**חיכוך ואנרגיה**

**מטרת הניסוי:**

1. 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)

(3)

ונרצה לקבל תוצאות שיתאמו את התוצאות התיאורטיות בקירוב.

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 (). נקבע שהעגלה והמשקולת יתחילו את תנועתן ממנוחה (). רגע לפני שהמשקולת פוגעת בשולחן המרחק בינה לבין השולחן שואף לאפס () ומהירות המשקולת שווה למהירות העגלה (), כאשר הגדרנו:

- המשתנה ביחס לגוף ה- במצב ה- .

– מסת העגלה

- מסת המשקולת והמתלה שלה.

לאחר הצבה של הנתונים הנ"ל במשוואה (1) נקבל:

(4)

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

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

(5)

(6)

(7)

ונרצה לקבל תוצאות שיתאמו את התוצאות התיאורטיות בקירוב.

נשתמש במערכת שבנינו בחלק I של הניסוי. 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 ().

לאחר הצבה של הנתונים הנ"ל במשוואה (7) נקבל:

(8)

ניתן לראות כי קיבלנו משוואה של כתלות ב-  מכיוון שהביטוי אינו משתנה.  
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 (). בצורה זו נצמצם את שגיאת המדידה (מדידת כל שנת בנפרד גוררת שגיאת מכשיר גדולה). כעת נחלק את אורכו של הסרגל במספר השנתות ונקבל את אורכה של כל שנת (ואת שגיאת המכשיר).

(9)

* 1. כעת נכייל את ה**חיכוך במסלול**. החיכוך במסלול אומנם מינימאלי, אך עדין קיים. לכן נקזז אותו על ידי הוספת שיפוע קטן מאוד 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:

(10)

נגלה כי שיפוע הגרף היא מהירות הגוף אותה רצינו למצוא. בשלב זה של תנועתה, לא פועלים על העגלה כוחות נוספים לאורך המסלול (ציר מקביל לשולחן) פרט לכוח החיכוך. כאשר תגיע העגלה לשער האופטי השני נראה את ההבדל במהירותה, שהושפעה מכוח החיכוך שפעל נגד כיוון תנועתה. נקטין את גובה המסלול בסוף המסלול שעוברת העגלה ובכך נפעיל כוח קטן[[2]](#footnote-2) אשר "ידחוף" את העגלה. נסתכל על ההבדל במהירות ונשאף להבדל מינימאלי של לא יותר מ- .

* 1. לבסוף, נרצה שלא יהיה שיפוע בין צדדיו של המסלול. נמקם פלס כך שיהיה אנך למסלול ונקטין את גובה הרגל הגבוהה עד שבועה 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 (). נזכור כי חוק הוק אומר כי:

(11)

נמקם את הקפיץ כך שיהיה אנך לשולחן ונטלה עליו משקולות, כל פעם משקל אחר (טבלה א'). בצורה זו נוכל לראות את השינוי בהתארכות הקפיץ () (טבלה ב'). 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 אפס (). לבסוף, נגיע למשוואת שקול הכוחות הפועלים על המשקולות:

(12)

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

1. חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית כובדית לאנרגיה קינטית. 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.). בתחילת כל מדידה נמדוד את הגובה שממנו אנו משחררים את המשקולת (טבלה ג'). נעשה זאת על ידי מדידת המקום ממנו נשחרר את העגלה פחות מקומה ההתחלתי (מקומה ההתחלתי של העגלה הוא ברגע בו החוט מתוח אך המשקולת לע באוויר). השער האופטי ימדוד עבורנו את מיקום העגלה בכל רגע, וייתן בנוסף את הזמן שבו הייתה במיקום זה, ושוב נחשב את שיפוע הגרף בכדי לקבל את מהירות העגלה ולפי מהירות זו נחשב גם את ריבוע המהירות (טבלה ד') וכך נוכל לבנות גרף של כתלות ב- וגרף של כתלות ב- (נוסחה 2).
2. חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית אלסטית לאנרגיה קינטית. נמקם את הקפיץ כך שיהיה מקביל למסלול. נמתח את הקפיץ ונקבע את המתיחה בעזרת מחסום ("נטען" את הקפיץ באנרגיה). נמדוד את מידת ההתארכות של הקפיץ () (טבלה ה'). נקרב את העגלה כך שתיגע בקפיץ ונשחרר את המחסום. השער האופטי ימדוד עבורנו את מהירות העגלה ואנו נחשב את ריבוע המהירות (טבלה ו'). נשתמש בקבוע הקפיץ שמצאנו (נוסחה 6) ונבנה גרף של כתלות ב- (נוסחה 4).

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:

(13)

*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:*

(14)

*התוצאה הסופית היא:*

(11)

*לפיכך, נתקן את תוצאות טבלה א' (טבלה ז').*

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

(15)

*לפיכך נתקן את תוצאות טבלה ב' (טבלה ח').*

חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית כובדית לאנרגיה קינטית. כאשר מדדנו את גובה המשקולת מהשולחן השתמשנו בסרגל ולכן קיימת שגיאה של המכשיר (נוסחה 15). לפיכך נתקן את תוצאות טבלה ג' (טבלה ט').

חקירת מעבר אנרגיה פוטנציאלית אלסטית לאנרגיה קינטית. כאשר מדדנו את התארכות הקפיץ () השתמשנו בסרגל ולכן קיימת שגיאה של המכשיר (נוסחה 15), לפיכך נתקן את תוצאות טבלה ה' (טבלה י')**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, ולכן השגיאה של הזמן היא:

*(16)*

השגיאה במיקום לפי משוואה (9) היא:

(17)

בעקבות כך קיבלנו את טבלה (יא').

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:

|  |  |
| --- | --- |
| (22) | (18) |
| (23) | (19) |
| (24) | (20) |
| (25) | (21) |

ניתן לראות שהמהירויות ו- מקיימות התנאי הנדרש כך ש:

*(26)*

לפי הנוסחה:

(27)

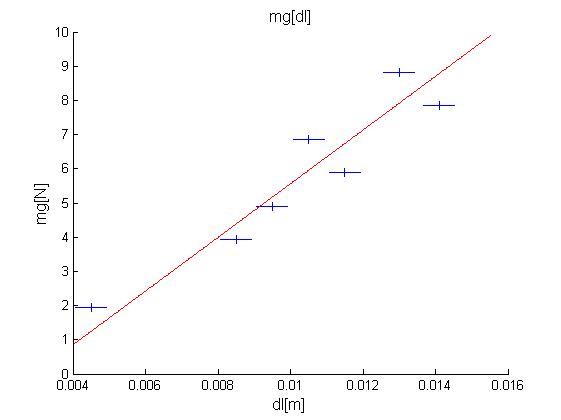
נציב בנוסחה ונקבל:

(28)

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 (8) 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:*

(29)

(30)

(31)

(32)

*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:*

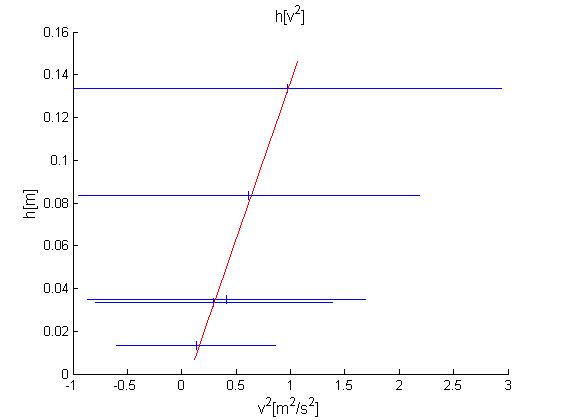
*(33)*

*(34)*

*נבנה גרף ליניארי כלומר כפונקציה של*  *המייצג את משוואה (4) כך ששיפוע הגרף ייצג: .* נשים לב כי אנו מדדנו את המהירות . על מנת לחשב את נעלה כל ערך ממוצע של בריבוע. על מנת לחשב את השגיאה, יש לחשבה לפי נגזרת חלקית של פונקציה, כלומר לפי:

(35)

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

לאחר הזנת 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:

(36)

(37)

(38)

(39)

ידוע שהשיפוע הוא . הערך התיאורטי של קבוע זה הוא:

(40)

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 (35):

(41)

מכיוון ש:

(42)

נסמן גודל זה ב .

לאחר גזירה לפי משוואת (29),(30) קיבלנו:

*(43)*

*לאחר הצבת הנתונים לפי משוואת (34),(33) נקבל:*

*(44)*

*כעת לפי נוסחה (27) נקבל:*

*(45)*

*כעת, נבנה גרף פרבולי כלומר כפונקציה של*  *המייצג את משוואה (4) כך שהמקדם של ייצג: . יש לציין, כי בחלק זה בניסוי, השתמשנו בחיישן הראשון שהיה ממוקם בתחילת המסילה, ולכן שגיאת המכשיר המודד את המהירות היא:*

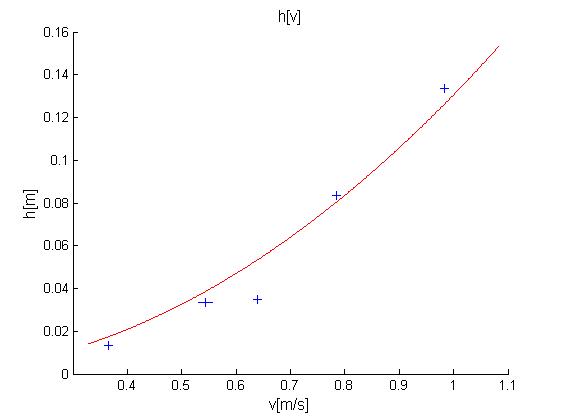
*(46)*

*לפי הנוסחאות:*

*(47)*

(48)

הנתונים והצבתם בנוסחאות הנ"ל מופיעים בטבלה יג.

לאחר בניית גרף לפי הנתונים הנ"ל קיבלנו:

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

*(49)*

(50)

(51)

(52)

(53)

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

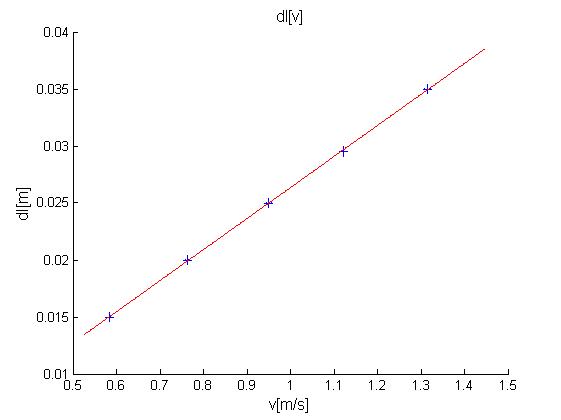
*(54)*

*לאחר הצבה של הנתונים בנוסחה (27) נקבל:*

*(55)*

*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 (8), הגרף המתאים הוא גרף של כתלות ב-. הגרף הוא גרף ליניארי ולכן הוא פשוט יחסית לחקירה*. לאחר הזנת טבלה XX לתוכנת הMatlab והרצת התוכנית, התקבל הגרף הבא:



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

(56)

(57)

(58)

(59)

לפי הרקע התיאורטי, שיפוע הגרף הוא . לאחר הצבת הערכים לפי משוואות (34),(33) נקבל:

(60)

כפי שניתן לשים לב, גודל זה תלוי בשני פרמטרים - ו . לכן, על מנת לחשב את השגיאה של גודל זה, יש לחשב לפי נוסחה (26), ונקבל:

(61)

לאחר הצבת נתונים לפי משוואות (34),(33) נקבל:

(62)

נציב את הנתונים של משוואות (45),(43),(40) בנוסחה (21) ונקבל:

(63)

מסקנות (תום מלר):

אמתנו חוק שימור האנרגיה במעבר מאנרגיה פוטנציאלית לאנרגיה קינטית. גילנו כי קיים שימור אנרגיה בכוחות המשמרים: כוח הכבידה והכוח שמפעיל קפיץ. תאוצת כדור הארץ היא לפי שיפוע הגרף הליניארי עליו התבססנו בתיאוריה (נוסחה (1) ו- (2)). עוד נגלה כי תאוצת כדור הארץ אכן קבועה, בסבירות גבוהה, כפי שהנחנו, מכיוון שהגרף הפרבולי בעל שגיאה גדולה ביחס לשגיאה שקיבלנו בגרף הליניארי ולכן סביר שהתאמה פרבולית אינה טובה עבור חישוב תאוצת כדור הארץ. מסקנה לא פחות חשובה שלמדנו מהניסוי נבעה מכך שבמהלך הניסוי גילינו מספר שגיאות שיטתיות. ראינו כי שגיאה שלמראית עין נראית זניחה משפיעה רבות על התוצאות ועל טיב ההתאמה ולכן נסיק כי שגיאות שיטתיות משפיעות על התוצאות ולכן יש לשים לבדוק ולתקן את התוצאות בהתאם.

מסקנות (איתי פריצקי):

לאחר ביצוע הניסוי וחישוב הערכים הממוצעים של השגיאות ושל כל גודל בניסוי מצאנו כי תאוצת כדור הארץ היא, לפי ההתאמה הליניארית: ולפי ההתאמה הפרבולית: , וכמו כן איששנו את ההנחה שתאוצת הכובד של כדור הארץ היא תאוצה קבועה. כמו-כן גילינו שעבור התאמה ליניארית, טיב ההתאמה טוב יותר לערך התיאורטי וזאת משום שלתוכנת המחשב קל יותר לחשב התאמה ליניארית (שבה יש שני פרמטרים) מאשר התאמה פרבולית (שבה יש שלושה פרמטרים), כלומר ככל שלפונקציה יש יותר פרמטרים, כך תקטן מידת ההתאמה שהמחשב מתאים לגרף, כי הוא צריך להתחשב ביותר פרמטרים על מנת לבצע את החישוב.

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

טבלה (א'):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1 | 0.2 |
| 2 | 0.4 |
| 3 | 0.5 |
| 4 | 0.6 |
| 5 | 0.7 |
| 6 | 0.8 |
| 7 | 0.9 |

טבלה (ב'):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1 | 0.0045 |
| 2 | 0.0085 |
| 3 | 0.0095 |
| 4 | 0.0115 |
| 5 | 0.0105 |
| 6 | 0.014 |
| 7 | 0.013 |

טבלה (ג'):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1 |  |
| 2 |  |
| 3 |  |
| 4 |  |
| 5 |  |
| 6 |  |
| 7 |  |

טבלה (ד'):

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 1 |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |

דטבלה (ה'):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1 |  |
| 2 |  |
| 3 |  |
| 4 |  |
| 5 |  |
| 6 |  |
| 7 |  |

טבלה (ו'):

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 1 |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |

טבלה (ז'):

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1 | 0.1995 |
| 2 | 0.3995 |
| 3 | 0.4995 |
| 4 | 0.5995 |
| 5 | 0.6995 |
| 6 | 0.7995 |
| 7 | 0.8995 |

טבלה (ח'):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 1 | 0.0045 |  |
| 2 | 0.0085 |  |
| 3 | 0.0095 |  |
| 4 | 0.0115 |  |
| 5 | 0.0105 |  |
| 6 | 0.014 |  |
| 7 | 0.013 |  |

טבלה (ט'):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |
| 6 |  |  |
| 7 |  |  |

טבלה (י'):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |
| 6 |  |  |
| 7 |  |  |

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)
2. רכיב x של כוח הכבידה. [↑](#footnote-ref-2)