**חיכוך ואנרגיה**

**מטרת הניסוי:** לחקור את המצב בו אנרגיה פוטנציאלית עוברת לאנרגיה קינטית ולמדוד מעבר זה. על סמך מדידות אלו נרצה לאמת את עקרון שימור האנרגיה.

רקע תאורטי:

חלק I: נרצה לאמת את עקרון שימור האנרגיה על ידי חקירת המעבר בין אנרגיה פוטנציאלית כובדית לאנרגיה קינטית, לכן, נשתמש במשוואת שימור האנרגיה:

(1)

(2)

(3)

כאשר:

- הגובה ביחס לגוף ה- במצב ה- .

- המהירות ביחס לגוף ה- במצב ה- .

– מסת העגלה

- מסת המשקולת והמתלה שלה.

– גודל תאוצת הנפילה החופשית על כדור הארץ.

ונרצה לקבל תוצאות שיתאמו את התוצאות התיאורטיות בקירוב.

חלק II: נרצה לאמת את עקרון שימור האנרגיה על ידי חקירת המעבר בין אנרגיה פוטנציאלית אלסטית לאנרגיה קינטית, לכן, נשתמש במשוואת שימור האנרגיה:

(4)

(5)

(6)

כאשר:

- הגובה ביחס לגוף ה- במצב ה- .

- המהירות ביחס לגוף ה- במצב ה- .

– מסת העגלה

– גודל תאוצת הנפילה החופשית על כדור הארץ.

- גודל קבוע הקפיץ.

– השינוי באורך הקפיץ במצב ה- .

ונרצה לקבל תוצאות שיתאמו את התוצאות התיאורטיות בקירוב.

רשימת ציוד:

* מסלול אלומיניום באורך 222 ס"מ.
* שתי עגלות התנגשות וגדר אופטית.
* סט משקולות לעגלות.
* שני מתאמים לחישנים.
* שני שערים אופטיים ומעמדים.
* מגדל העברת אנרגיה.
* שלוש גלגלות.
* סט משקולות.
* חוט.
* קפיץ שיגור, מעמד ומעמד כיול.
* בולם.
* פלס.

מהלך הניסוי:

1. כיול המערכת
   1. ראשית נרצה לכייל את ה**שערים האופטיים**. השערים האופטיים מודדים, ביחס לזמן, כמה פעמים הופיעה הדפוס החוסם את קרן הלייזר (לפי מספר השנתות על הסרגל האופטי שברשותנו). נניח כי גודל כל שנתה קבוע, ונמדוד את אורכו של הסרגל כולו () ונחלק במספר השנתות (12). בצורה זו נצמצם את שגיאת המדידה (אם היינו מודדים כל שנת באמצעות סרגל אז לכל מדידה הייתה שגיאת מכשיר זהה, ולכן אוסף תוצאות מדידת השנתות ושגיאותיהן היה יוצא גדול משגיאת מכשיר אחת). כעת קיבלנו את אורכה של כל שנת (ואת שגיאת המכשיר ).

(7)

היות ואנחנו לא יודעים מה אורכה האמיתי של השנת, אלא רק טווח של אורכים ולכן יש סיכוי זהה שהגודל האמיתי הוא כל תוצאה בטווח, עד כדי דיוק הסרגל ולכן ניתן להניח שזו התפלגות אחידה.

* 1. כעת נכייל את ה**חיכוך במסלול**. החיכוך במסלול אומנם מינימאלי, אך עדין קיים. לכן נקזז אותו על ידי הוספת שיפוע קטן מאוד (עם כיוון תנועת העגלה) למסילה, וכך לנצל את כוח המשיכה של כדור הארץ כך שיקטין[[1]](#footnote-1) עוד יותר את השפעת כוח החיכוך. על מנת להגיע לכיול אופטימאלי, נשתמש בשערים האופטיים. נמקם את שני השערים במרחק גדול (ככל הניתן) אחד מהשני ונפעיל על העגלה כוח, כך שתתקבל מהירות התחלתית ונפסיק להפעיל כוח לפני הגעתה לשער האופטי הראשון. כל שער אופטי מודד את מיקום הגוף, ברגע חתיכת הלייזר, ואת הזמן שבו הלייזר נחתך. התוכנה מציגה נקודות פיזור של המיקום כתלות בזמן. לאחר מכן נחשב את שיפוע הגרף שהתקבל בתוכנת הData Studio ולפי הנוסחה:

(8)

כאשר:

– המרחק שעברה העגלה.

– מהירות העגלה.

*– זמן תנועת העגלה.*

נגלה כי שיפוע הגרף הוא מהירות הגוף אותה רצינו למצוא. בשלב זה של תנועת העגלה, לא פועלים עליה כוחות נוספים לאורך המסלול (הציר המקביל לשולחן) פרט לכוח החיכוך. כאשר תגיע העגלה לשער האופטי השני נראה את ההבדל במהירותה, שהושפעה מכוח החיכוך שפעל נגד כיוון תנועתה. נסתכל על ההבדל במהירות ונשאף להבדל מינימאלי של לא יותר מ- .

* 1. לבסוף, נרצה שלא יהיה שיפוע (על מישור המסילה, אנכית למסלול תנועת העגלה) בין צדדיו של המסלול על מנת שלא יהיה רכיב של כוח כלשהו בכיוון זה. נמקם פלס על מישור המסילה כך שיהיה אנך למסלול תנועת העגלה ובמידת הצורך נקטין את גובה הרגל הגבוהה עד שבועת האוויר בפלס תהיה בדיוק בין שני הפסים. נבדוק האם ההבדל במהירות בין שני השערים האופטיים נשאר כפי שרצינו ובמידה והשתנה נחזר על שלב II ו- III.
  2. נרצה למצוא את **קבוע הקפיץ** על מנת שנוכל לחשב את האנרגיה הפוטנציאלית האגורה בקפיץ: , כאשר הגדלים המופיעים הם הגדלים שהוגדרו ברקע התיאורטי (חלק II).

נזכור כי על פי חוק הוק:

(9)

נמקם את הקפיץ כך שיהיה אנך לשולחן ונטלה עליו משקולות, כל פעם משקל אחר בצורה זו נוכל לראות את השינוי בהתארכות הקפיץ () (טבלה א'). מכיוון שהקפיץ מאונך לשולחן, הכוחות הפועלים עליו הם רק לאורך ציר ה- (הציר שמאונך למישור כדור הארץ).

כלומר, הכוח שמפעיל הקפיץ מתנגד לכוח המשיכה של כדור הארץ ) ומכיוון שהמשקולות לא נעות, שקול הכוחות הוא:

(10)

וממשוואות 9 ו- 10 נגיע למשוואה:

(11)

אם נבנה גרף של כפונקציה של נמצא כי שיפוע הגרף הוא קבוע הקפיץ.

1. חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית כובדית לאנרגיה קינטית (ראה רקע תיאורטי חלק I):

נבנה מערכת של עגלה ומשקולת, ונבחר את השולחן להיות מישור הייחוס, אשר מוצב כך שהעגלה נעה על גבי מסילה בעלת שיפוע זניח כך שהיא לא משנה את גובהה ביחס למישור הייחוס (). נחבר את העגלה לחוט כך שבקצהו השני תהיה תלויה משקולת (בעזרת גלגלות שנניח שהן אידיאליות נשנה את כיוון פעולת הכוח, כך שעל המשקולת יפעל רק כוח הכבידה, שייתן לנו את האנרגיה הפוטנציאלית). נקבע שהעגלה והמשקולת יתחילו את תנועתן ממנוחה (). רגע לפני שהמשקולת פוגעת בשולחן המרחק בינה לבין השולחן שואף לאפס () ומהירות המשקולת שווה למהירות העגלה (). בתחילת כל מדידה נמדוד את הגובה שממנו אנו משחררים את המשקולת (טבלה ב'). נעשה זאת על ידי מדידת המקום ממנו נשחרר את העגלה פחות מקומה ההתחלתי (מקומה ההתחלתי של העגלה הוא ברגע בו החוט מתוח אך המשקולת לא באוויר). השער האופטי ימדוד עבורנו את מיקום העגלה בכל רגע, וייתן בנוסף את הזמן שבו הייתה במיקום זה. שוב נחשב את שיפוע הגרף בכדי לקבל את מהירות העגלה.

1. חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית אלסטית לאנרגיה קינטית (ראה רקע תיאורטי חלק II):

* נשתמש במערכת שהוגדרה בסעיף 2. נבחר את המסילה להיות מישור הייחוס. לכן, גובה העגלה יהיה: (). כעת נקבע את הקפיץ כך שכיוון הכוח אותו הוא מפעיל יהיה מקביל למסילה. נכווץ את הקפיץ בשיעור של ונקבע את מצבו המכווץ ונצמיד את העגלה לראש הקפיץ. לאחר שחרור הקפיץ ממצבו המכווץ נרצה שכל האנרגיה הפוטנציאלית של הקפיץ תומר לאנרגיה הקינטית של העגלה ולכן: (). נקבע שהעגלה תתחיל את תנועתה ממנוחה ().
* נמדוד את מידת ההתכווצות של הקפיץ () (טבלה ג'). נקרב את העגלה כך שתיגע בקפיץ ונשחרר את המחסום. השער האופטי ימדוד עבורנו את מהירות העגלה.

היות והשעון תמיד מעגל כלפי מטה אנחנו לא יודעים מה הזמן האמיתי, ולכן יש סיכוי זהה שהזמן האמיתי הוא כל תוצאה בטווח שבין התוצאה שהציג השעון לתוצאה שאחריה, עד דיוק השעון ולכן ניתן להניח שזו התפלגות אחידה.

תכנון עיבוד תוצאות הניסוי:

מציאת קבוע הקפיץ. נרצה לוודא כי המשקל הרשום על המשקולות () הוא אכן משקלן. נשקול את המשקולת ונגלה כי משקלה האמיתי הוא חצי גרם פחות מהרשום ולכן:

(12)

*כמו-כן, ישנה את שגיאת המכשיר בו השתמשנו כדי לשקול את המשקולת. ניתן להניח כי מכשיר זה מעגל כלפי מטה את התוצאה אותה הוא מציג. המכשיר מדייק עד . לכן, שגיאת המכשיר היא:*

(13)

*התוצאה הסופית היא:*

(14)

*מכיוון שמדדנו את התארכות הקפיץ () בעזרת סרגל, קיימת שגיאה של המכשיר:*

(15)

*נציג את הנתונים של נוסחאות (14) ו- (15) בטבלה ד'.*

חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית כובדית לאנרגיה קינטית:

* נציב במשוואה 3 את הנתונים ממהלך הניסוי ונקבל:

(16)

(17)

ניתן לראות כי קיבלנו משוואה של כתלות ב- (או ) מכיוון שהביטוי אינו משתנה.

* כאשר מדדנו את השינוי בגובה המשקולת (המיקום של העגלה ביחס למיקומה ההתחלתי) השתמשנו בסרגל ולכן קיימת שגיאה של המכשיר (נוסחה 15). לפיכך נציג את תוצאות טבלה ג' ביחד עם השגיאה בטבלה ה'.
* לפי המהירות (ראה מהלך הניסוי חלק I) נחשב גם את ריבוע המהירות וכך נוכל לבנות גרף של כתלות ב- וגרף של כתלות ב- (נוסחה 17). על מנת לחשב את השגיאה יש לחשבה לפי נגזרת חלקית של פונקציה, כלומר לפי:

(18)

כך שבמקרה שלנו: . את התוצאות של חלק זה בניסוי ניתן לראות בטבלה ו.

חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית אלסטית לאנרגיה קינטית:

* נציב במשוואה (3) את הנתונים ממהלך הניסוי ונקבל:

(19)

(20)

ניתן לראות כי קיבלנו משוואה של כתלות ב-  מכיוון שהביטוי אינו משתנה.

* כאשר מדדנו את התארכות הקפיץ () השתמשנו בסרגל ולכן קיימת שגיאה של המכשיר (נוסחה 15), נוסיף לתוצאות טבלה ג' את השגיאה ונציג בטבלה ז'.
* נחשב את מהירות העגלה (ראה מהלך ניסוי, כיול המערכת חלק II). נרצה לבנות גרף של כתלות ב- שייצג את נוסחה 20.

**עיבוד תוצאות הניסוי:**

חלק I – כיול חיכוך המסלול:

בהנחה שהחיכוך זניח וסכום הכוחות הפועלים על העגלה מתאפס (מהלך הניסוי 1 – II) ,אמורה להתקבל בשני החיישנים אותה התוצאה, עד כדי שגיאה של .

לאחר ביצוע הניסוי, נייצא את התוצאות מתוכנת הData Studio כקובץ טקסט, נוסיף לקובץ זה שגיאות באופן ידני באופן הבא:

נשים לב כי השער מודד עד דיוק של . היות וניתן להניח שהשער מעגל את התוצאות כלפי מטה, זו התפלגות אחידה (ראה מהלך הניסוי 1 – I), ולכן השגיאה של הזמן היא:

(21)

השגיאה במיקום (משוואה 7) היא:

(22)

בעקבות כך קיבלנו את טבלאות ח' וט'.

נזין את התוצאות לתוכנת הMatlab. לאחר הרצת התוכנית קיבלנו את שני הגרפים הבאים:

|  |  |
| --- | --- |
| v1.jpg | v2.jpg |

גרפים 1,2: מיקום כתלות בזמן. הגרף השמאלי הוא הגרף של החיישן בסוף המסילה והגרף הימני הוא הגרף של החיישן בתחילת המסילה. כל גרף מייצג מקום כתלות בזמן, ולכן השיפוע הוא המהירות (משוואה (6)). נשים לב כי נקודת החיתוך של הגרף השמאלי עם הציר האנכי אינה בנקודה (0,0) מכיוון שבזמן t=0 מיקום העגלה לא היה בנקודה x2=0 אלא בנקודה x1=0 ולכן אחרי פרק זמן מסוים הגיעה העגלה למיקום x2=0. לפי תוצאת תוכנת הMatlab קיבלנו:

|  |  |
| --- | --- |
| (27) | (23) |
| (28) | (24) |
| (29) | (25) |
| (30) | (26) |

ניתן לראות שהמהירויות ו- מקיימות התנאי הנדרש כך ש:

*(31)*

לפי הנוסחה:

(32)

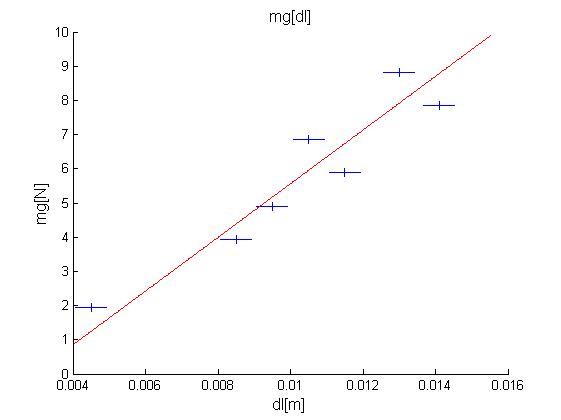
נציב בנוסחה ונקבל:

(33)

כפי שניתן לראות, למרות שהמהירויות מקיימות את התנאי הנדרש, עדיין ישנה סטייה של 152 סטיות תקן. הסיבה לשגיאה זו, היא גודלם הקטן מאוד של השגיאות של שתי המהירויות, ולכן מתקבל מספר מאוד גדול.

חלק II – מציאת קבוע הקפיץ

על מנת שנוכל לבצע את החלק השני של הניסוי המדבר על גלגול אנרגיה פוטנציאלית אלסטית לאנרגיה קינטית, אנו חייבים לדעת את קבוע הקפיץ שאיתו נעבוד. על מנת לחשב קבוע זה נבנה גרף של משקל המשקולות כתלות בהתארכות הקפיץ (נוסחה 11) כך שהגרף מייצג את המשוואה הנ"ל ו*שיפוע הגרף הוא קבוע הקפיץ - .*

**

*גרף מספר 3 – הכוח שמופעל על הקפיץ כתלות בהתארכות שלו. שיפוע הגרף הוא קבוע הקפיץ. לפי תוכנת Matlab קיבלנו:*

(34)

(35)

(36)

(37)

*חלק III – חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית כובדית לאנרגיה קינטית*

*על מנת שנוכל לבצע חלק זה בניסוי, יש לשקול את המשקולת עם המתלה שלה- ואת העגלה – .*

*לאחר שקילה לפי אותו משקל בו השתמשנו קודם (השגיאה אינה השתנתה) התקבל:*

*(38)*

*(39)*

*לפי הנוסחה:*

*(40)*

*יש לציין, כי בחלק זה בניסוי, השתמשנו בחיישן הראשון שהיה ממוקם בתחילת המסילה, ולכן שגיאת המכשיר המודד את המהירות היא:*

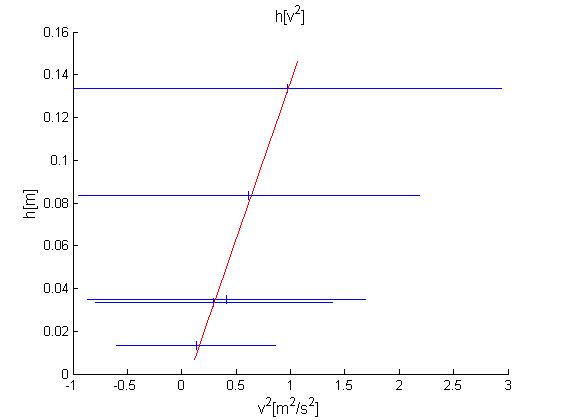
*(41)*

*ולכן השגיאה הכללית היא:*

(42)

*נבנה גרף ליניארי כלומר כפונקציה של*  *המייצג את משוואה (17) כך ששיפוע הגרף ייצג: .*

לאחר הזנת הנתונים המופיעים בטבלאות (ה') ו- (ו') התוצאות לתוכנת הMatlab והרצת התוכנה,

קיבלנו את הגרף הבא:

גרף מספר 4 – הגובה ההתחלתי של המשקולת כתלות במהירות העגלה בריבוע. שיפוע הגרף מייצג את הערך. נשים לב כי למרות השרטוט, הגרף אכן עובר בנקודה (0,0) בקירוב. לאחר הרצת תוכנת הMatlab קיבלנו:

(43)

(44)

(45)

(46)

ידוע שהשיפוע הוא:

(47)

הערך התיאורטי של קבוע זה הוא:

(48)

נשים לב, כי ערך תיאורטי זה הוא תלוי שני משתנים ו כאשר קבוע.

לכן, על מנת למצוא את שגיאתו של קבוע זה יש לגזור קבוע זה לפי נוסחה (18):

(49)

מכיוון ש:

(50)

נסמן גודל זה ב .

לאחר גזירה לפי משוואת (47) (49) ו- (50) קיבלנו:

*(51)*

*לאחר הצבת הנתונים לפי משוואת (38),(39) נקבל:*

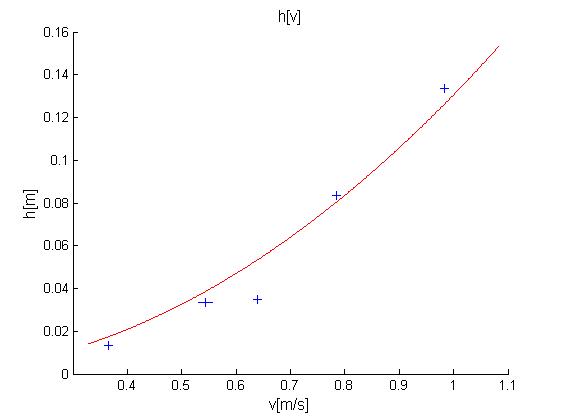
*(52)*

*כעת לפי נוסחה (32) נקבל:*

*(53)*

*כעת, נבנה גרף פרבולי כלומר כפונקציה של*  *המייצג את משוואה (17) כך שהמקדם של ייצג: .*

לאחר הזנת הנתונים המופיעים בטבלאות (ה') ו- (ו') התוצאות לתוכנת הMatlab והרצת התוכנה,

קיבלנו את הגרף הבא:

גרף מספר 5 – גובהה ההתחלתי של המשקולת כתלות במהירות העגלה. ניתן לראות שהגרף הוא פרבולי בקירוב, כצפוי לפי הרקע התיאורטי. לפי תוכנת הMatlab קיבלנו:

*(54)*

(55)

(56)

(57)

(58)

ניתן לראות שהמקדם של הוא המקדם של שחושב מקודם, והוא:

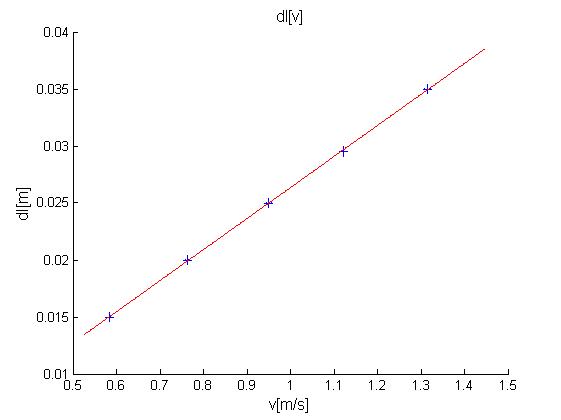
*(59)*

*לאחר הצבה של הנתונים בנוסחה (32) נקבל:*

*(60)*

*חלק IV – חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית אלסטית לאנרגיה קינטית*

*לאחר מציאת קבוע הקפיץ איתו נעבוד (עיבוד תוצאות הניסוי, חלק II) נוכל לחקור, לפי המשוואה שהוגדרה בחלק התיאורטי, את תלות האנרגיה הקינטית של העגלה באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הקפיץ. נרצה לבנות גרף שיחקור תלות זו. לפי משוואה (20), הגרף המתאים הוא גרף של כתלות ב-. הגרף הוא גרף ליניארי ולכן הוא פשוט יחסית לחקירה*. נאחד את נתוני טבלה (א') והשגיאה המופיעה בנוסחה (15), ואת נתוני המהירויות שנמדדו ושגיאותיהן (לפי נוסחה 27) לטבלה י'. לאחר הזמנת הטבלה לתוכנת הMatlab והרצת התוכנית, התקבל הגרף הבא:



גרף מספר 6 - התארכות הקפיץ כתלות במהירות העגלה - .לפי תוכנת הMatlab הנתונים שהתקבלו הם:

(61)

(62)

(63)

(64)

לפי הרקע התיאורטי, שיפוע הגרף הוא . לאחר הצבת הערכים לפי משוואות (34),(39) נקבל:

(65)

כפי שניתן לשים לב, גודל זה תלוי בשני פרמטרים - ו . לכן, על מנת לחשב את השגיאה של גודל זה, יש לחשב לפי נוסחה (18), ונקבל:

(66)

לאחר הצבת נתונים לפי משוואות (34),(39) נקבל:

(67)

נציב את הנתונים של משוואות (61),(65),(67) בנוסחה (32) ונקבל:

(68)

דיון בתוצאות (תום מלר):

אמתנו חוק שימור האנרגיה במעבר מאנרגיה פוטנציאלית לאנרגיה קינטית. הגענו לתוצאות שונות עבור התאמה לינארית והתאמה פרבולית (ראה חלק I חקירת מעבר מאנרגיה פוטנציאלית לאנרגיה קינטית). מדוע קיבלנו תוצאות שונות עבור התאמה פרבולית של ועבור התאמה לינארית של ? מכיוון שהשגיאה של היא שגיאה גדולה, ובנוסחת השגיאה מופיעה במכנה, אז ככל שהשגיאה גדולה יותר קטן יותר.

בנוסף, מכיוון שהקפיץ שבו השתמשנו היה "בעייתי" (התחכך בדפנות והיה לא יציב) ההתאמה לתוצאות במשוואה 36, () יצאה גדולה בהרבה מ- .

דיון בתוצאות (איתי פריצקי):

לאחר ביצוע הניסוי הגענו למסקנה כי אכן מתקיים חוק שימור האנרגיה במעבר מאנרגיה פוטנציאלית (כובדית או אלסטית) לאנרגיה קינטית, במערכת סגורה. ראינו שבחלק של כיול המערכת, כאשר רצינו ליצור מצב שהחיכוך זניח, התקבלה תוצאה של גדולה במיוחד. זאת מכיוון שאם נסתכל על איברי משוואה 33, נראה כי המכנה הוא מספר מאוד קטן, ולכן התוצאה גדולה מאוד. בחלק של הניסוי עצמו התקבלו תוצאות שונות לכל חלק. פעם יצא קטן מאוד, פעם גדול מאוד ופעם אחת באמצע. כמו בנימוק הקודם, ניתן להסביר זאת ע"י הסתכלות על המכנה במשוואות 53,60,68 ונראה שככל שהמכנה קטן יותר, גדול יותר.

**נספח א' – טבלאות ותוצאות של הניסוי "אנרגיה וחיכוך"**

טבלה (א'):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 1 | 0.2 | 0.0045 |
| 2 | 0.4 | 0.0085 |
| 3 | 0.5 | 0.0095 |
| 4 | 0.6 | 0.0115 |
| 5 | 0.7 | 0.0105 |
| 6 | 0.8 | 0.0140 |
| 7 | 0.9 | 0.0130 |

טבלה (ב'):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1 | 0.0135 |
| 2 | 0.0350 |
| 3 | 0.0835 |
| 4 | 0.1335 |
| 5 | 0.0335 |

טבלה (ג'):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1 | 0.0045 |
| 2 | 0.0085 |
| 3 | 0.0095 |
| 4 | 0.0115 |
| 5 | 0.0105 |
| 6 | 0.0140 |
| 7 | 0.0130 |

טבלה (ד'):

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 1 | 0.00450 |  | 0.1995 |  |
| 2 | 0.00850 |  | 0.3995 |  |
| 3 | 0.00950 |  | 0.4995 |  |
| 4 | 0.01150 |  | 0.5995 |  |
| 5 | 0.01050 |  | 0.6995 |  |
| 6 | 0.01400 |  | 0.7995 |  |
| 7 | 0.01300 |  | 0.8995 |  |

טבלה (ה'):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 1 | 0.01350 | 0.00042 |
| 2 | 0.03500 | 0.00042 |
| 3 | 0.08350 | 0.00042 |
| 4 | 0.13350 | 0.00042 |
| 5 | 0.03350 | 0.00042 |

טבלה (ו'):

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 1 | 0.13 | 0.73 | 0.3650 | 0.0038 |
| 2 | 0.41 | 1.28 | 0.6392 | 0.0012 |
| 3 | 0.61 | 1.57 | 0.7840 | 0.0035 |
| 4 | 0.97 | 1.97 | 0.9840 | 0.0008 |
| 5 | 0.30 | 1.09 | 0.5442 | 0.0140 |

טבלה (ז'):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 1 | 0.0045 | 0.00042 |
| 2 | 0.0085 | 0.00042 |
| 3 | 0.0095 | 0.00042 |
| 4 | 0.0115 | 0.00042 |
| 5 | 0.0105 | 0.00042 |
| 6 | 0.0140 | 0.00042 |
| 7 | 0.0130 | 0.00042 |

טבלה (ח'):

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  | 0 |  | 0 |
|  | 0.0145 |  | 0.039064 |
|  | 0.0285 |  | 0.077318 |
|  | 0.0425 |  | 0.115826 |
|  | 0.0565 |  | 0.15444 |
|  | 0.075 |  | 0.193268 |
|  | 0.0845 |  | 0.232086 |
|  | 0.0985 |  | 0.271044 |
|  | 0.1125 |  | 0.309916 |
|  | 0.1265 |  | 0.348428 |
|  | 0.145 |  | 0.386914 |
|  | 0.1545 |  | 0.425442 |
|  | 0.1685 |  | 0.464032 |

טבלה (ט'):

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  | 0 |  | 3.019922 |
|  | 0.014 |  | 3.058322 |
|  | 0.028 |  | 3.096132 |
|  | 0.042 |  | 3.134552 |
|  | 0.056 |  | 3.172796 |
|  | 0.07 |  | 3.210964 |
|  | 0.084 |  | 3.24892 |
|  | 0.098 |  | 3.286918 |
|  | 0.112 |  | 3.324782 |
|  | 0.126 |  | 3.362914 |
|  | 0.14 |  | 3.401198 |
|  | 0.154 |  | 3.43953 |
|  | 0.168 |  | 3.477624 |

טבלה (י'):

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 1 | 0.03500 | 0.00042 | 1.3150 | 0.0076 |
| 2 | 0.02950 | 0.00042 | 1.1217 | 0.0095 |
| 3 | 0.02500 | 0.00042 | 0.9499 | 0.0055 |
| 4 | 0.02000 | 0.00042 | 0.7624 | 0.0027 |
| 5 | 0.01500 | 0.00042 | 0.5850 | 0.0017 |
| 6 | 0.03500 | 0.00042 | 1.3150 | 0.0076 |
| 7 | 0.02950 | 0.00042 | 1.1217 | 0.0095 |

1. חשוב לציין כי לא ניתן לבטל לגמרי את השפעת החיכוך מכיוון שעל כל גוף אשר נע על משטח פועל כוח חיכוך בניגוד

   לכיוון תנועתו. [↑](#footnote-ref-1)