

דו"ח מסכם בניסוי: תנועה הרמונית

חלק: _____

שם הבודק: _____

תאריך הבדיקה: _____

ציון הדו"ח: **I** _____

II _____

שם מדריך הניסוי (שם מלא): _____ גרישה זלטיץ

תאריך ביצוע הניסוי: 15/01/20 _____

תאריך הגשת הדו"ח: 02/02/20 _____

הדו"ח מוגש על ידי:

II אורי סדובסקי
שם פרטי משפחה ת.ז.
304813009

I רועי שרון
שם פרטי משפחה ת.ז.
312497969

הנדסת חשמל _____ מס' קבוצת המעבדה 04 _____ תת קבוצה C _____ מספר עמדה - _____
מסלול הלימוד

הערות הבודק לנושאים לקויים בדו"ח:

מטרת הניסוי:

אימות המודל התיאורטי של מטוטלת פיזיקלית וחישוב רדיוס התמד של המטוטלת ותאוצת נפילת הכובד.

רקע תיאורטי:

תנועה הרמונית פשוטה

מיקום של גוף המבצע תנועה הרמונית פשוטה בציר x ניתנת לתיאור על ידי משוואה (1) כאשר A , ω 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 $\omega = \sqrt{\frac{I m g}{I}}$, 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- k , הינו מרחק התלייה בעל זמן המחזור המינימלי ונתון על ידי (5).

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

מומנט ההתמד

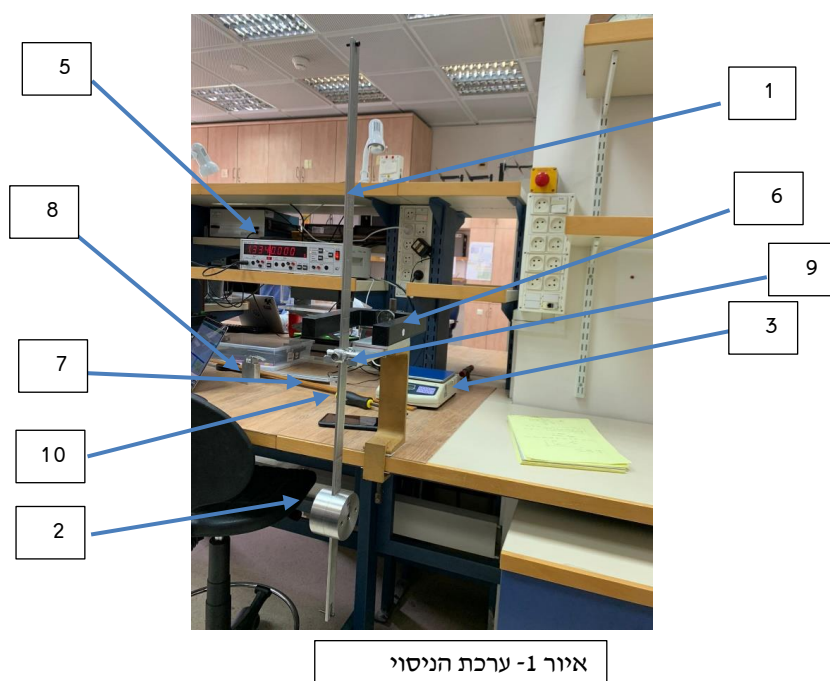
עבור מטוטלת פיזיקלית הכוללת מוט באורך L ומסה M , עליו מקובעת דיסקה בעלת רדיוס r ומסה m , כך שהמרחק בין מרכז מסת הדיסקה ומרכז מסת המטוטלת הינו a , והמרחק בין מרכז מסת המוט ומרכז מסת המטוטלת הינו A . ניתן לרשום את מומנט ההתמד הכולל סביב מרכז המסה של המטוטלת:

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

מהלך הניסוי :

ציוד הניסוי

1. מערכת מטוטלת פיזיקלית הכוללת מוט מתכת ארוך.
2. משקולת מתכת גלילית מוברגת על המוט.
3. מאזני שקילה דיגיטליים ברזולוציה 0.1 גרם.
4. קליבר ברזולוציה 0.001 ס"מ.
5. שעון עצר דיגיטלי ברזולוציה 0.001 שניה.
6. שער אופטי.
7. סרגל ברזולוציה 0.1 ס"מ.
8. מתקן איוון למציאת מרכז המסה.
9. מעמד נדנד המטוטלת
10. מברג אלן



לפני תחילת הניסוי ביצענו מספר מדידות- השתמשנו במד משקל דיגיטלי למצוא את מסת כל אחד מרכיבי המערכת- מסת המשקולת, מסת המוט ומסת וו התליה. בנוסף מדדנו את אורך המוט בעזרת סרגל ואת קוטר הדסקה בעזרת קליבר. לאחר מכן הרכבנו את המערכת כאשר מיקמנו את המשקולת במרחק כ 30 ס"מ ממרכז הסרגל. מדדנו את מרכז המסה ע"י מד האיזון, נמדדו את מרכז המסה בשנית בנקודה בה המרחק בין וו התליה למרכז המסה הוא הכי קטן. מיקמנו את המשקולת על מעמד הדנדוד. את המדידה הראשונה ביצענו כאשר וו התלייה נמצא במרחק הכי גדול ממרכז הכובד. בכל מדידה הזזנו את וו התליה ב 10 ס"מ לכיוון מרכז הכובד עד לנקודה בה הבחנו כי זמן המחזור גדל ולאחר מכן הזזנו את וו התלייה ב 2.5 ס"מ כל פעם עד שהגענו ל 5 ס"מ ממרכז המסה (בנקודה זאת נמדדו שוב את מרכז המסה ע"י מד האיזון). לאחר מכן ביצענו עוד מספר מדידות בטווח שקיבלנו כך שבסה"כ ביצענו 14 מדידות. עבור כל מרחק מדדנו 8 זמני מחזור באמצעות שעון העצר (כאשר שעון העצר שומר בכל פעם 4 מדידות ולכן בוצעו שני סטים של מדידות).

תכנון עיבוד תוצאות

חלק א' –

במהלך הניסוי נמדדו מספר גדלים בעזרת סרגל, קליבר, מד משקל ושעון עצר. לכלל הגדלים אשר מודדו בעזרת מכשירים אלו קיימת שגיאת רזולוציה¹ שמתפלגת באופן אחיד הנובעת מרזולוציית מכשיר המדידה.

שגיאת המסות של המערכת –

המערכת הכוללת מורכבת מ 3 מסות- מסת המשקולת, מסת המוט ומסת הו. שלושת המסות (משקולת, מוט ו-ו) בעלי שגיאת רזולוציה המתפלגת באופן אחיד². לכן את שגיאת המסה הכוללת חישובנו ע"י חישוב שגיאה עקיפה³.

$$(7) \quad m_{Tot} = m_{rod} + m_{weight} + m_{hook}, \quad \Delta m_{Tot} = \sqrt{3} \Delta m_{res}$$

זמן המחזור ושגיאתו –

זמן המחזור נמדד בכמה גבהים, והינו הממוצע של 8 המדידות שבוצעו באותה הגובה. למדידות הזמן ע"י שעון העצר קיימת שגיאת רזולוציה המתפלגת באופן אחיד⁴. מלבד לשגיאת הרזולוציה קיימת שגיאה סטטיסטית⁵. את השגיאה הכוללת של הזמן נחשב ע"י הנוסחה לחישוב שגיאה העקיפה⁶. בפועל אנו נחשב את זמן המחזור בריבוע עבור נוסחה (4), לכן שגיאת זמן המחזור בריבוע תחשוב גם היא ע"י חישוב שגיאה עקיפה⁷:

$$(8) \quad \Delta(T^2) = 2T\Delta T$$

שגיאת קוטר ורדיוס המשקולת –

את קוטר המשקולת (d) מודדנו ע"י קליבר, למכשיר הקליבר שגיאת רזולוציה⁸ המתפלגת באופן אחיד, משום שגם המדידות וגם השגיאות הם עבור הקוטר, את הרדיוס ושגיאתו נקבל ע"י חילוק ב-2 של הקוטר את השגיאה הסופית נקבל לפי החישוב של שגיאה עקיפה⁹.

$$(9) \quad r_{caliber} = \frac{d}{2}, \quad \Delta r_{caliber} = \frac{\Delta d}{2}$$

שגיאת מרכז המסה של המוט והמשקולת –

מרכז המסה של המערכת (יסומן באות "M") נמדד פעמיים ונלקח ממוצע בין מרכזי המסה. הממוצע שחושב הוא בין מרכז המסה בעל המרחק המקסימלי מבין כל המדידות, כלומר כאשר המרחק בין מרכז המסה לוו התלייה הוא מקסימלי לבין הנק' בעלת המרחק המינימלי. הנחנו כי מרכזי המסה מתפלגים באופן אחיד ולכן ערך מרכז המסה יחשוב ע"י ממוצע חשבוני של הגדלים¹⁰. השגיאה של מרכז המסה תחושב לפי שגיאה של התפלגות אחידה¹¹.

$$(10) \quad M_{center} = \frac{M_1 + M_2}{2}, \quad \Delta M_{center} = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{12}}$$

כאשר M_1, M_2 הינם מרכזי המסה שנמדדו.

מרכז המסה של המוט ושגיאתו – מרכז המסה של המוט היה נתון בנקודה "0" שמסומנת ע"י הסרגל, נסמן את המרחק בין מרכז המסה של המערכת למרכז המסה של המוט ע"י האות "A" כיוון שחישובנו את מרכז המסה של המערכת פעמיים נקבל שני ערכים ל "A" (A_1, A_2), שני ערכים אלו נמדדו בעזרת הסרגל ולכן נקבל כי קיים עבורם שגיאת רזולוציה של הסרגל¹².

בנוסף גם כאן הנחנו כי מרכז המסה מתפלג באופן אחיד ולכן קיימת שגיאת של התפלגות אחידה, לכן נקבל ע"פ חישוב שגיאה עקיפה¹³ כי הערך ושגיאת מרכז המסה של המוט היא:

$$(11) \quad A_{center} = \frac{A_1 + A_2}{2}, \quad \Delta A_{center} = \sqrt{\left(\frac{|A_1 - A_2|}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{res}}{2}\right)^2}$$

¹ נוסחה 3.3 – בחוברת עיבוד נתונים – חישוב שגיאה שהתפלגותה אחידה.

² ע"פ הערה 1.

³ נוסחה 4.17 – בחוברת עיבוד נתונים – חישוב שגיאה עקיפה.

⁴ ע"פ הערה 1.

⁵ נוסחה 3.10 – בחוברת עיבוד נתונים – חישוב שגיאה סטטיסטית.

⁶ ע"פ הערה 3.

⁷ ע"פ הערה 3.

⁸ ע"פ הערה 1.

⁹ ע"פ הערה 3.

¹⁰ נוסחה 3.1 בחוברת עיבוד הנתונים

¹¹ ע"פ הערה 1.

¹² ע"פ הערה 1.

¹³ ע"פ הערה 3.

מרכז המסה של המשקולת ושגיאתו – באותו אופן נמדוד את מרכז המסה של המשקולת (נסמן באות "B"). את קוטר המשקולת מדדנו בעזרת מכשיר הקליבר אשר בעל שגיאת רזולוציה¹⁴ המתפלגת באופן אחיד. בנוסף קיימות אותן השגיאות הקיימות בנוסחה (11) לכן ע"פ חישוב של שגיאה עקיפה¹⁵ נקבל כי הערך והשגיאה של מרכז המסה של המשקולת היא

$$(12) \quad B_{center} = \frac{B_1+B_2}{2}, \Delta B_{center} = \sqrt{\left(\frac{|B_1-B_2|}{\sqrt{12}}\right)^2 + (\Delta res_{caliber})^2 + \left(\frac{\Delta res_{ruler}}{2}\right)^2}$$

שגיאת המרחק בין מרכז המסה לנק' התלייה –

המרחק בין מרכז המסה לנק' התלייה יסומן באות "L", אורך זה נמדד בעזרת סרגל ולכן קיימת לו שגיאת רזולוציה¹⁶ המתפלגת באופן אחיד.

מומנט התמד ושגיאתו –

מומנט ההתמד של המערכת חושב באמצעות נוסחה (6), את שגיאת מומנט ההתמד נחשב ע"פ חישוב שגיאה עקיפה¹⁷ ונקבל -

$$(13) \quad \Delta I_{0theo} = \sqrt{\left[\left(\frac{L^2}{12} + A^2\right) \Delta m_{rod}\right]^2 + \left(\frac{L}{6} m_{rod} \Delta L\right)^2 + (2A m_{rod} \Delta A)^2 + \left[\left(\frac{r^2}{2} + B^2\right) \Delta m_{weight}\right]^2 + (r m_{weight} \Delta r)^2 + (2B m_{weight} \Delta B)^2}$$

רדיוס התמד ושגיאתו –

את רדיוס ההתמד נחשב לפי נוסחה (5), ואת שגיאתו נחשב לפי חישוב שגיאה עקיפה¹⁸ -

$$(14) \quad \Delta \kappa_{theo} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{2\sqrt{I_0 m_{Tot}}}\right)^2 + \left(\frac{I_0 \Delta m_{Tot}}{2(m_{Tot})^2}\right)^2}$$

התאמות –

במהלך הניסוי ביצענו מדידות של זמן המחזור כתלות במרחק בין נק' התלייה למרכז המסה, נרצה לבצע התאמה לנוסחה (4), של זמן המחזור בריבוע כתלות במרחק הני"ל, עבור התאמה זו נשתמש בפונקציה

$$(15) \quad y = \frac{a_1}{(x+a_3)} + a_2(x + a_3)$$

כאשר מתוך נוסחה (4) ונוסחה (15) נוכל לחלץ את הקשרים הבאים :

$$(16) \quad y = T^2 [\text{sec}^2], \quad x = l [\text{cm}], \quad a_1 = \frac{4\pi^2 I_0}{mg} [\text{sec}^2 \cdot \text{cm}], \quad a_2 = \frac{4\pi^2}{g} \left[\frac{\text{sec}^2}{\text{cm}}\right]$$

והפרמטר a_3 [cm] הינו איבר חופשי שמטרתו לספוג שגיאות שיטתיות במדידת מרחק הציר ממרכז המסה. מההתאמה ומתוך הנוסחאות (4), (15) ו- (16) נוכל לחלץ את תאוצת הכובד ואת רדיוס ההתמד -

את תאוצת הכובד נחלץ מתוך a_2 , לערך המחושב נבצע מדד טיב התאמה N_σ^{19} עם הערך התיאורטי

$$g_{theo} = 981 \pm 10 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}\right]$$

$$(17) \quad g_{exp} = \frac{4\pi^2}{a_2} \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}\right]$$

ומכאן נקבל כי השגיאה של תאוצת הכובד שתחושב ע"פ הנוסחה לשגיאה עקיפה²⁰ היא -

$$(18) \quad \Delta g_{exp} = \frac{4\pi^2}{a_2^2} \cdot \Delta a_2 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}\right]$$

את רדיוס ההתמד נוכל לחשב ע"פ נוסחה (5), נוכל לחלץ את נוסחה זו בעזרת הקשר שבין המקדמים a_2, a_1 כך ש-

$$(19) \quad \kappa = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} [\text{cm}]$$

¹⁴ ע"פ הערה 1.

¹⁵ ע"פ הערה 3.

¹⁶ ע"פ הערה 1.

¹⁷ ע"פ הערה 3.

¹⁸ ע"פ הערה 3.

¹⁹ **שקופית 53** – מצגת עיבוד נתונים – חישוב מדד טיב התאמה.

²⁰ ע"פ הערה 3.

ומכאן נקבל כי ע"י חישוב של שגיאה עקיפה²¹ נוכל לקבל את שגיאת רדיוס ההתמד

$$\Delta\kappa = \sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{2\sqrt{a_1 a_2}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{a_1} \Delta a_2}{2(a_2)^{\frac{3}{2}}}\right)^2} \quad (20)$$

גם עבור גודל זה נחשב מדד טיב התאמה N_σ^{22} .
בנוסף עבור כלל הגדלים אשר חישובנו נחשב שגיאה יחסית²³

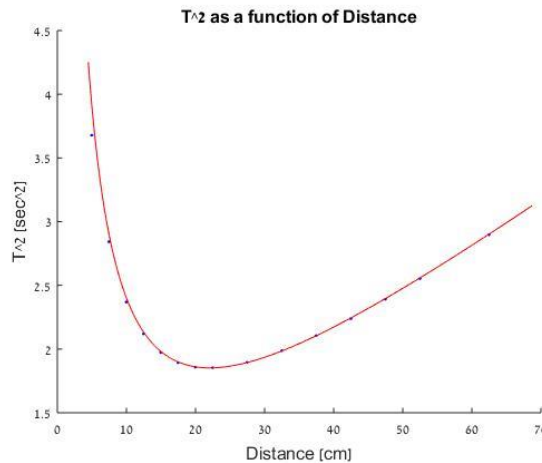
תוצאות הניסוי

חישובים שבוצעו-

עפ"י נוסחה (7) המסה הכוללת ושגיאתה היא $m_{tot} = 3100.40 \pm 0.17 [gram]$
אורך המוט (נמדד על ידי הסרגל) - $L_{rod} = 100.000 \pm 0.029 [cm]$
בנוסף נמדד קוטר המשקולת $weight_{diameter} = 7.99300 \pm 0.00029 [cm]$
ומנוסחה (9) קיבלנו $weight_{radius} = 3.99650 \pm 0.00014 [cm]$
המרחק ממרכז המסה של המוט חושב מנוסחה (11) - $A_{center} = 22.47 \pm 0.22 [cm]$
המרחק ממרכז המסה של המשקולת חושב מנוסחה (12) - $B_{center} = 11.47 \pm 0.26 [cm]$
את מומנט ההתמד חישובנו מנוסחות (6) ו (13) - $I_0 = 1630000 \pm 10000 [cm^2 * gram]$

משתנה	ערך	יחידות
a_1	21.12 ± 0.25	$sec^2 * cm$
$\frac{\Delta a_1}{a_1}$	1.18	%
a_2	0.0406 ± 0.0020	$\frac{sec^2}{cm}$
$\frac{\Delta a_2}{a_2}$	0.49	%
a_3	0.75 ± 0.20	cm
$\frac{\Delta a_3}{a_3}$	26.6	%
X_{red}^2	1.1	
P_{prob}	0.33	

טבלה 1- נתונים עבור ההתאמה



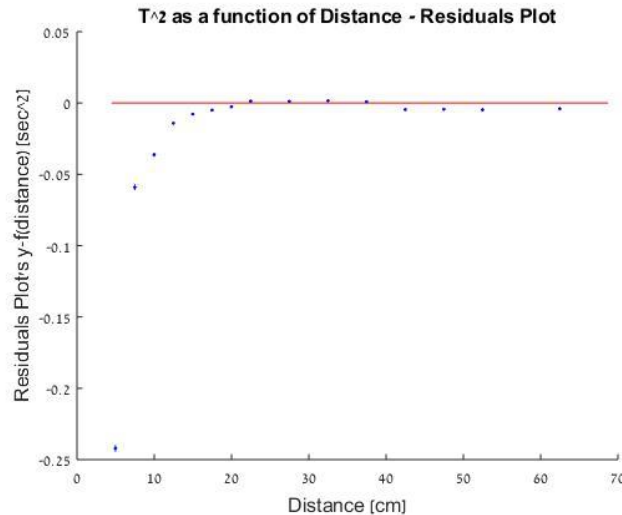
איור 2 - התאמה לפי נוסחה (15)-זמן המחזור בריבוע כפונקציה של מרחק נקודת התלייה ממרכז המסה

- ניתן לראות שקיבלנו ערך X_{red}^2 בטווח (1) ובהתאמה גם P_{prob} נמצא בטווח $[0.05, 0.95]$.
- נבחין כי השגיאה היחסית עבור a_1 ו a_2 קטנות מ 10 אחוז. השגיאה היחסית של a_3 גדולה מ 10 אחוז, נרחיב על כך בדיון ומסקנות
- ניתן לראות שלגרף אכן יש את ההתאמה שציפינו לקבל

²¹ ע"פ הערה 3.

²² ע"פ הערה 19.

²³ נוסחה 1.1 – בחוברת עיבוד נתונים – חישוב שגיאה יחסית.



איור 3- גרף שארים עבור ההתאמה של זמן המחזור בריבוע כפונקציה של מרחק נקודת התלייה ממרכז המסה

ניתן לראות שב 6 הנקודות השמאליות יש מגמה היפרבולית שלילית אך ביתר הנקודות יש רנדומליות. כמו כן הערכת השגיאות קטנה. נרחיב על הגרף בדיון ומסקנות.

לאחר ביצוע ההתאמה נוכל לחלץ את הנתונים הבאים-

את רדיוס ההתמד נחשב מנוסחאות (19) ו (20) $k_{exp} = 22.80 \pm 0.58 [cm]$

את רדיוס ההתמד התיאורטי נחשב מנוסחאות (5) ו (14) $k_{theo} = 22.92 \pm 0.81 [cm]$

את תאוצת הכובד נחשב מנוסחה (17) $g_{exp} = 972 \pm 48 [\frac{cm}{sec^2}]$

מדד טיב ההתאמה בין k_{theo} לבין k_{exp} יהיה²⁴ $N\sigma = 0.12$. ניתן לראות שערך זה נמצא בטווח (קטן מ 3)

מדד טיב ההתאמה בין g_{theo} לבין²⁵ g_{exp} יהיה²⁶ $N\sigma = 0.18$. ניתן לראות שערך זה נמצא בטווח (קטן מ 3) השגיאות היחסיות לגדלים שחולצו מן ההתאמות יהיו:

$$\frac{\Delta k_{fit}}{k_{fit}} = 2.5\%, \frac{\Delta g_{fit}}{g_{fit}} = 4.9\%$$

השגיאות היחסיות של הגדלים התיאורטיים:

$$\frac{\Delta k_{theo}}{k_{theo}} = 7.3\%$$

דיון ומסקנות

בניסוי זה רצינו לאמת את המודל התיאורטי של מטוטלת פיזיקלית ולמצוא את רדיוס ההתמד של המטוטלת ואת תאוצת הכובד. עבור ההתאמה שביצענו קיבלנו גרף המתאים לפונקציה המתארת את המטוטלת הפיזיקלית. קיבלנו נקודת מינימום אשר מהווה את השינוי ממגמה היפרבולית למגמה לינארית. קיבלנו ש X_{red}^2 ו P_{prob} נמצאים בטווח הרצוי וגם השגיאות היחסיות של a_1 ו a_2 יצאו בטווח. לעומת זאת השגיאה היחסיות של a_3 יצאה גדולה מ 10 אחוז. a_3 מגלם בתוכו את השגיאות השיטתיות לאור העובדה שערכו אינו 0 נוכל להסיק כי הכיל בתוכו את השגיאות ותרים להתאמה טובה יותר.

השגיאות היחסיות עבור K, g הינם בטווח הרצוי ולכן מעידות על התאמה איכותית. בחיזוק לכך גם מדדי טיב ההתאמה $N\sigma$ עבור K, g הינם בטווח התקין ומעידים על התאמה איכותית.

בגרף השארים ניתן לראות כי 6 הנקודות השמאליות נמצאות מתחת לגרף במרחק שהולך וגדל ככל שמתרחקים שמאלה. את המרחק מן הגרף ניתן להסביר כי גרף השארים מושפע ממרחק הנקודות בגרף מציר ה X ומציר ה Y, כיוון שבציר ה X הנקודות ממש קרובות לגרף לעומת ציר ה Y שם מרחקם מקו ההתאמה גדול מאוד, דבר זה מתבטא בצורה קיצונית בחלקו של המגמה ההיפרבולית משום שהשיפוע בחלק זה הינו גדול מאוד ולכן מרחקם של נקודות אלו אינו חריג, מנגד נבחין כי כלל הנקודות נמצאות מתחת לגרף ולכן כן קיימת מגמתיות כלשהי.

²⁴ עפ"י שקף 53 במצגת עיבוד הנתונים

²⁵ ערכו נמצא בעיבוד הנתונים

²⁶ עפ"י שקף 53 במצגת עיבוד הנתונים

גורמי השגיאה בניסוי-

- סטייה בזווית- בכל מדידה בה שחררנו את המטוטלת זווית השחרור השתנתה במקצת. דבר אשר השפיע על זמן המחזור ובכך פגע בהתאמה.
- כוח חיצוני- בחלק מן המדידות המטוטלת שוחררה עם מהירות התחלתית אותה הקנה הנסיין. דבר אשר השפיע על המודל התיאורטי ובכך פגע בהתאמה.

הצעות לשיפור הניסוי-

- מנגנון שחרור אוטומטי יטפל בשתי השגיאות שצוינו מקודם, בכך שיקבע נקודת שחרור קבועה וללא כוחות חיצוניים

לסיכום, אנו סבורים שעמדנו במטרות הניסוי והגענו לתוצאות משביעות רצון הן מבחינת ההתאמה והן מבחינת חילוף רדיוס ההתמד ותאוצת הכובד.

שאלת מדריך – במרכז המסה ($0=L$) $T \rightarrow \infty$. אם ניתן למטוטלת דחיפה במצב זה האם היא תבצע תנועה? אם כן, איזו?

במצב בו מערכת תלויה על מרכז המסה היא נמצאת בשיווי משקל תמידי. הוזה או סיבוב של המערכת סביב ציר התליה לא תשנה את מיקום מרכז המסה ולא יופעל שום כוח שיאלץ להחזיר את המסה לשיווי משקל. במצב שכזה ניתן להגיד שלא תבצע תנועה מחזורית.

נספחים

שגיאת סרגל(ס"מ) L	שגיאת מכשיר ΔTinst (s)	שגיאת סטטיסטית(ΔTstat (s)	שגיאת כוללת (s)	ΔT/T	T ² [s ²]	2TΔT [s ²]
62.5	40.0	0.028868	1.703	1.702	1.702	1.703
52.5	30.0	0.028868	1.598	1.597	1.598	1.599
42.5	20.0	0.028868	1.496	1.498	1.496	1.497
32.5	10.0	0.028868	1.409	1.409	1.409	1.410
22.5	0.0	0.028868	1.361	1.362	1.362	1.361
17.5	-5.0	0.028868	1.376	1.376	1.376	1.377
15.0	-7.5	0.028868	1.405	1.405	1.405	1.406
12.5	-10.0	0.028868	1.456	1.456	1.457	1.455
10.0	-12.5	0.028868	1.539	1.541	1.539	1.539
7.5	-15.0	0.028868	1.688	1.687	1.686	1.687
5.0	-17.5	0.028868	1.919	1.920	1.919	1.918
20.0	-2.5	0.028868	1.363	1.362	1.363	1.363
27.5	5.0	0.028868	1.377	1.376	1.377	1.377
37.5	15.0	0.028868	1.451	1.450	1.451	1.452
47.5	25.0	0.028868	1.546	1.546	1.547	1.547

טבלה 3 – תוצאות המדידות

שגיאת מכשיר ΔTinst (s)	שגיאת סטטיסטית(ΔTstat (s)	שגיאת כוללת (s)	ΔT/T	T ² [s ²]	2TΔT [s ²]
1.70	0.00029	0.00023	0.00037	0.02%	2.90
1.60	0.00029	0.00030	0.00041	0.03%	2.55
1.50	0.00029	0.00026	0.00039	0.03%	2.24
1.41	0.00029	0.00018	0.00034	0.02%	1.99
1.36	0.00029	0.00019	0.00035	0.03%	1.85
1.38	0.00029	0.00013	0.00031	0.02%	1.89
1.40	0.00029	0.00023	0.00037	0.03%	1.97
1.46	0.00029	0.00030	0.00041	0.03%	2.12
1.54	0.00029	0.00035	0.00045	0.03%	2.37
1.69	0.00029	0.00052	0.00059	0.04%	2.84
1.92	0.00029	0.00053	0.00061	0.03%	3.68
1.36	0.00029	0.00019	0.00035	0.03%	1.86
1.38	0.00029	0.00016	0.00033	0.02%	1.90
1.45	0.00029	0.00033	0.00044	0.03%	2.11
1.55	0.00029	0.00019	0.00035	0.02%	2.39

טבלה 4 – חישובים עבור
ההתאמה

L(cm)	ΔL (cm)	$T^2[s^2]$	$2T\Delta T [s^2]$
62.475	0.22	2.9	0.0012
52.475	0.22	2.6	0.0013
42.475	0.22	2.2	0.0012
32.475	0.22	2.0	0.0010
22.475	0.22	1.9	0.0009
17.475	0.22	1.9	0.0009
14.975	0.22	2.0	0.0010
12.475	0.22	2.1	0.0012
9.975	0.22	2.4	0.0014
7.475	0.22	2.8	0.0020
4.975	0.22	3.7	0.0023
19.975	0.22	1.9	0.0009
27.475	0.22	1.9	0.0009
37.475	0.22	2.1	0.0013
47.475	0.22	2.4	0.0011

טבלה 5- נתונים להתאמה במטלב