הסרגל Δres_{ruler} תחושב על פי נוסחה (3.4) מחוברת עיבוד הנתונים.

לכן, השגיאה באורך המוט ובמיקום מרכז המסה ΔL_{rod} , Δcom יהיו נתונים ע"פ שגיאת הרזולוציה של הסרגל.

שגיאת הרזולוציה של הקליבר תחושב גם היא על פי נוסחה (3.4) מחוברת עיבוד הנתונים, מההנחה ש"שנתות" הקליבר מתפלגות אחיד. על כן שגיאת הרזולוציה במדידת קוטר המשקולת, $\Delta diameter$, תהייה נתונה על פי שגיאת הקליבר, ושגיאת הרזולוציה של רדיוס המשקולת תחושב על פי הנוסחה לחישוב שגיאות עקיפות (4.17) בחוברת עיבוד הנתונים ותהייה:

$$\Delta radius = \frac{\Delta diameter}{2} \quad (9)$$

מההנחה שהמוט הינו מוט עם צפיפות מסה אחידה, יחושב מרכז המסה של המוט, ושגיאיתו ע"פ (4.17) מחוברת עיבוד הנתונים:

$$rod_{com} = \frac{L_{rod}}{2} \pm \frac{\Delta L_{rod}}{2} \quad (10)$$

מרחק מרכז המסה של המוטטלת ממרכז המסה של המוט יסומן ב-A, ומרחק מרכז המסה של המשקולת ממרכז המסה של המוטטלת יסומן ב-B.

היות וגדלים אלו נמדדו בשני קצוות אינטרוול אורכי המדידות, כלומר A_1, A_2, B_1, B_2 כך ש:

$$A_i = com_i - \frac{L_{rod}}{2} \pm \sqrt{\Delta com^2 + \frac{\Delta L_{rod}^2}{4}} \quad (11)$$

$$B_i = com_i - X_{weight} + r_{weight} \pm \sqrt{\Delta com^2 + \Delta res_{ruler}^2 + \Delta radius^2} \quad (12)$$

שגיאות אלו יחושבו בעזרת נוסחה (4.17) בחוברת עיבוד הנתונים.

יחושבו $\bar{A}$, $\bar{B}$ ממוצעי הגדלים, ושגיאותיהם תחושבנה כשגיאה כוללת של ההתפלגות האחידה של הערכים על פיהם חושב הממוצע, והשגיאה של חישוב גודל עקיף ע"פ נוסחאות (4.17) ו-(3.4) מחוברת עיבוד הנתונים:

$$\Delta \bar{A} = \sqrt{\frac{\Delta A^2}{2} + \left(\frac{|A_1 - A_2|}{\sqrt{12}}\right)^2}, \quad \Delta \bar{B} = \sqrt{\frac{\Delta B^2}{2} + \left(\frac{|B_1 - B_2|}{\sqrt{12}}\right)^2} \quad (13)$$

כעת יחושב I_0 מנוסחה (6). שגיאתו תחושב ע"פ נוסחה (4.17) מחוברת עיבוד הנתונים ותיייה:
(14) ΔI_0

$$= \sqrt{\left(\left(\left(\frac{L^2}{12} + \bar{A}^2 \right) \Delta m_{rod} \right)^2 + \left(\frac{m_{rod} L \Delta L}{6} \right)^2 + (2m_{rod} \bar{A} \Delta \bar{A})^2 + \left(\left(\frac{r^2}{2} + \bar{B}^2 \right) \Delta m_{weight} \right)^2 + (m_{weight} r \Delta r)^2 + (2m_{weight} \bar{B} \Delta \bar{B})^2 \right)}$$

מיקום וו התליה יהיה h ושגיאתו תהייה נתונה ע"י שגיאת הרזולוציה של הסרגל.
מרחק מרכז המסה מציר הסיבוב יהיה נתון על ידי:

$$l = h - \frac{L_{rod}}{2} + \bar{A} \pm \sqrt{1.25 \Delta res_{ruler} + \Delta \bar{A}^2} \quad (15)$$

כאשר שגיאתו חושבה ע"פ נוסחה (4.17) מחוברת עיבוד הנתונים.

כעת תבוצע התאמה מהצורה:

$$y = \frac{a_1}{x} + a_2 x \quad (16)$$

כאשר ציר הע' יהיה זמן המחזור בריבוע ובציר הא יהיה l . יסומן $x = x' + a_3$, על מנת שפרמטר זה יספוג שגיאות שיטתיות.

מההתאמה יחולצו הגדלים הבאים:

$$k_{fit} = \sqrt{\frac{a_1}{a_2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{2\sqrt{a_1 a_2}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{a_1} \Delta a_2}{2a_2^{1.5}} \right)^2}} \quad (17)$$

$$g_{fit} = \frac{4\pi^2}{a_2} \pm \frac{4\pi^2}{a_2^2} \Delta a_2 \quad (18)$$

שגיאותיהם חושבו ע"פ נוסחה (4.17) מחוברת עיבוד הנתונים.
 k_{theo} יחושב על פי נוסחה (5) ושגיאתו תחושב ע"פ נוסחה (4.17) מחוברת עיבוד הנתונים.

$$\Delta k_{theo} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{2\sqrt{m_{total} I_0}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m_{total}}{2m_{total}} * \sqrt{\frac{I_0}{m_{total}}} \right)^2} \quad (19)$$

יבוצע חישוב מדד טיב התאמה $N\sigma$ בין g_{fit}, g_{theo} ובין k_{fit}, k_{theo} , כאשר הערך התיאורטי של g נתון על ידי:

$$g_{theo} = 981 \pm 10 \frac{cm}{s^2}$$

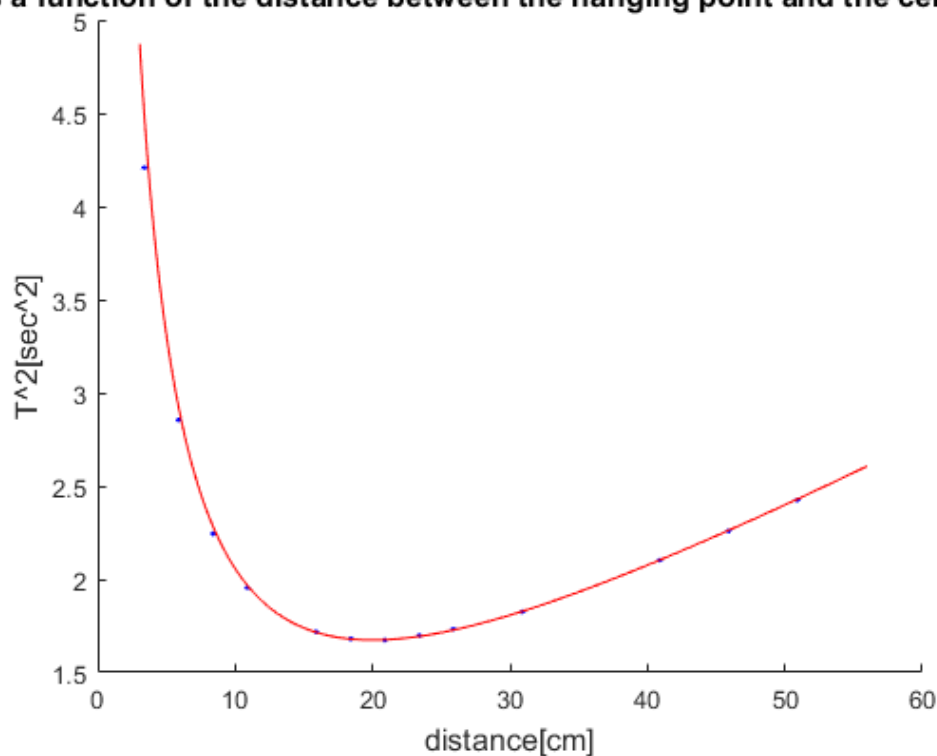
מדד טיב ההתאמה יחושב על פי נוסחה ממצגת עיבוד הנתונים.

חישוב שגיאות יחסיות יעשה על פי נוסחה (1.1) ממצגת עיבוד הנתונים.

עיבוד תוצאות

שגיאת הרזולוציה של הטיימר תחושב להיות $\Delta T_{meas} = 0.00029 \text{ sec}$.
 שגיאת הרזולוציה של המשקל תחושב להיות $\Delta m_{meas} = 0.029 \text{ gram}$, ולכן על פי נוסחה (8) המסה הכוללת ושגיאתה היא $m_{total} = 2500 \pm 0.05 \text{ gram}$.
 שגיאת הרזולוציה של הסרגל תחושב להיות $\Delta Ruler = 0.0029 \text{ cm}$.
 שגיאת הרזולוציה של הקליבר תחושב להיות $\Delta diameter = 0.00029 \text{ cm}$, ואכן מנוסחה (9) $\Delta radius = 0.00014 \text{ cm}$.
 אורך המוט נמדד על ידי הסרגל - $L_{rod} = 100.0000 \pm 0.0029 \text{ cm}$, ולכן מנוסחה (10) $rod_{com} = 50.0000 \pm 0.0014 \text{ cm}$.
 מנוסחה (11) חושב $A_1 = 10.5000 \pm 0.0032 \text{ cm}$ ו- $A_2 = 11.3000 \pm 0.0032 \text{ cm}$.
 מנוסחה (12) חושב $B_1 = 8.5080 \pm 0.0041 \text{ cm}$ ו- $B_2 = 7.7080 \pm 0.0041 \text{ cm}$.
 מנוסחה (13) חושב $\bar{A} = 10.90 \pm 0.23 \text{ cm}$, $\bar{B} = 8.11 \pm 0.23 \text{ cm}$.
 מנוסחה (6) ונוסחה (14) חושב $I_0 = 1053200 \pm 7500 \text{ cm}^2 * \text{gram}$.
 תבוצע התאמה על פי נוסחה (16):

T^2 as a function of the distance between the hanging point and the center of mass



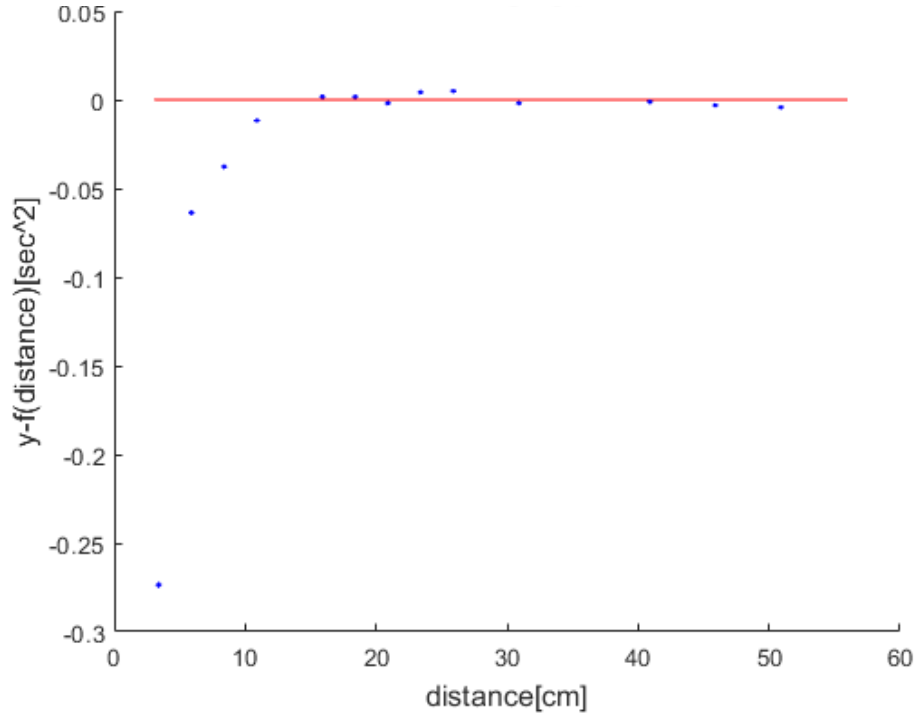
איור (2) – גרף התאמה בין זמני המחזור בריבוע כפונקציה של המרחק מציר הסיבוב למרכז המסה

$a_1 \pm \Delta a_1 [\text{sec}^2 * \text{cm}]$	$a_2 \pm \Delta a_2 [\frac{\text{sec}^2}{\text{cm}}]$	$a_3 \pm \Delta a_3 [\text{cm}]$	$\frac{\Delta a_1}{a_1} \%$	$\frac{\Delta a_2}{a_2} \%$	$\frac{\Delta a_3}{a_3} \%$	P_{prob}	χ^2_{red}
17.22 ± 0.16	0.04070 ± 0.00087	-0.59 ± 0.14	0.94	2.1	23	0.39	1.0

טבלה (1) – נתוני התאמה מתוכנת ה"מטלב"

ניתן לראות כי רוב הנקודות נמצאות על קו ההתאמה וצלבי השגיאות שלהן חותכים את קו ההתאמה, כי אכן התקבלה התאמה שבתחילתה הינה היפרבולית ולאחר נקודת המינימום לינארית. בנוסף P_{prob} נמצא באינטרוול של $[0.05, 0.95]$, וכי $\chi^2_{red} \sim 1$, אלו ערכי התאמה טובים. יתר על כן השגיאות היחסיות של a_1, a_2 קטנות מ- 4%, אך השגיאה היחסית של a_3 גדולה מ-4%.

T^2 as a function of the distance between the hanging point and the center of mass- Residuals plot



איור (3) – גרף שארים של ההתאמה בין זמני המחזור בריבוע כפונקציה של המרחק מציר הסיבוב למרכז המסה

ניתן לראות כי למעט ארבע הנקודות השמאליות הפיזור רנדומלי ולא ניכרת מגמה, לעומת זאת ניכרת מגמה היפרבולית שלילית בארבע הנקודות הראשונות. בנוסף לכך לא כל הנקודות חותכות את קו ההתאמה, אך צלבי השגיאה של רוב הנקודות חותכים את קו ההתאמה או מגיעים מאוד קרוב אליו למעט ארבע הנקודות השמאליות ביותר שנמצאות במרחק גדול מקו ההתאמה ובמיוחד הנקודה הראשונה.

יחולץ מנוסחה (17) - $k_{fit} = 20.569 \pm 0.097 \text{ cm}$

מנוסחה (18) - $g_{fit} = 970 \pm 21 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$

מנוסחה (5) ונוסחה (19) יחושב - $k_{theo} = 20.485 \pm 0.073 \text{ cm}$

מדד טיב ההתאמה בין k_{theo} לבין k_{fit} יהיה- $N\sigma = 0.69$

מדד טיב ההתאמה בין g_{theo} לבין g_{fit} יהיה- $N\sigma = 0.48$

השגיאות היחסיות לגדלים שחולצו מן ההתאמות יהיו:

$$\frac{\Delta k_{fit}}{k_{fit}} = 0.47\%, \quad \frac{\Delta g_{fit}}{g_{fit}} = 2.1\%$$

השגיאות היחסיות של הגדלים התיאורטיים:

$$\frac{\Delta k_{theo}}{k_{theo}} = 0.35\%, \frac{\Delta g_{theo}}{g_{theo}} = 1.0\%$$

דיון ומסקנות

בניסוי זה רצינו לאמת את המודל התיאורטי של מטוטלת פיזיקלית ולחשב את רדיוס ההתמד של המטוטלת ואת תאוצת נפילת הכובד.

מההתאמה שבוצעה בתוצאות ניתן לראות כי קיבלנו עקומה המתארת בצורה טובה את הפונקציה בעזרתה תיארונו את המודל של מטוטלת פיזיקלית. כמצופה קיבלנו נקודת מינימום שהיוותה את המעבר מהמגמה ההיפרבולית למגמה הלינארית. מדדי P_{prob} התקבל בטווח שרצינו ולכן χ^2_{red} מספיק קרוב לערך 1 אשר מעיד על התאמה המתארת בצורה טובה את תוצאות המדידות.

השגיאות היחסיות של a_1 ו- a_2 הן שגיאות יחסיות קטנות לכן ייתכן שהערכנו את השגיאות בחסר, אך השערה זו לא עולה בקנה אחד עם מדדי P_{prob} ו- χ^2_{red} .

לעומת זאת השגיאה היחסית של a_3 הינה שגיאה יחסית גדולה, אך גורם זה נמצא בהתאמה על מנת "לספוג" שגיאות שיטתיות, ולכן אנו סבורים כי לאור כך הוא אכן מגלם את השגיאות השיטתיות בניסוי, וסייע בהתאמת מדדים טובים לניסוי. ניתן להסיק כי הייתה קיימת שגיאה שיטתית במדידת האורכים עם הסרגל של כ-0.5 ס"מ, **הסיבה לשגיאה זו הייתה בביצוע המדידות על ידי הנסיין אשר אמד את תוצאות המדידה בעזרת העין.** ייתכן גם שהסרגל מוקם בזווית קטנה כלפי האורך הנמדד ולכן נגרמה שגיאה שיטתית.

בגרף השארים היה ניתן לראות כי ארבע הנקודות השמאליות ביותר רחוקות מאוד מקו ההתאמה ומזכירות מגמה היפרבולית שלילית. **אנו סבורים כי לא מסתתרת כאן מגמה** שלא התייחסנו אליה בביצוע ההתאמה, זאת כיוון שהמרחק של הנקודות מקו ההתאמה בגרף השארים מושפע גם ממרחק הנקודות בגרף המקורי בציר ה- X וגם ממרחקן בציר ה- Y . היות שהנקודות מאוד קרובות בציר ה- X , ואף צלבי השגיאה שלהן חותכים את קו ההתאמה בציר ה- X , אבל מרחקן מקו ההתאמה בציר ה- Y גדול מאוד היות ובחלק השמאלי של קו ההתאמה ניכרת בעיקר המגמה ההיפרבולית, כלומר שיפוע העקומה גדול מאוד בחלק זה. בעקבות זאת, מתבטא מרחק גדול מאוד בגרף השארים בחלק השמאלי של ההתאמה.

מדדי טיב ההתאמה $N\sigma$ שחושבו הינם קטנים מ-3 סטיות תקן. **היות וחושבו שגיאות יחסיות קטנות ל- k, g היינו מצפים לקבל מדד טיב התאמה גדול יותר, היות ושגיאה יחסית קטנה מצביעה על שגיאה קטנה ביחס לגודל הנמדד ובמדד טיב ההתאמה השגיאה באה לידי ביטוי במכנה, לכן ככל שהיא קטנה יותר מרחק סטיות התקן יגדל.**

למרות זאת, מדדי טיב ההתאמה שחושבו הינם קטנים מה שמצביע על אומדן טוב של הגדלים שחושבו בניסוי.

בפיתוח הרקע התיאורטי הנחנו קירוב של זוויות קטנות, אשר עליו המודל מסתמך, כאשר מנדנדים את המטוטלת בזוויות גדולות הקירוב כבר לא בהכרח קירוב טוב.

במהלך ביצוע הניסוי נתקלנו בקשיים בנדנוד המטוטלת בזוויות קטנה כאשר תלינו אותה מגבהים נמוכים. קשיים אלו התבטאו בכך שהמטוטלת עצרה לאחר זמן קצר ולא עלה בידינו לבצע כמות מספקת של מדידות זמן המחזור. עקב כך נאצלנו לנדנוד את המטוטלת בזוויות גדולה יותר, אשר קירוב הזוויות הקטנות כבר אינו קירוב טוב בזוויות זו. ייתכן שאילוץ זה השפיע על תוצאות המדידה ועל החישובים שבוצעו.



בעקבות בעיה זו חשבנו על הצעה לשיפור- היות וכל נקודה במטוטלת מתנדנדת באותה מהירות זוויתית אך ככל שהנקודה קרובה יותר לציר הנדנוד המהירות הקווית קטנה, ייתכן והמטוטלת לא באמת נעצרה, אלא שהמהירות הקווית של החלק במטוטלת, שמוקם אל מול השער האופטי, הייתה קטנה מאוד והשער האופטי לא הצליח לזהות מעבר של המטוטלת במלוא רוחבה. לכן אנו סבורים כי אם נתלה את השער האופטי נמוך יותר נוכל להתגבר על בעיה זו, היות והנקודות הרחוקות יהיו בעלות מהירות קווית גדולה יותר וייתכן שכך השער האופטי יצליח לזהות את התנודות, ובכך להימנע מסטייה ממודל הקירוב של זוויות קטנות.

הצעה לשיפור נוספת תהיה להשתמש במכשיר אשר יחזיק את המטוטלת בזווית קטנה וישחרר אותה ממנוחה בלחיצת כפתור מרחוק, זאת כיוון שבניסוי המטוטלת שוחררה על ידי נסיין אנושי, וייתכן כי הנסיין שיחרר את המטוטלת עם מהירות התחלתית כלשהי, ובכך להימנע משגיאה שיטתית המשתנה בין מדידה למדידה.

נקודת חוזק של תכנון הניסוי הינה הצורה בה התמודדנו עם השינוי במיקום מרכז המסה כתוצאה מהזזת ו התליה. מדדנו את מרכז המסה של המערכת כאשר הוו מוקם במקום הגבוה ביותר ובהתאם חישבנו את מרחק מרכז המסה של המערכת ממרכז המסה של מוט, ומרחק מרכז המסה של המערכת ממרכז המסה של המשקולת. חזרנו על הפעולה כאשר הוו מוקם במקום הנמוך ביותר, והנחנו שהמרחקים המתוארים לעיל מתפלגים אחיד, על כן יכולנו להעריך את מיקום מרכז המסה הממוצע בצורה טובה, ולהימנע מהצורך למדוד מרכז מסה מחדש בכל תזוזה של הוו.

לסיכום, אנו סבורים כי עמדנו במטרות הניסוי וכי חישבנו את רדיוס ההתמד ותאוצת הכובד בדיוק טוב, וכי ההתאמה שביצענו מאמתת את המודל של מטוטלת פיזיקלית.

שאלת מדריך

אנו רוצים לחשב את ריבוע ממוצע זמני המחזור, ולא את ממוצע ריבועי זמני המחזור, לכן ראשית נחשב את הממוצע ורק לאחר מכן נעלה בריבוע, ולא נעלה כל זמן בנפרד בריבוע ונחשב את הממוצע. מעניין לשים לב כי $\sigma_T^2 = \overline{T^2} - \bar{T}^2$ שזה השונות בריבוע, כלומר אם השונות אינה 0 שתי דרכי החישוב יניבו תוצאות שונות.

נספחים

$t_{avg^2}[\text{sec}^2]$	$\Delta t_{avg^2}[\text{sec}^2]$	$l[\text{cm}]$	$\Delta l[\text{cm}]$
2.4	0.0011	51	0.23
2.1	0.0013	41	0.23
1.8	0.00092	31	0.23
1.7	0.0011	21	0.23
2.0	0.0010	11	0.23
2.2	0.0014	8.4	0.23
2.9	0.0015	5.9	0.23
4.2	0.0018	3.4	0.23
2.3	0.0012	46	0.23
1.7	0.00090	26	0.23
1.7	0.0010	16	0.23
1.7	0.0010	18	0.23
1.7	0.0012	23	0.23

טבלה (2) – נתונים עבור ההתאמה שבוצעה לניסוי

No.	$h[\text{cm}]$	$l[\text{cm}]$	$\Delta l[\text{cm}]$	$t1[\text{sec}]$	$t2[\text{sec}]$	$t3[\text{sec}]$	$t4[\text{sec}]$	$t5[\text{sec}]$	$t6[\text{sec}]$	$t7[\text{sec}]$	$t8[\text{sec}]$
1	90	51	0.23	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
2	80	41	0.23	1.4	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4
3	70	31	0.23	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
4	60	21	0.23	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
5	50	11	0.23	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
6	48	8.4	0.23	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
7	45	5.9	0.23	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
8	43	3.4	0.23	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
9	85	46	0.23	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
10	65	26	0.23	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
11	55	16	0.23	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
12	58	18	0.23	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
13	63	23	0.23	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

טבלה (3) – תוצאות מדידות הזמנים

t_avg[sec]	Δt_{stat} [sec]	Δt_{inst} [sec]	Δt_{fin} [sec]	t_{avg}^2 [sec ²]	Δt_{avg}^2 [sec ²]
1.6	0.00018	0.00029	0.00034	2.4	0.0011
1.4	0.00035	0.00029	0.00045	2.1	0.0013
1.4	0.00018	0.00029	0.00034	1.8	0.00092
1.3	0.00031	0.00029	0.00043	1.7	0.0011
1.4	0.00023	0.00029	0.00037	2.0	0.0010
1.5	0.00038	0.00029	0.00048	2.2	0.0014
1.7	0.00033	0.00029	0.00043	2.9	0.0015
2.1	0.00032	0.00029	0.00043	4.2	0.0018
1.5	0.00027	0.00029	0.00039	2.3	0.0012
1.3	0.00018	0.00029	0.00034	1.7	0.00090
1.3	0.00026	0.00029	0.00039	1.7	0.0010
1.3	0.00026	0.00029	0.00039	1.7	0.0010
1.3	0.00035	0.00029	0.00045	1.7	0.0012

טבלה (4) – חישובי זמנים

m_vav[gram]	36
m_rod[gram]	990
m_mishkolet[gram]	1500
Δm [gram]	0.029
m_total[gram]	2500
Δm_{total} [gram]	0.05
rod_lenght[cm]	100
Δrod_lenght [cm]	0.0029
koter_mishkolet[cm]	8.0
radius_mishkolet[cm]	4.0
$\Delta koter$ [cm]	0.00029
$\Delta radius$ [cm]	0.00014
center_of_mass_max[cm]	61
center_of_mass_min[cm]	61
$\Delta ruler$ [cm]	0.0029
A_max[cm]	11
A_min[cm]	11
A_average[cm]	11
B_max[cm]	8.5
B_min[cm]	7.7
B_average[cm]	8.1
ΔA_{avg}	0.23
ΔB_{avg}	0.23
ΔA	0.0032
ΔB	0.0041

טבלה (5) – גדלים אשר נמדדו בניסוי