



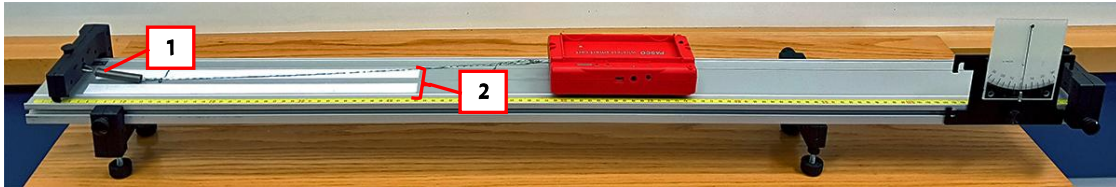
עבודה ואנרגיה – כוח אלסטי

ציוד

- מסילת PASCO עם 2 פסי ולקרו ועם מד זווית מוצמד
- מחסום למסילה
- עגלת דינמיקה אלחוטית עם וו המותקן על חיישן הכוח
- קפיץ בעל קבוע הכוח של כ- 6.5 N/m , אליו קשור חוט
- מאזניים.

תיאור המערכת

עגלה משוגרת לאורך מסילה באמצעות קפיץ (1) הקשור בחוט לחיישן הכוח המובנה של העגלה (איור 1). החיכוך בצירי העגלה קטן מאד. בתחילת תנועתה, העגלה נעה בהשפעת הקפיץ המתוח ובמהלך התנועה האנרגיה הפוטנציאלית שאגורה בקפיץ מומרת לאנרגיה קינטית של העגלה. בשלב זה העתק העגלה נמדד על ידי חיישן המרחק המובנה שלה. כשהקפיץ מגיע לרפיון, העגלה ממשיכה לנוע במהירות כמעט קבועה (על מהירותה משפיע רק החיכוך בציריה). בהמשך, העגלה עולה על "מסלול האטה" (2) בו קיים חיכוך מוגבר בין העגלה למסילה. היא עוברת מרחק מסוים ועוצרת כשהאנרגיה הקינטית שלה מומרת לעבודת הכוח החיכוך.



איור 1

הסבר אודות מדידת מהירות העגלה בניסוי

למציאת מהירות העגלה נעזרים בחיישן התאוצה של העגלה - ערך המהירות ברגע t שווה לשטח שהצטבר עד רגע זה בין גרף התאוצה, $a(t)$, לבין ציר הזמן. לכן איפוס חיישן התאוצה הוא קריטי: אם קריאתו של החיישן שונה משמעותית מ-0 כשהעגלה נמצאת במנוחה, המהירות המתקבלת בחישוב תהיה שונה מהמהירות העגלה בפועל.

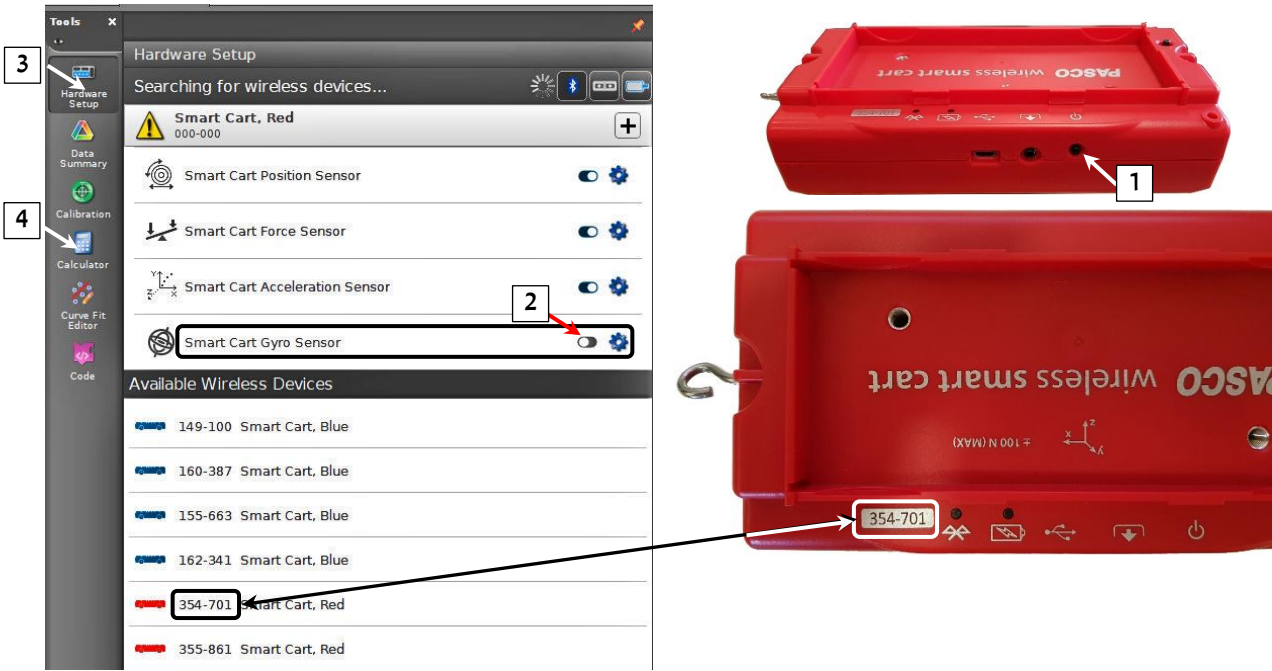
לפני ביצוע הניסוי, ענו על השאלות הבאות:

1. עבור קפיץ מתוח, סרטטו סקיצת הגרף של כוח אלסטי כתלות בהתארכות הקפיץ. כיצד באמצעות גרף זה אפשר למצוא את עבודת הכוח האלסטי המתבצעת אחרי שחרור הקפיץ?
2. מהו הקשר בין עבודת כוח אלסטי לבין שינוי באנרגיה פוטנציאלית אלסטית?
3. רשמו את חוק שימור האנרגיה עבור הגלגול מאנרגיה פוטנציאלית של קפיץ מתוח לאנרגיה קינטית של העגלה.
4. רשמו את משפט עבודה - אנרגיה עבור הקשר בין אנרגיה קינטית של העגלה לבין עבודת כוח חיכוך ב"מסלול האטה". בטאו את העתק העגלה L לאורך מסלול האטה בעזרת מהירותה v בכניסה אל המסלול, מקדם החיכוך μ ותאוצת הנפילה החופשית g .
5. פיתחו ביטוי למקדם החיכוך הסטטי עבור גוף במישור משופע כתלות בזווית השיפוע.

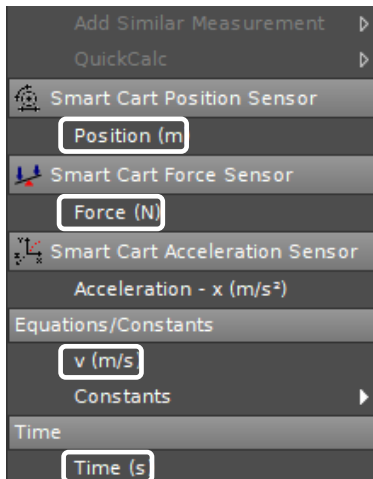
הכנת המערכת למדידות

חשוב לא להזיז את המסילה ממקומה במהלך הניסוי כדי לא להפר את האיזון שלה.

1. מפעילים את העגלה על ידי לחיצה קצרה על כפתור (1) הנמצא על דופנה הצדדית (איור 2).
2. מעלים את תבנית העבודה "עבודה ואנרגיה-עגלה אלחוטית-TEMPLATE" בה מוגדרים החיישנים וקצבי הדגימה.
3. בתוכנת Capstone מקליקים על צלמית **Hardware Setup** (3) בסרגל **Tools** (איור 2) - התוכנה תציג את רשימת העגלות המופעלות הנמצאות בסביבה. עליכם לאתר ברשימה שורה עם המספר התואם את מספר העגלה הנמצאת במערכת שלכם, ולהקליק עליה. כשהעגלה תתממשק למחשב, מוודאים ש-Smart Cart Gyro Sensor כבוי (2), (איור 2) וסוגרים את **Hardware Setup** (מקליקים שנית על צלמית ז).



איור 2



איור 3

4. בתבנית העבודה יש שתי מערכות צירים פתוחות, עליכם להגדיר את שתיהן (איור 3).

א. מקליקים על כותרת הציר האנכי <Select Measurement> של אחת ממערכות הצירים ובוחרים ברשימה מהירות v המחושבת על סמך התאוצה. אם אחרי הגדרת המהירות בציר האופקי תופיע כותרת **Index** – מקליקים עליה ובוחרים זמן (Time).

ב. במערכת השנייה מגדירים, באופן דומה, כוח (Force) בציר האנכי ומקום (Position) בציר האופקי.

5. מגדירים מדידת השטחים בכל אחת ממערכות הצירים: בסרגל הכלים של כל אחת ממערכות הצירים מקליקים על צלמית (5) (איור א8).

ביצוע מדידות

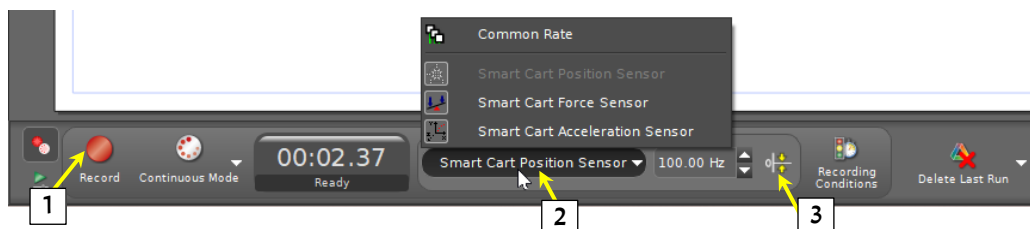
1. שוקלים את העגלה ורושמים את מסתה.

2. לפני ביצוע מדידות יש לאפס את חיישני הכוח והתאוצה של העגלה. בין הפעלת העגלה לבין איפוס החיישנים צריכות לעבור 5 דקות לפחות. הסיבה לכך היא אי-יציבות של חיישן התאוצה בדקות הראשונות אחרי ההפעלתו (יוצא מהר מהאיפוס).

א. מניחים את העגלה באמצע מסלול ההאטה (2, איור 1). מקליקים בסרגל הבקרה על שדה (2) (איור 4) ובוחרים ברשימה את חיישן הכוח **Smart Cart Force Sensor**. מאפסים את החיישן על ידי לחיצה על כפתור האיפוס (3, איור 4). אין לגעת בעגלה אחרי איפוס חיישן הכוח לפני איפוס חיישן התאוצה!

ב. פותחים שנית את רשימת החיישנים, בוחרים את **Smart Cart Acceleration Sensor** ומאפסים אותו.

3. פותחים שוב את רשימת החיישנים ובוחרים את חיישן המקום (**Smart Cart Position Sensor**).



איור 4

4. מגדירים את ראשית ציר המקום בנקודה בה הקפיץ נמצא על סף המתיחה (במקרה זה התארכות הקפיץ תהיה שווה לשיעור המקום של העגלה). מרחיקים באיטיות את העגלה ממסלול ההאטה עד שקצהו של הקפיץ הקשור לחוט יתחיל להינתק מהמסילה (איור 5). מחזיקים את העגלה במצב זה ומאפסים את חיישן המקום (כפתור 3) (איור 4).

5. מרחיקים את העגלה ממסלול ההאטה כך שחזית העגלה תימצא בערך מול שנת "70 cm" של סרגל המסילה (איור 6), ומחזיקים אותה. מפסיקים את תנודות הקפיץ, מריצים מדידות, ממתינים כשנייה אחת ומשחררים את העגלה. כשהעגלה תעצור, מפסיקים את המדידות. מתאימים קנה מידה של מערכות הצירים לגודל הגרפים על ידי צלמית (1) באיור 8' (לגרף הכוח ולגרף המהירות).



איור 6



איור 5

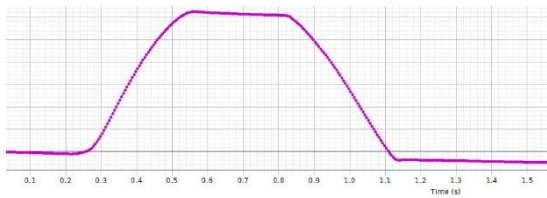
6. מומלץ לשמור את הפעילות אחרי כל הרצה.
7. חוזרים על סעיפים 3, 4 שמונה פעמים, כאשר בכל מדידה נוספת מגדילים את התארכות הקפיץ בכ- 1 ס"מ. יש לזכור להפסיק את תנודות הקפיץ ולהמתין כשנייה אחת לפני כל שחרור העגלה! **אין להרחיק את חזית העגלה מעבר לשנת "80 ס"מ" על סרגל המסילה!** מבצעים את המדידות מהר ככל האפשר כי חיישני הכוח והתאוצה יוצאים מהאיפוס עם הזמן.
8. מעריכים מקדם החיכוך במסלול ההאטה:
 - א. מניחים את העגלה בתחילת מסלול ההאטה (העגלה כולה צריכה לעמוד על המסלול).
 - ב. מעלים לאט את קצה המסילה אליו מוצמד מד הזווית, וכשהעגלה תתחיל להחליק רושמים את קריאת מד הזווית.

בסיום המדידות מכבים את העגלה על ידי לחיצה ארוכה על כפתור ההפעלה

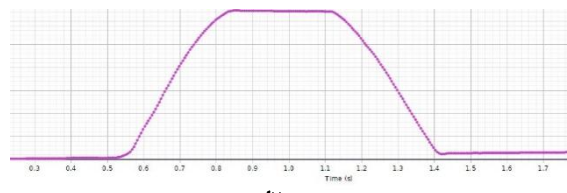
ניתוח תוצאות המדידות

קיזוז שגיאה סיסטמטית של חיישן התאוצה

למדידות חיישן התאוצה של עגלה אלחוטית יש שגיאת מדידות סיסטמטית (קבועה) שהיא משתנה בין עגלה לעגלה; סימן השגיאה יכול להיות חיובי או שלילי. היות שבניסוי זה מהירות העגלה מחושבת כשטח מתחת לגרף התאוצה, שיפוע גרף המהירות של עגלה במנוחה אינו 0 והגרף המהירות עלול להתקבל כמו באיורים 7'א' (שגיאה חיובית) או 7'ב' (שגיאה שלילית).



ב'



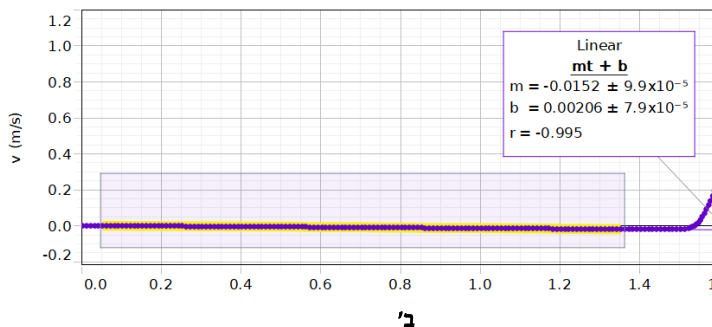
א'

איור 7

במקרים אלה יש צורך לקזז את השגיאה הסיסטמטית של חיישן התאוצה. לשם כך יש לפעול באופן הבא:

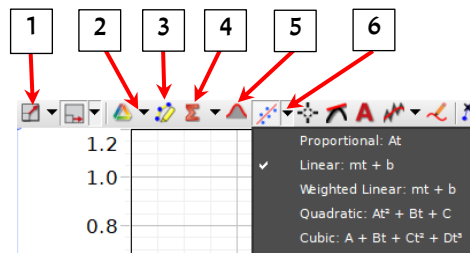
1. בגרף המהירות האחרון שהתקבל בניסוי, מקליקים על כלי בחירה (צלמית (3) באיור 8'א') וגוררים את מלבן הבחירה לקטע הגרף המתאר את העגלה לפני תחילת תנועתה. מתאימים את רוחב המלבן לאורך הקטע (איור 8'ב').

2. מוסיפים קירוב ליניארי לקטע זה: מקליקים על צלמית המשולש (6) (איור 8'א') ובוחרים Linear.

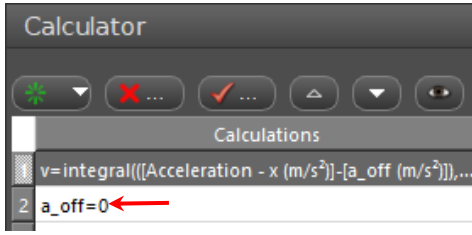


ב'

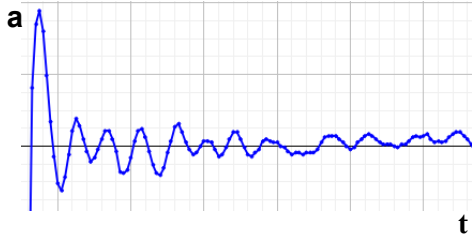
איור 8



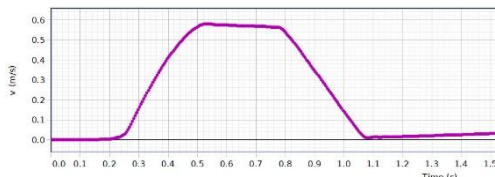
א'



איור 9



איור 10



איור 11

3. פותחים מחשבון (Calculator): לוחצים על צלמית 4 בסרגל Tools (איור 9) ובמקום 0 מקלידים את ערך השיפוע של הקירוב הליניארי (כולל הסימן). סוגרים את המחשבון (לוחצים שוב על צלמית 4), (איור 2).

קיצוץ שגיאת החישוב שביצעתם יעדכן את כל המדידות שבוצעו בניסוי, אין צורך לחזור לפעולות הנ"ל עבור שאר ההרצות.

הערה: מקזיזים את השגיאה הסיסטמטית של חישוב התאוצה לפי קטע הגרף לפני תחילת התנועה של עגלה ולא אחרי עצירתה כי אחרי העצירה יש תנודות פנימיות בחישוב (ראו איור 10). עקב תנודות אלה גרף המהירות עלול לא להתלכד עם ציר הזמן אחרי עצירת העגלה, לפחות עבור חלק מההרצות (ראה דוגמה באיור 11).

קריאת נתוני המדידות מהגרפים

פותחים גיליון Excel בו ינותחו תוצאות המדידות.

1. מתמקדים בגרף המהירות.

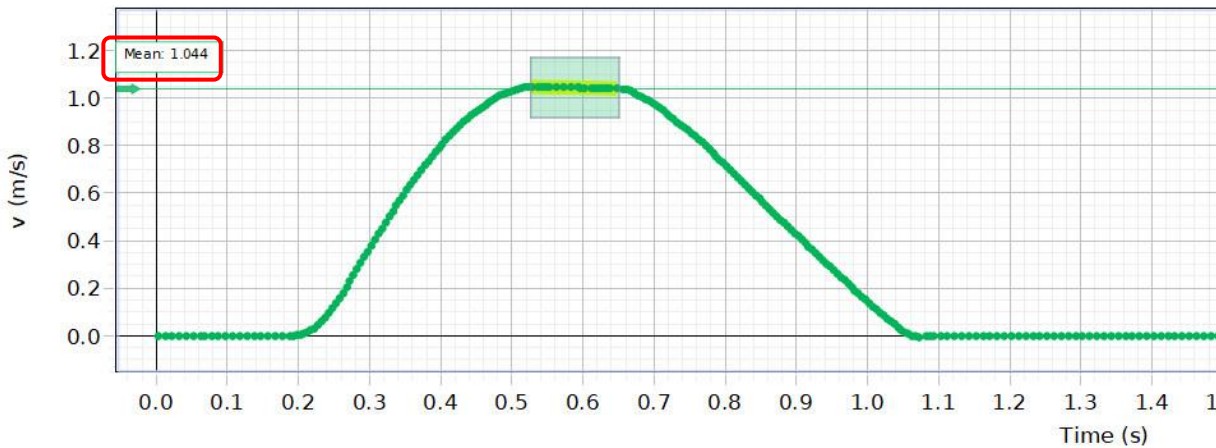
א. מקליקים על צלמית עליה מצביע חץ (2) באיור 8' (המשולש הפוך) ובחרים הרצה ברשימה.

ב. בוחרים באמצעות מלבן הבחירה את קטע הגרף המתאר תנועה קצובה של העגלה (יתכן שבקטע זה תהיה האטה קלה בגלל החיכוך בצירי העגלה). מתאימים את רוחב המלבן לאורך הקטע.

ג. מקליקים על הכלי הסטטיסטי (4, איור 8') ומזינים ב-Excel את ערך המהירות הממוצעת בקטע הנ"ל (איור 12).

ד. למדידת העתק העגלה במסלול ההאטה, L, יש למצוא שטח מתחת לקטע גרף המהירות המתאר את תנועת העגלה על מסלול ההאטה. לשם כך גוררים את מלבן הבחירה לקטע זה ומתאימים את רוחב המלבן אל הקטע. מומלץ למתוח גרף לאורך ציר הזמן להגדלת דיוק הבחירה. מזינים בגיליון Excel את ערך העתק העגלה L במסלול ההאטה.

ה. מבצעים את הפעולות הנ"ל עבור שאר ההרצות.



איור 12

2. כעת מתמקדים בגרף הכוח כתלות בהתארכות הקפיץ. ערך האנרגיה האלסטית האגורה בקפיץ המתוח שווה לשטח הכלוא בין גרף הכוח לבין ציר המקום (מדוע?). מוצאים שטח זה עבור כל אחת מההרצות: בוחרים הרצה, בוחרים את הקטע הרלוונטי של הגרף באמצעות כלי בחירה ומזינים את ערכי השטח בגיליון של Excel.

עיבוד תוצאות המדידות

חקירת גלגולי אנרגיה מפוטנציאלית אלסטית לקינטי

1. בהסתמך על חוק שימור האנרגיה, מוסיפים לטבלה ב-Excel עמודה של משתנה חדש, שהקשר בינו לבין אנרגיה פוטנציאלית אלסטית של קפיץ מתוח אמור להיות ליניארי.
2. בונים גרף של תלות המשתנה החדש שבחרתם, באנרגיה האלסטית של הקפיץ המתוח. מוסיפים את קו המגמה של הגרף יחד עם משוואתו. מה מייצג שיפוע הקו?
3. מוצאים את מסת העגלה באמצעות הגרף ומשווים אותה עם התוצאה שהתקבלה בשקילת העגלה. מחשבים את אחוז סטייה היחסית במדידה העקיפה של המסה.

אישוש משפט "עבודה – אנרגיה"

- כעת נחקור את הקשר בין שינוי באנרגיה הקינטית של העגלה לבין עבודת כוח החיכוך לאורך מסלול ההאטה.
1. בחלק העיוני פיתחתם ביטוי עבור הקשר בין העתק העגלה L במסלול ההאטה לבין מהירותה v בכניסה למסלול ומקדם החיכוך μ . מהו המשתנה הבלתי תלוי שהקשר בין העתק העגלה L לבין משתנה זה אמור להיות ליניארי?
 2. בונים גרף של העתק העגלה L כפונקציה של המשתנה עליו דובר בסעיף הקודם. מוסיפים את קו המגמה של הגרף יחד עם משוואתו.
 3. בהיעזר במשוואת קו המגמה, מוצאים את מקדם החיכוך הקינטי μ בין העגלה לבין מסלול ההאטה. משווים את התוצאה עם מדידת ערך המקדם החיכוך הסטטי שמצאתם במדידה הישירה (עבור הבד ממנו עשוי מסלול ההאטה ערך זה מאד קרוב לערך מקדם החיכוך הקינטי). מחשבים את אחוז הסטייה היחסית בניסוי.

שאלות סיכום

1. הגדירו את המושג "כוח משמר".
2. שרטטו את העגלה על המסילה. בסעיפים הבאים התייחסו לתנועתה של העגלה בהשפעת הקפיץ המתוח.
 - א. ציינו את כל הכוחות הפועלים על העגלה.
 - ב. אילו מהכוחות שציינתם משמרים ואלו אינם משמרים?
 - ג. מהו סוג תנועת העגלה – שוות מהירות, שוות תאוצה, תנועה באוצה משתנה? נמקו.
 - ד. ציינו את המרות האנרגיה המכנית בשלב זה.
3.
 - א. מהו סוג תנועת העגלה כשהיא נעה על מסלול ההאטה (שוות מהירות/מהירות הולכת וגדלה/ שוות תאוצה/תאוצה הולכת וגדלה/תאוצה הולכת וקטנה)? נמקו את תשובתכם.
 - ב. מה גורלה של האנרגיה המכנית כשהעגלה נעצרת?
4.
 - א. בהנחה שחיכוך בין העגלה לבין המסילה זניח לפני מסלול ההאטה, פיתחו ביטוי תיאורטי המקשר בין העתק העגלה L במסלול ההאטה לבין אנרגיה אלסטית U האגורה בקפיץ.
 - ב. בהסתמך על נתוני מדידותיכם, בנו בגיליון Excel גרף $L(U)$.
 - ג. מהי משמעות שיפוע הגרף? האם ערך השיפוע תואם את התוצאות שקיבלתם בעיבוד נתוני הניסוי?