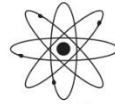




המרכז הארצי  
למורי הפיזיקה



המחלקה להוראת המדעים



הפיקוח על הוראת הפיזיקה



משרד החינוך  
הסוכנות הפדגוגית  
אגף סדעים  
הפיקוח על הוראת הפיזיקה

מינהלת סל"מ  
המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי  
ע"ש עמוס דה-שליט



הפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה  
הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל



# בניה וכיול של מכשירי מדידה - מהתנסות להמשגה מודל הוראה

כתיבה: גילית פורת ושולמית קפון

ייעוץ מדעי: נועם סוקר

ללא עריכה לשונית

מי אנו...

- הגב' גילית פורת - מורה מובילה לפיזיקה בחטה"ע ובמכינה הקדם אקדמית בטכניון, בעלת ניסיון רב בהוראה באמצעות פרויקטים, הוראת חקר ובפיתוח חומרי הוראה ולמידה.
- פרופ"מ שולמית קפון – חברת סגל וראש מסלול הכשרת המורים לפיזיקה בפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה בטכניון. חוקרת תהליכי למידה משמעותית, התפתחות חשיבה מדעית והכשרת מורים.
- פרופ' נועם סוקר – חבר סגל בפקולטה לפיזיקה בטכניון ודיקן הפקולטה בשנים 2009 - 2015, אסטרופיזיקאי העוסק במחקר תיאורטי על אוביקטים שונים בחלל.

מקור – אוקטובר 2017

עדכון ועריכה – נובמבר 2018

ראש הפרויקט: פרופ"מ שולמית קפון

לפי מכרז מס' 9/7.2013

© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך

## תוכן עניינים

3	1. מבוא
4	2. רציונאל ודגשים זידקטיים להפעלה בכיתות
9	3. מערך שיעור לפתיחת הפעילות
12	4. בנייה
12	בניית שעון מים
16	בניית שעון עצר המבוסס על מטוטלת
25	בניית מד מרחק
28	בניית מאזני כפות
32	בניית מכשיר למדידת מסה בתנאי חוסר משקל
34	5. כיוול מכשירי המדידה
34	קביעת טווח המדידה של המכשיר
35	בנית טבלה מקשרת בין ערכי הייחוס להוריית המכשיר
37	בנית גרף המקשר בין ערכי הייחוס להוריית המכשיר
38	יצירת סקלה למכשיר
41	6. מדידה
42	השוואה בין תוצאות של שתי מדידות בלתי תלויות, או בין מדידה לערך תיאורטי צפוי
43	חישוב השגיאה במדידה
46	7. מה למדנו?
46	לפני המדידה
46	מדידה
47	ידע קודם
47	השוואה בין מדידות והסקת מסקנות
50	מפת מושגים
51	8. הצגת המכשיר שבניתם
52	9. פעילות המשך - הזמנה לחקר
53	10. מחוונים להערכה עצמית ולהערכת עמיתים
53	תיעוד תהליך הכיוול ותוצאותיו
55	תיעוד מדידה
56	תיאור מבנה המכשיר ואופן פעולתו
57	הצגת הפרויקט
58	11. מקורות

## 1. מבוא

החברת מציעה מהלך הוראה להוראת משמעות המדידה הפיזיקאלית, הערכה והתמודדות עם אי הוודאות במדידה (שגיאות מדידה), ופיתוח מיומנויות לביצוע, תיעוד ודיווח על עבודה מדעית. גישת ההוראה היא גישת הייטק-היי להוראה באמצעות פרויקטים, כאשר הפרויקטים עצמם עוסקים בבניה וכיול של מכשירי מדידה עשויים מחומרים מתכלים ואביזרים פשוטים שאפשר למצוא בכל מעבדה בית ספרית, ותיעוד של מהלך זה.

הפרויקט החל לקרום עור וגידים במסגרת הקורס "התפתחויות בהוראת הפיזיקה" אותו לימדנו בסמסטר חורף תשע"ז בטכניון. השאלות שהניעו את הקורס היו כיצד ניתן להפוך למידת מושגים ומיומנויות יסוד בפיזיקה ללמידה פעילה וחוויתית שמפתחת את התלמידים גם מבחינה אישית, וכיצד ניתן להעריך למידה כזו. ההקשר החינוכי שבו דנו בסוגיות אלה היה למידה מבוססת פרויקטים. חשוב היה לנו שהסטודנטים לא רק יתנסו כלומדים אלא גם שינחו בפועל תלמידי תיכון בפרויקט קטן שניתן להפעלה גם על ידי מורה אחד בכיתה גדולה, ולשם כך התחלנו לפתח את החומרים. חלק מהמפגשים התקיימו בשני בתי ספר סמוכים לטכניון במקום במעבדת ההוראה בטכניון. במשך חמישה שבועות, בכל יום שני בשעות ההוראה של הקורס, מחצית מהקבוצה הגיעה בליווי של אחת מאיתנו לבי"ס אחד והמחצית השנייה בליווי האחרת לביה"ס השני. כל מפגש עבודה עם התלמידים ארך שלושה שיעורים רצופים וכל סטודנט הנחה בו זוג תלמידים. הפעילויות שפיתחנו לצורך הקורס עברו שכתוב לקראת השתלמות מורים שהתקיימה בקיץ תשע"ז בטכניון ובעקבותיה החוברת יצאה לאור באוקטובר 2017. השתלמות המורים לוותה במחקר על תהליך הלמידה והתובנות ממחקר זה הובילו לשינויים המופיעים בחוברת זו. המחזור השני של השתלמות המורים שהתקיים בקיץ 2018 התנסה בחומרים שבחוברת הנוכחית.

אנו מבקשות להודות לרכזים ולמורי הפיזיקה הנפלאים אלכס גרין מביה"ס עירוני ג' בחיפה ויבגני לילבמן מביה"ס מקיף נשר, שפתחו את הלב ואת הדלת לסטודנטים ולנו והכניסו אותנו לכיתות י' שלהם, ל-45 תלמידי כיתות י' המקסימים בקבוצות הפיזיקה 5 יח"ל בשני בתי הספר, שנשארו במשך חמישה שבועות, 3 שעות בכל שבוע אחרי שעות הלימודים, כדי לעבוד על הפרויקטים בהדרכת הסטודנטים, לסטודנטים הנהדרים (והסבלנים!) שלנו עליהם "התגלחנו" עם הגירסה הראשונה לפעילויות, ולמורים לפיזיקה שהשתתפו בשני המחזורים של השתלמות "מבניה להמשגה - סדנה לבניה וכיול של מכשירי מדידה" שהתקיימה בקיץ תשע"ז ותשע"ח והתנסו בפעילויות שבחוברת זו – למדנו מכולכם. תודה מיוחדת ליועץ המדעי של הפרויקט, פרופ' נועם סוקר על ההערות המועילות.

אנו מקוות שתמצאו את החוברת מועילה!

גילית ושולי.

## 2. רציונאל ודגשים דיזקטיים להפעלה בכיתות

חוברת זו מציגה מודל הוראה הבנוי לפי הרציונאל של גישת הייטק-היי להוראה באמצעות פרויקטים (פאטון, 2012). בגישה זו התלמידים לומדים תוכן ומיומנויות מוגדרים מראש דרך עיצוב תכנון וביצוע של פרויקט המוביל ליצירת תוצר המוצג בפני קהל. בחרנו להתמקד בגישה זו מהסיבות הבאות: (א) הגישה מתאימה להפעלה גם בכיתות גדולות כשאין אפשרות להצמיד מנחה אחד לכל קבוצה, (ב) הגישה ניתנת להפעלה בטווח גילאים רחב, (ג) הגישה באה ללמד תכנים ומיומנויות מוגדרים מראש באופן חווייתי מחד ומכוון להבנה עמוקה מאידך. (ד) הגישה מתאימה לא רק לפרויקטי חקר.

בחרנו להתמקד בנושא המדידה הפיזיקאלית בפרויקט מכמה סיבות. הסיבה הראשונה פרקטית – פרויקט שמתמקד במדידה הפיזיקאלית יכול להיות מופעל הן בכיתות שמתחילות ללמוד בכיתה י' אופטיקה והן בכיתות שמתחילות ללמוד מכניקה. הסיבה השניה היא שנושא זה קרוב מאד לליבנו ואנו חושבות שהוא אינו מטופל בכבוד הראוי לו בהוראת הפיזיקה התיכונית.

פיזיקה היא מדע ניסויי. למרות שתוכנית הלימודים בפיזיקה מחייבת את המורים לשלב ניסויי מעבדה בהוראה, ברוב המקרים הניסויים מתבצעים באופן טכני של ביצוע הוראות (cook book) ומטרתם "לאשש" חוק פיזיקלי שנלמד בכיתה. ניסויים אלה אינם מזמנים דיון מעמיק במשמעות ובחשיבות של תהליך המדידה הפיזיקאלית ובאי הוודאות במדידה. שאלות כמו מהם גדלים פיזיקאליים, מהן יחידות מידה ומדוע צריך יחידות מידה סטנדרטיות, מהי אי הוודאות בתוצאות המדידה ומה חשיבותה, אילו סוגים של שגיאות מדידה יש וכיצד לטפל בהן, כיצד משווים בין מדידות בלתי תלויות, כיצד בודקים התאמה של מדידה למודל תיאורטי וכד' – שאלות מרכזיות לאופייה של הפיזיקה כמדע ניסויי – אינן מטופלות באופן מעמיק בהוראה בביה"ס התיכון. למעשה, מתקרים בהוראת הפיזיקה מראים שאפילו סטודנטים לתואר ראשון מתקשים להבין את משמעות תהליך המדידה ואי הוודאות במדידה (Volkwyn, Allie, Buffler, & Lubben, 2008).

מודל ההוראה שאנו מציגות שם את תהליך המדידה הפיזיקאלית במרכז הבמה בראשית לימודי הפיזיקה בכיתה י'. הטיפול בהמשגות של תהליך המדידה הפיזיקאלית נעשה בהקשר אותנטי: תהליך הבניה והכיול של מכשיר מדידה שמיועד למדוד גודל בסיסי (זמן, אורך, או מסה). המודל מציע מהלך הוראה לנושא בגישה של למידה מבוססת פרויקטים (הייטק-היי). תוצר הפרויקט של התלמידים הוא מכשיר מדידה עובד ומכיל ותיעוד של תהליך הבניה והכיול כך שאחרים יוכלו להשתמש במכשיר. המכשירים בנויים מחומרים מתכלים או כאלה שנמצאים בכל מעבדה בית ספרית לפיזיקה, ואביזרים זולים ונגישים שיש בכל בית.

### קהל היעד לפעילות

קהל היעד לו כתבנו את הפעילויות הוא תלמידי פיזיקה בראשית כיתה י'. הפעילויות מתאימות לשילוב בהוראה הרגילה במסגרת ההרחבות של הערכה חלופית (30%). הפעילויות מתאימות במיוחד לתלמידי כיתה י' המתחילים את תוכנית הפיזיקה המחקרית. מודל ההוראה אינו פרויקט חקר, אבל תלמידי הפיזיקה המחקרית יוכלו ללמוד מההתנסות בפעילות חלק ניכר מהמיומנויות הדרושות לביצוע פרויקט חקר בפיזיקה בדרך מעמיקה וחווייתית.

## תזמור תהליך הבניה והכיול של המכשירים

תהליך ההמשגה משולב בעשייה מתחילת העבודה לכל אורכה ומונע ע"י העשייה. הפעילויות המוצעות מטפלות באופן מפורש במעבר מהתנסות להמשגה, מעבר לא טריוויאלי על פי הספרות על למידה באמצעות פרויקטים (Kolodner et al., 2003). כמו כן תמצאו בחוברת אסטרטגיות לתמיכה מובנית בתלמידים בתהליך התייעוד (כתיבה מדעית), ניתוח הנתונים, והצגתם בעל פה ובכתב, גם בכיתות גדולות. הפעילות נפתחת בשיעור מליאה משולב בהפעלות שבא להציף את האתגר במדידה הפיזיקאלית וממשיכה לעבודה בקבוצות וחוזרת למליאה. מספר התלמידים האידיאלי בקבוצה הוא שניים. אם אין ברירה ניתן לאפשר עבודה בקבוצות של שלושה, אבל לא יותר.

כיוון שחשוב היה לנו לאפשר עבודה גם בכיתות גדולות בהן מורה אחד צריך להנחות מספר רב של קבוצות, החלטנו להדריך את התלמידים בתהליך הבניה באמצעות חוברות עבודה מפורטות לכל אחד מהמכשירים, כך שקבוצות שונות יכולות לעבוד במקביל על בניה וכיול של חמישה מכשירים שונים, כשכל אחת עובדת על חוברת עבודה אחרת. בשלב זה המורה עובר בין הקבוצות עוזר, מדריך ומוודא שהתלמידים עונים באופן נכון על השאלות שבחוברת ומבינים את מה שהם עושים. אם עובדים עם כיתה גדולה חשוב מאד שהמורה יתנסה בבניה וכיול של כל המכשירים לפני שהוא מפעיל את הפעילות בכיתה, ושיזהה את טווח המדידה וכושר ההפרדה (רזולוציה) של כל אחד מהמכשירים.

הסיבה שהפרויקט מתחיל מבניה של המכשירים לפי ההוראות שלנו ולא ממכשיר שהתלמידים ממצאים, היא שחשוב היה לנו שהתלמידים יגיעו למכשיר עובד כבר בשליש הראשון של העבודה על הפרויקט, ורוב העבודה תוקדש לתהליך הכיול ולתייעוד המדידות. תהליך זה מהווה לדעתנו את הפלטפורמה הכי משמעותית לחיבור בין הבניה להמשגה והוא מחייב תיווך והדרכה של מורה. חשוב להבין שהבניה עצמה היא תהליך מורכב ויצירתי מלכתחילה. ראינו קבוצות שתוך כדי עבודה עשו וריאציות ושכלולים לרעיונות שלנו, בעוד שקבוצות אחרות היו זקוקות להרבה מאד תמיכה וליווי למרות ההוראות המפורטות.

הפרק "מה למדנו?" מסכם באופן מסודר את הרעיונות והמושגים להם נחשפים התלמידים במהלך העבודה. חשוב ביותר לקיים לפחות שיעור מליאה אחד שיסכם את הרעיונות הללו. לדעתנו, כדאי לעצור מפעם לפעם את העבודה בקבוצות למספר דקות כדי להאיר ולהדגיש רעיונות חשובים גם תוך כדי העבודה על הבניה, הכיול והמדידה.

המודל בא ללמד את משמעות המדידה הפיזיקאלית וחשוב מתמקד בהיבט זה. עקרון העבודה הפיזיקאלית של כל מכשיר מסקרן ויכול להפוך בקלות לפרויקט חקר גדול. גם חקירה מצומצמת של התופעה עשויה להוביל לשכלול המכשיר או להמצאת מכשירים נוספים - אבל חשוב להבין שחלק זה הוא כבר פרויקט אחר שעומד בפני עצמו.

אנו ממליצות להקדיש לעבודה על הפרויקט בין 15 ל 20 שיעורים (שיעור = 45 דקות) – תלוי במספר הקבוצות שעובדות במקביל, עד כמה אתם יכולים להיבנות על עבודת הבית של התלמידים והאם תרצו להגיע לשלב בו התלמידים גם ממצאים אב טיפוס של מכשיר מדידה מקורי משלהם, בנוסף לבניה ולכיול המודרך של המכשירים "שלנו".

ניתן לתזמר את הפעילות בכיתות בכמה דרכים כשבכל אחת מהן יתקיים אירוע מסכם בו התלמידים מציגים את עבודתם לעמיתים או אורחים באופן שונה. בכל האפשרויות התלמידים כותבים ומגישים דוח

### תזמור א': קבוצות שונות בונות מכשירים שונים

ניתן להגדיר (מראש!) מספר אפשרויות למבנה של האירוע המסכם:

1. הצגת המכשירים לעמיתים ואורחים:
  - התלמידים יבנו מצגת בה הם יציגו לעמיתיהם ולאורחים (הורים, מורים אחרים, חברים) את מבנה המכשיר, המאפיינים שלו ואופן הפעולה והשימוש בו. אם יש הרבה קבוצות אפשר לקיים הצגות מקבילות.
2. משחק מדידה 1:
  - א. כל אחת מהקבוצות מניחה את המכשיר "שלה" על שולחן משלו ומניחה לידו דף עם הסבר כיצד להשתמש במכשיר ואת גרף הכיול שהיא יצרה (חלק מדו"ח המעבדה).
  - ב. המורה יכין מבעוד מועד אתגר מדידה לכל קבוצה – בחירה של גדלים שמתאימים לטווח המדידה ולאי הוודאות במדידה של כל אחד מהמכשירים. דוגמאות: מסה של פיסת נייר קרועה, זמן הנפילה של דיסקית מגנטית על מסילה משופעת עשויה ממתכת, המרחק של דלת הכניסה לביה"ס מעץ החרוב שבחצר וכד'. המורה ימדוד את הגדלים הללו מבעוד מועד במכשיר מדידה תקני וירשום לעצמו את ערך המדידה ואת אי הוודאות בתוצאת המדידה. המורה לא יגלה לתלמידים את ערך המדידות.
  - ג. התלמידים ייתבקשו לבצע חמש מדידות חוזרות במכשיר שבנו לאתגר המדידה שהציב המורה, לקבוע את ערכו של הגודל הלא ידוע ואת אי הוודאות בתוצאת המדידה. אתגר המדידה צריך להיות מתאים לטווח המדידה ולכושר ההפרדה של המכשיר שנבדק והוגדר מבעוד מועד ע"י הקבוצה שבנתה את המכשיר.
  - ד. כל קבוצה תמדוד את הגדלים הלא ידועים במכשירים שבנו קבוצות עמיתות (עבודה בתחנות). התחרות המתקיימת כפולה:
    - תחרות בין הקבוצות המודדות: בכל תחנה הקבוצה מנצחת היא זו שהמדידה שלה הייתה הכי קרובה לערך האמיתי באי הוודאות הקרובה ביותר לזו שנדרשה באתגר. הקבוצה האלופה היא זו שצברה הכי הרבה ניצחונות.
    - תחרות בין הקבוצות הבונות: הקבוצה הזוכה היא זו שהכי הרבה קבוצות הצליחו להגיע למדידה מדויקת במכשיר שלה בגבולות אי הוודאות שמתאימים למכשיר.
3. משחק מדידה 2:
  - מבנה זהה לסעיפים א'-ג' כמו במשחק המדידה 1. ההבדל בסעיף ד':
    - המורה יזמין כל קבוצה למדוד במכשיר שהיא בנתה גודל ידוע לו ולא ידוע לתלמידים (אתגר המדידה). התחרות תהיה בין קבוצות שבנו מכשירים דומים. הקבוצה המנצחת היא זו שהמכשיר שלה נתן מדידה יותר מדויקת. לאחר מכן תתקיים עבודה בתחנות בהן כל קבוצה תשתמש במכשירים שבנו קבוצות אחרות כדי למדוד גודל לא ידוע.
4. חדר בריחה:
  - חדר הבריחה יהיה מבוסס על המכשירים השונים. פעילות זו מחייבת הערכות מאד גדולה שכן

(א) יש להציב אתגרי מדידה שונים לכל אחד מהמכשירים ולכל אחת מהקבוצות, (ב) כיוון שצריך שכל תוצאה תוביל לרמז שייתן את המפתח לחדר (למשל הממוצע ואי הוודאות נותנים קואורדינטה במפת אותיות בה מסתתרת אות וכד'). (ג) חייבים לוודא שכל המכשירים של כל הקבוצות עובדים בדיוק סביר ולכן גם כאן חייבים לבצע את שלבים אי-גי של משחק מדידה 1. עדיין לא ניסינו את אפשרות זו.

#### **תזמור ב': כל הקבוצות בכיתה בונות את אותו מכשיר**

מבנה כזה לא חושף את התלמידים למגוון המכשירים ולסקרנות שהתלמידים מגלים אחד במכשיר של השני, אבל מאפשר ניהול קל יותר של התהליך בכיתה גדולה כי כולם עושים פחות או יותר אותו דבר. האירוע המסכם הוא תחרות מדידה בן הקבוצות. הקבוצות ימדדו גודל שידוע רק למורה תוך הערכת הערך של הגודל ואי הוודאות במדידה. הקבוצה המנצחת היא זו שהמדידה שלה היתה הקרובה ביותר לערך הידוע באי הוודאות הקטנה ביותר. תזמור זה לוקח פחות זמן, בעיקר אם עובדי עם שעון המים שהבניה והכיול שלו פשוטים יחסית. אם נשאר זמן, כדאי להמשיך משם לבניה וכיול עצמאיים של מכשיר נוסף ואז אפשר לתת לתלמידים לבחור איזה מכשיר הם יבנו. תהליך כזה מאפשר גם חזרה והעמקה בהבנת המושגים שנלמדו בצורה ספיראלית.

#### **תזמור ג': עבודה של מנחה מול זוג אחד או שני זוגות של תלמידים**

בסיטואציה כזו המנחה יכול לעבוד מאד צמוד לתלמידים מה שמאפשר הרבה יותר גמישות. במקרה כזה החוברת תשמש כשהשראה לפרויקט, כאחד המקורות אתם יעבדו התלמידים וככלי מכוון לכתיבה.

#### **הרחבה מומלצת (שלושה שיעורים נוספים)**

כדאי מאד להזמין את התלמידים בסיום הפעילות לחשוב על רעיונות למכשירי מדידה נוספים, ולקיים הפנינג של יצירה בו הם ינסו לבנות אב טיפוס למכשיר המדידה עליו הם חשבו שבסיומו הם יציגו את הרעיונות שלהם לעמיתים אחרים.

#### **הרחבה מומלצת במסגרת הפיזיקה המחקרית**

כל אחד ממכשירי המדידה שהתלמידים בנו יכול להיות בסיס לפרויקט חקר גדול. שאלות המחקר יכולות להתחיל מניסיון לשפר את הביצועים של המכשיר או להבין יותר לעומק את עקרון העבודה שלו ולהתפתח משם.

#### **הזרחה ותמיכה בתלמידים בתהליך הכתיבה והתיעוד של המדידות**

לא משנה באיזו דרך תתזמרו את הפעילות בכיתות, תוצר חשוב של הפעילות הוא דוח המעבדה שהתלמידים יגישו בסוף התהליך. הדוח צריך להסביר את אופן העבודה של המכשיר, להציג את גרף הכיול של המכשיר או סקלה ולתאר את המאפיינים שלו. תיעוד נכון ויעיל של מדידות, ניתוח והצגה שלהן הן מיומנויות שתלמידים מתקשים בהן וחשוב ללמד אותן.

גישת הייטק-היי מדגישה את חשיבות הטיוטות המרובות במהלך העבודה על הפרויקט ואת ההערכה המעצבת בדרך. בכיתות גדולות גישה כזו יכולה להפיל עומס מאד גדול על המורה. אנו מציעות להשתמש בהערכת עמיתים לצורך הערכת הטיוטות המתקדמות של העבודה, כשהמורה רק מעריך את התוצר הסופי.

### **שימוש במחוונים להערכת עמיתים**

חשוב שההערכה בכל השלבים תהיה אדיבה, אבל שתצביע באופן ברור על מה צריך לשפר. תלמידים לא יוכלו לבצע הערכה כזו לעבודה של עמיתים אם לא נדריך אותם, כיוון שלרב הם לא מודעים למה שחסר בעבודות שלהם. כדי שהערכת העמיתים תהיה משמעותית ותתייחס להיבטים של הניתוח והכתיבה שחשוב לנו לקדם אצל התלמידים, כתבנו מחוונים לכל אחד מהחלקים של דוח המעבדה שהתלמידים צריכים להפיק וביקשנו מקבוצות שונות להעריך זו את עבודתה של זו. כשבכיתה יושבות קבוצות שונות את אותו מכשיר כדאי שהן תעריכנה אחת את העבודה של השניה. המחוונים בנויים כך שהם מסבירים את התכונות החשובות של כל אחד ממרכיבי הדוח.

להערכת העמיתים יש קודם כל מרכיב אישי בו כל אחד צריך לקרוא את הפרק בדוח המעבדה שהוא התבקש להעריך ולהתייחס בכתב לכל אחד מהמרכיבים המופיעים במחווין. לאחר ההערכה הקבוצות יושבות ומסבירות זו לזו את המשוב שהן כתבו. אנו ראינו שיפור מרשים בדוחות הסופיים שקיבלנו לאחר העבודה עם מחוונים אלה.

לא נכון לדעתנו לקיים את הערכת העמיתים בבת אחת לכל הדוח, אלא כדאי לבצע אותה בשלבים. למשל, מפגש אחד יוקדש להערכת הפרק בדוח העוסק בתהליך הכיול. אחרי המפגש, הקבוצות יתקנו את הפרק הרלוונטי בהתאם למשוב וימשיכו הלאה. מפגש אחר יוקדש לטיפול בפרק אחר בדוח וכד'. הפעילות דורשת זמן, אבל הדוחות הסופיים שמקבלים מהתלמידים שווים את ההשקעה.

### **2.4. מדוע איננו מציגות טיפול מתמטי מלא בשגיאות מדידה?**

השתדלנו להציג טיפול אינטואיטיבי באי הוודאות של תוצאות המדידה. מטרת ההוראה שלנו הייתה שהתלמידים יבינו מדוע צריך יחידות, שבאופן עקרוני אין מדידה שאין בה אי וודאות, שידעו לאמוד ולהציג את אי הוודאות בתוצאות המדידות שלהם, שיהיו להם כלים להעריך באופן גס מתי תוצאות המדידות שלהם מתישבות (או לא...) עם המודל התיאורטי אותו הן באות לבחון ושהם יבינו שאי אפשר לעשות זאת בלי אומדן לאי הוודאות בתוצאות המדידה. למטרות אלה איננו זקוקים לנגזרות חלקיות או סטטיסטיקה כבדה שממילא אינן מוכרות לתלמידים בתחילת כיתה י'.



### 3. מערך שיעור לפתיחת הפעילות

רצינואל: מדידה היא פעילות שאנו לומדים לעשות באופן אינטואיטיבי כבר בגיל צעיר (המקל שלי יותר גדול משלך) ולכן איננו מקדישים לה מחשבה. כולנו משתמשים בסרגל, מודדים אורך ביחידות המידה מטר או ס"מ, שוקלים, שואלים מה השעה וכד' מבלי לעצור ולשאול את עצמנו מה משמעות היחידות, איך המכשיר "יודע למדוד" וכד'. במדעי הטבע הסוגיות הללו אינן מובנות מאליהן.

#### מטרות השיעור:

א. הפניית תשומת הלב של התלמידים לכך שהסוגיות המתוארות מעלה אינן טריוויאליות, ושמאחורי פעולות המדידה האגביות שאנו עושים מסתתרת חשיבה עמוקה ומערכת מוסכמות חברתית.

ב. הכרות ראשונית עם המושגים גודל פיזיקאלי, יחידת מידה, ואי הוודאות במדידה

#### עבודה בזוגות/קבוצות (10 דקות).

- כל קבוצה מקבלת טוש ללוח/עיפרון/עט/פריט אחר מהמורה (אין חשיבות לכך שכל הקבוצות מקבלות את אותו פריט. להיפך, כאשר חלק מהקבוצות מקבלות פריטים שונים הדיון יכול להיות פורה יותר).
- משימת הקבוצה: דמיינו כי נקלעתם לאי בודד. מכשיר הטלפון שלכם יצא מכלל שימוש ואין בידכם סרט מידה או סרגל. מדדו ורשמו את אורך החפץ שבידכם.
- הערה דיסקטית: המשימה המוצעת מעורפלת בכוונה. תוכלו לבנות מהשאלות שיעלו התלמידים במהלך העבודה בקבוצות דיון פורה שבו התלמידים יגיעו לניסוח טוב יותר של המשימה.

#### סיכום התשובות על הלוח ודיון במליאה (10 דקות).

- כל קבוצה תציג תוצאת המדידה שלה והתוצאות יסוכמו ע"י המורה בטבלה על הלוח.
- הצעה לשאלות לדיון:
  - מה המשותף לכל התשובות?
  - האם היו קבוצות שנעזרו באיברי הגוף במדידה? מדוע נבחר איבר גוף מסוים ולא אחר? (למשל עובי של אצבע ולא אורך האמה או אורך כף הרגל)
  - כיצד קבוצה אחת יכולה להבין את ערך המדידה שעשתה קבוצה אחרת?

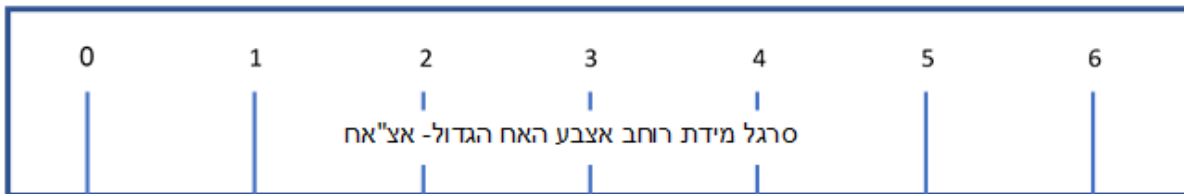
#### מסקנות מהדיון (ינסחו ע"י המורה, 5 דקות)

1. גודל פיזיקאלי (quantity): תכונה של גוף תופעה או חומר שניתנת לכימות (ניתנת להבעה ע"י מספר). במקרה הפרטי שלנו – אורך.
2. יחידת מידה (unit): גודל פיזיקאלי של גוף שהוגדר באופן שרירותי ומוסכם כשווה ליחידה אחת. במקרה הפרטי בפעילות שלנו: עובי האצבע, רוחב הרצועה של השעון וכד'.
3. יחידת המידה משקפת הסכמה חברתית: כדי שקבוצה אחת תבין את הערך של אורך הטוש שמדדה קבוצה אחרת, עליה לדעת באיזו יחידה השתמשה הקבוצה השניה ושיהיה בידיה גוף בעל אורך תקני של יחידה אחת כזו.

4. מדידה: פעולה שהתוצאה שלה היא מציאת הערך של גודל פיזיקאלי. מדידה יכולה להיעשות באמצעות השוואה לגודל פיזיקאלי מאותו סוג שערכו ידוע. הערך של הגודל הנמדד הוא היחס בין הגודל הפיזיקאלי שאנו מבקשים לאמוד (לתת לו ערך), לגודל הפיזיקאלי שהוגדר כיחידת המידה של גודל זה. למשל, אורך של שני מטר מייצג ערך של אורך שגדול פי שניים מהגודל עליו כולם הסכימו כאורך של מטר.

#### המשך עבודה בזוגות/קבוצות (10 דקות)

- כל הקבוצות מקבלות את אותו פריט למדידה (טוש ללוח).
- כל קבוצה מקבלת מהמורה את הסרגל שבתמונה.
- משימת הקבוצה: האח הגדול קבע שיחידת המידה הסטנדרטית לאורך היא רוחב האצבע שלו. יחידת המידה החדשה לאורך קיבלה את השם אצאח (אצבע של האח הגדול). קיבלתם סרגל מכויל לפי יחידות אלה. מדדו את אורך הטוש בעזרת הסרגל שקיבלתם. נסו לדייק. הינכם יכולים לעשות חלוקה עדינה יותר של של השנתות.



#### סיכום התשובות על הלוח ודיון במליאה (10 דקות)

- כל קבוצה תציג את המדידה שלה לאורך הטוש והתוצאות יסוכמו ע"י המורה בטבלה על הלוח.
- הצעה לשאלות לדיון:
  - האם יש הבדלים בין התשובות?
  - מה המקור ההבדלים?
  - כיצד נוכל למדוד את אורך האמיתי של הטוש?

#### מסקנות מהדיון (5 דקות, ינוסחו ע"י המורה)

1. אין דרך למדוד גודל פיזיקאלי בדיוק מוחלט. תמיד קיימת אי וודאות בתוצאות המדידה.
2. כושר ההפרדה (הרזולוציה של המכשיר): הינו המרחק הקטן ביותר בין שנתות סמוכות. כושר ההפרדה מגדיר לנו את ההפרש המינימאלי בערכים של שני גדלים שמכשיר המדידה מסוגל להבחין בו. למשל כושר ההפרדה של סרגל האח הגדול במדידת האורך הוא 1 אצאח, או 0.5 אצאח אם יצרנו חלוקה פנימית של כל אצאח לשני חלקים שווים.
3. כושר ההפרדה של המכשיר הוא אחת הסיבות לאי הוודאות בתוצאות המדידה שקיימת בכל מדידה.

4. העין שלנו מהווה חלק ממכשיר המדידה במקרה זה. גם מכשיר זה עשוי להטעות (למשל זווית הראייה) ולכן יכול להשפיע על אי הוודאות במדידה.

## 4. בנייה

### בניית שעון מים

#### מבוא - מהו זמן ואיך מודדים אותו?

שעון המים שתבנו מיועד למדידת זמן. אולם מהו זמן? המונח זמן בשפה הדבורה מתאר את רצף ההתקדמות של האירועים והתופעות שמהווים את המציאות המוכרת לנו (בשונה מרצף התקדמות במרחב – קדימה אחורה). האירועים והתופעות עוקבים זה אחר זה באופן בלתי הפיך מן העבר דרך ההווה אל העתיד.

הזמן הינו **גודל פיזיקאלי בסיסי** כמעט בכל מערכת יחידות מקובלת. המשמעות של גודל פיזיקאלי בסיסי היא שאי אפשר להגדיר אותו באמצעות גדלים פיזיקאליים אחרים במערכת היחידות. לדוגמה, אורך הוא גודל בסיסי אחר, אבל מהירות למשל היא גודל פיזיקאלי לא בסיסי שניתן להגדירו באמצעות אורך וזמן. לעיתים מגדירים את הזמן באופן אופרטיבי (כלומר באופן שבו מודדים אותו). הגדרה אופרטיבית של זמן היא: "זמן הוא מה שמראה השעון (מכשיר המדידה)".

כיוון שהזמן מתאר רצף של אירועים ותופעות, יחידות המידה שלו הוגדרו לאורך ההיסטוריה ע"י תופעות מחזוריות רציפות (שנה, יממה וכדומה) וע"י חלוקה שרירותית של תופעות אלה ליחידות קטנות יותר. השניה, שמהווה את היחידה הבסיסית במערכת SI המוכרת לנו, הוגדרה בעבר כחלק (1/86,400) מאורך יממה שמשית ממוצעת (כלומר זמן המחזור של סיבוב הארץ סביב צירה). לימים הסתבר שמשך זמן הסיבוב של הארץ סביב השמש אינו נשאר קבוע לאורך מיליוני שנים ולכן זו אינה הגדרה מדויקת מספיק. בשנות השישים של המאה העשרים, עם התפתחות השעונים האטומיים, השניה הוגדרה באופן מדויק יותר.

משחר האנושות האדם למד שמדידת הזמן עוזרת לו לתכנן ולשלוט בחייו. בני האדם המציאו מתקנים שונים למדידת זמנים קצרים יותר ויותר שאפשרו דיוק גדול יותר במדידת הזמן. במאה השלוש עשרה החלו להופיע באירופה שעונים מכניים שהוצבו בראש מגדלים. הדיוק של שעונים אלו היה עד כרבע שעה ליממה, במאה ה-15 הדיוק הגיע עד כ-12 דקות ביממה ובמאה ה-16 הדיוק הגיע לכ-8 דקות ביממה. במחצית המאה ה-17, עם הכנסת שעון המוטטלת הדיוק הגיע לרמה של 10 שניות ביממה. לשם השוואה – הדיוק של השעון האטומי באמצעותו מגדירים את יחידת השניה התקנית, הוא שנייה אחת ב-30 מיליון שנים.

#### הסבר אינטואיטיבי על עקרון העבודה של שעון מים

אחד העקרונות הפיזיקליים עליהם בנוי שעון מים הינו מילוי/ריקון מיכל מים בקצב ידוע כך שניתן לדעת על פי גובה המים כמה זמן עבר. שעוני מים, ביחד עם שעוני שמש, הינם בין מכשירי המדידה העתיקים ביותר למדידת זמן. שעון המים הפשוט ביותר עשוי מכלי הפתוח לאוויר שבתחתיתו חור. בתחילת המדידה הכלי מלא במים. המים זורמים החוצה דרך החור בתחתית וגובה המים מצביע על הזמן שעבר. אחת הבעיות של שעון זה היא שקצב ירידת המים אינו קבוע. במהלך ההיסטוריה הומצאו מנגנונים שונים שמטרתם הייתה לשמור על קצב אחיד של זרימת המים. תוכלו למצוא ברשת דוגמאות מגוונות למנגנונים שונים של שעוני מים.

שעון המים שתבנו עשוי משני בקבוקי שתייה המחוברים ביניהם (איור א1). הזמן ימדד באמצעות מדידה גובה המים הזורמים מבקבוק אחד וממלאים את השני. מערכת הבקבוקים הינה מערכת סגורה למים שנמצאים בתוכה. לכן, לחץ האוויר מחוץ לבקבוקים לא ישפיע על קצב זרימת המים.

כדי לאפשר זרימה של מים מבקבוק אחד לשני, יהיה עליכם להדביק את הפקקים זה לזה וליצור שני קדחים (איור ב1) אליהם תשחילו קשיות למעבר המים (איור ג1). פתח אחד ישמש למעבר מים מהבקבוק העליון לבקבוק התחתון, והפתח השני ישמש למעבר אוויר מהבקבוק התחתון אל הבקבוק העליון.

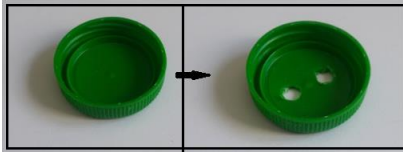
נסכם - החלקים העיקריים של שעון המים שלכם יהיו:

- שני בקבוקים המחוברים ביניהם ומהווים מערכת סגורה לזרימת המים.
- קשיות שתייה המושחלות דרך שני קדחים בפקקים שמשמשות כצינורות להובלת אוויר ומים בין שני הבקבוקים.

#### החומרים הדרושים לבניית המכשיר

- 2 בקבוקי מים קטנים או שני בקבוקי שתייה קלה עם פיה רחבה + כוס מים
- 2 קשיות שתייה
- אקדח דבק חם + דבק מהיר 3 שניות
- סרגל באורך 30 ס"מ לפחות
- כלי כתיבה
- מספריים
- איזולירבנד
- סטופר (אפשר בטלפון הנייד)

## הוראות עבודה לבניית המכשיר



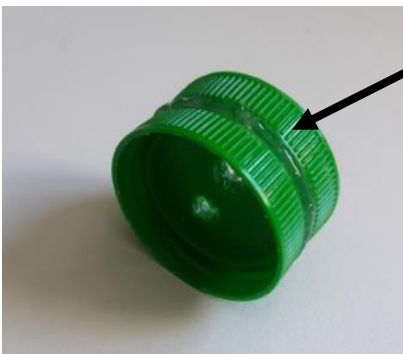
צרו שני קדחים (חורים) באחד הפקקים בעזרת מספריים.  
דאגו לכך, שקוטר הקדחים יאפשר לקשית השתייה לעבור בקדח  
באופן חופשי.



הדביקו את שני הפקקים גב אל גב בעזרת דבק חם. השתדלו  
לכסות את כל המשטח של הפקק בדבק החם כך שההדבקה  
תתפוס את מירב המשטח. חכו שהדבק יצטנן.



חוררו גם את הפקק השני בעזרת מספריים, באותם מקומות של  
הקדחים של הפקק הראשון.  
בדקו כי קשית השתייה יכולה לעבור דרך הקדחים.



אטמו את חיבור הפקקים מסביב, בעזרת דבק חם.

גיזרו מקשית השתייה שתי יחידות אורך שכל אחת מהן שווה בערך ל 5 ס"מ.



השחילו את אחת מקשיות השתייה שגזרתם, אל אחד הקדחים שבפקקים המוצמדים, כך שרק צד אחד של קשית השתייה יבלוט מהפקק. אטמו מסביב לקשית בעזרת דבק חם.

לאחר מכאן, השחילו את הקשית השנייה אל תוך הקדח השני, מהצד השני של הפקקים, כך שצד אחד של הקשית יבלוט לצד השני. אטמו בעזרת דבק חם. ראו צילום.

מלאו מים את אחד הבקבוקים, חברו את הפקק אל הבקבוק המלא. חברו את הבקבוק הריק אל הפקק השני, והמכשיר שלכם מוכן לכיול.

בשעון המים שלכם, תוכלו להמיר את גובה המים בבקבוק לזמן.

## בניית שעון עצר המבוסס על מטוטלת

### מבוא - מהו זמן ואיך מודדים אותו?

שעון המטוטלת שתבנו מיועד למדידת זמן. אולם מהו זמן? המונח זמן בשפה הדבורה מתאר את רצף ההתקדמות של האירועים והתופעות שמהווים את המציאות המוכרת לנו (בשונה מרצף התקדמות במרחב – קדימה אחורה). האירועים והתופעות עוקבים זה אחר זה באופן בלתי הפיך מן העבר דרך ההווה אל העתיד.

הזמן הינו **גודל פיזיקאלי בסיסי** כמעט בכל מערכת יחידות מקובלת. המשמעות של גודל פיזיקאלי בסיסי היא שאי אפשר להגדיר אותו באמצעות גדלים פיזיקאליים אחרים במערכת היחידות. לדוגמה, אורך הוא גודל בסיסי אחר, אבל מהירות למשל היא גודל פיזיקאלי לא בסיסי שניתן להגדירו באמצעות אורך וזמן. לעיתים מגדירים את הזמן באופן אופרטיבי (כלומר באופן שבו מודדים אותו). הגדרה אופרטיבית של זמן היא מה שמראה השעון (מכשיר המדידה).

כיוון שהזמן מתאר רצף של אירועים ותופעות, יחידות המידה שלו הוגדרו לאורך ההיסטוריה ע"י תופעות מחזוריות רציפות (שנה, יממה וכדומה) וע"י חלוקה שרירותית של תופעות אלה ליחידות קטנות יותר. השניה, שמהווה את היחידה הבסיסית במערכת SI המוכרת לנו, הוגדרה בעבר כחלק (1/86,400) מאורך יממה שמשית ממוצעת (כלומר זמן המחזור של סיבוב הארץ סביב צירה). לימים הסתבר שמשך זמן הסיבוב של הארץ סביב השמש אינו נשאר קבוע לאורך מיליוני שנים ולכן זו אינה הגדרה מדויקת מספיק. בשנות השישים עם התפתחות השעונים האטומיים השניה הוגדרה באופן מדויק יותר. משחרר האנושות האדם למד שמדידת הזמן עוזרת לו לתכנן ולשלוט בחייו. בני האדם המציאו מתקנים שונים למדידת זמנים קצרים יותר ויותר שאפשרו דיוק גדול יותר במדידת הזמן. במאה השלוש עשרה החלו להופיע באירופה שעונים מכניים שהוצבו בראש מגדלים. הדיוק של שעונים אלו היה עד כרבע שעה ליממה, במאה ה-15 הדיוק הגיע עד כ-12 דקות ביממה ובמאה ה-16 הדיוק הגיע לכ-8 דקות ביממה. במחצית המאה ה-17, עם הכנסת שעון המטוטלת הדיוק הגיע לרמה של 10 שניות ביממה. לשם השוואה – הדיוק של השעון האטומי באמצעותו מגדירים את יחידת השניה התקנית, הוא שנייה אחת ב-30 מיליון שנים.

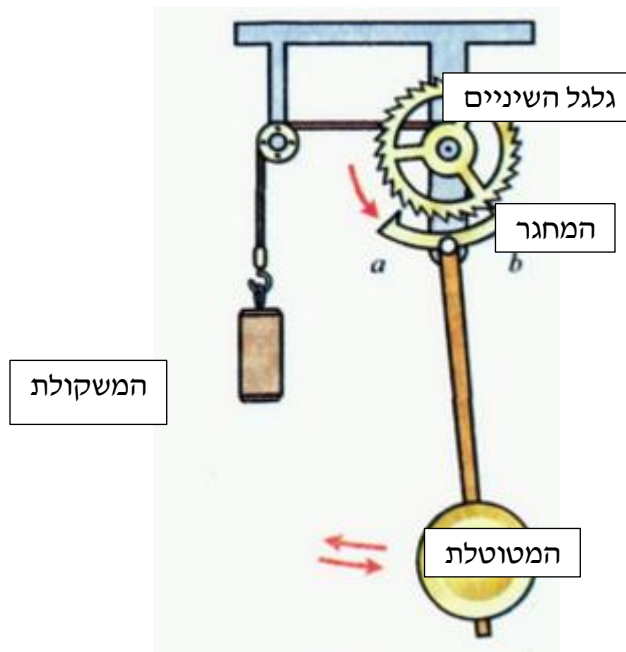
### הסבר אינטואיטיבי על עקרון העבודה של שעון מטוטלת

כדי לבנות את מכשיר המדידה ראשית יש להבין את עיקרון העבודה של שעון מטוטלת. בבסיס כל שעון עומדת תופעה מחזורית בעלת זמן מחזור קבוע שמתקיימת לאורך זמן. במקרה של שעון מטוטלת מדובר בתנועה המחזורית של המטוטלת.

כאשר תולים משקולת על חוט ומסיטים אותה משיווי המשקל נוצרת מטוטלת. תנועת המטוטלת מחזורית, בעלת זמן מחזור קבוע, ואילו לא היה חיכוך במערכת, התנועה הייתה מתקיימת לנצח. כיוון שקיים חיכוך הן של החוט בציר התנועה והן של המטוטלת עם האוויר, האנרגיה המכנית קטנה ובהדרגה התנועות מרוסנות עד לעצירה מלאה של השעון. מסיבה זו כדי לבנות שעון מטוטלת עלינו להוסיף למטוטלת שנבנה גם מנגנון שיכניס למערכת אנרגיה כדי להמשיך ולקיים את התנועה.



איור 1 מתאר את באופן סכמתי מנגנון של שעון מטוטלת דומה לזה שתבנו. מקור האנרגיה שיכניס אנרגיה מכנית למטוטלת במהלך התנודה הוא משקולת שיורדת מטה ובמהלך הירידה מוסרת את אנרגיית הגובה שלה למטוטלת. מסירת האנרגיה למטוטלת תתבצע באמצעות גלגל שיניים ומתקן הנקרא "מחגר" הפועל בצמוד לגלגל שיניים. המשקולת היורדת מסובבת את גלגל השיניים. כשגלגל השיניים פוגע בנקודה a של המחגר, גלגל השיניים דוחף את המחגר וכך נמסרת אנרגיה למטוטלת. הפגיעה של גלגל השיניים בנקודה b של המחגר מאטה את תנועת המשקולת מטה כך שירידתה מתבצעת בפעימות קבועות, ולכן בקירוב בכל זמן נתון נמסרת למטוטלת מנה קבועה של אנרגיה. האיור מתאר רק את המנגנון. המנגנון צריך להיות מורכב על בסיס יציב שיחזיק את כל המרכיבים של השעון.



איור 1. תיאור סכמטי של שעון מטוטלת

במכשיר שתבנו מחומרים מתכלים הבסיס היציב לשעון יהיה בקבוק עם מים או חול בתוכו. כדי לבנות ציר סיבוב עם חיכוך קטן נשתמש בשיפוד מושחל בתוך קשית שתייה. זרוע המטוטלת תהיה שיפוד עץ, והמשקולת המתנוודדת בקצה הזרוע תהיה מטבע של 10 אגורות. את גלגל השיניים נבנה מקרטון קשיח ואת המחגר נבנה משיפודי עץ.

## החומרים הדרושים לבניית המכשיר

- בקבוק שתייה קלה + כוס המלאה מים
- 4 אטבים משרדיים גדולים
- 6 שיפודים
- 2 מקלות רופא
- 6 קשיות שתייה
- אקדח דבק חם
- סרגל באורך 30 ס"מ לפחות
- כלי כתיבה
- מספריים
- 6 מטבעות של 10 אגורות
- סטופר (אפשרי בנייד)

בדקו שכל החומרים נמצאים ברשותכם.

## הוראות בנייה

### בניית בסיס יציב

סמנו בעזרת טוש, פס בגובה אחיד מהשולחן ובעזרת המספריים גזרו לאורך הקו, כך שישאר בידכם בסיס עליו יהיה ניתן להרכיב את ציר הסיבוב של המטוטלת.

ניתן ליצור שבלונה בעלת גובה אחיד ביחס לבסיס השולחן, כגון אורך של מקל הרופא כדי לסמן את הקו אותו תרצו לגזור.

הבקבוק ישמש אותנו בתור הבסיס עליו יונח ציר הסיבוב של המטוטלת. כדי שהשעון יעבוד כהלכה ציר זה חייב להיות מאוזן ולכן יש להקפיד על חיתוך הבקבוק בגובה אחיד.



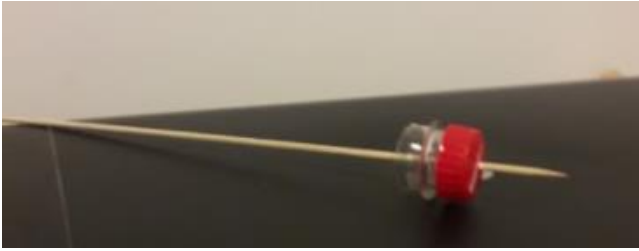


סמנו קו לרוחב הבקבוק שבידכם במרחק 7 ס"מ משפת הבקבוק. על גבי הקו שסימנתם, בעזרת המספריים, צרו שני קדחים קטנים, אחד מול השני (לאורך הקוטר הדמיוני של שפת הבקבוק). דאגו לכך שקוטר החורים יאפשר לקשית שתייה לעבור דרכם. (חשבו כיצד תעשו זאת, כלומר כיצד תוודאו ששני הקדחים נמצאים אחד מול השני. רמז: ניתן להשתמש בעזרת שני שיפודים. הצמידו שיפוד אחד אל הקדח הראשון שיצרתם, כך שיעמוד בניצב לשולחן. **הצמידו את עיניכם אל הקדח** ותוך כדי כך מקמו שיפוד נוסף מצדו השני של הבקבוק כך שהשיפוד הראשון מסתיר את השיפוד השני).

השחילו קשית דרך החורים ומדדו את גובה קצות הקשית מהשולחן וודאו שגובהם זהה.



הצמידו קשית שנייה אל שפתו העליונה של הבקבוק במקביל לקשית התחתונה. ודאו שגובהי שני הקצוות של הקשית ביחס לרצפה/שולחן שווים. ניתן לוודא שהקשית העליונה מקבילה לתחתונה ע"י הסתכלות על הקשיות מלמעלה, ובדיקה האם הקשית העליונה מסתירה לגמרי את הקשית התחתונה. הדביקו את הקשית לבקבוק בעזרת דבק חם.



בעזרת מספריים גזרו את פיית  
הבקבוק עם הפקק. נקבו את הפקק  
במרכזו בעזרת המספריים והשחילו  
בחור שיצרתם שיפוד (ראו תמונה).  
החוט של המשקולת ייכרך סביב  
מתקן זה.

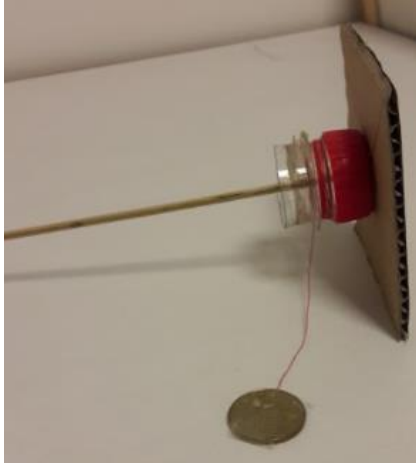
חישבו כיצד תמצאו את מרכז  
הפקק,  
וודאו שהצלחתם להעביר את  
השיפוד במרכז הפקק.



גלגל השיניים שלנו יהיה מרובע  
(כלומר יהיו לו רק 4 שיניים). מתוך  
הקרטון שברשותכם גזרו באופן  
מדויק ריבוע שאורך צלעו 8.0 ס"מ.

סמנו את מרכז הריבוע, בעזרת  
נקודת חיתוך האלכסונים.

העבירו את השיפוד דרך החור וגזרו  
את החלק הבולט של השיפוד. הניחו  
את הריבוע על השולחן והדביקו  
בעזרת דבק חם את הפקק למרכז  
הריבוע. יש לוודא שהשיפוד ניצב  
לריבוע.



גזרו חוט באורך ארוך יותר מגובה השולחן. בעזרת נייר דבק חברו לקצה החוט שלוש מטבעות של 10 אגורות. מטבעות אלה ישמשו כמשקולת. הדביקו את קצה החוט השני אל הפקק, וגלגלו את החוט על גבי הפיה של הבקבוק.



השחילו את הציר עם המשקולת וגלגלו השיניים אל הקשית התחתונה בבקבוק.



גזרו באופן מדויק מהקרטון  
שברשותכם ריבוע נוסף שצלעו 3.0  
ס"מ.

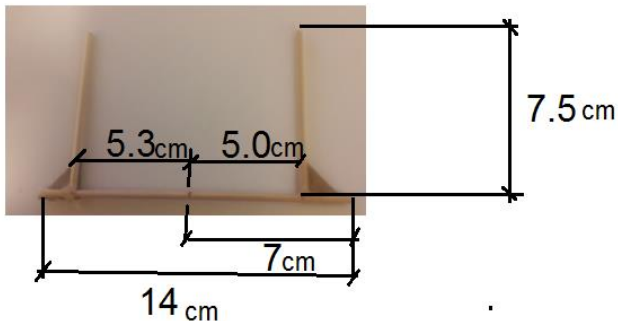
סמנו את אלכסון הריבוע וגיזרו  
לאורכו, כך שתקבלו שני משולשים  
ישרי זווית.

בחרו שני שיפודים ישרים עד כמה  
שאפשר. הדביקו בעזרת דבק חם  
את שני השיפודים לאורך ניצבי  
המשולש כך שהשיפודים יהיו נצבים  
זה לזה. הדביקו את המשולש השני  
בצד השני (סנדוויץ).

בקצה של אחד השיפודים חברו  
בעזרת נייר דבק שתי משקולות של  
מטבע של 10 אגורות. זרוע  
המטוטלת תהיה השיפוד אליו  
מחוברות המשקולות, וציר הסיבוב  
של המטוטלת יהיה השיפוד השני.

מלאו את הבקבוק במעט מים, כך  
שיווצר בסיס יציב, והשחילו את  
המטוטלת העשויה משני השיפודים  
אל תוך הקשית העליונה.

גזרו שיפוד לאורך 14.0 ס"מ, וסמנו  
את מרכז השיפוד.  
סמנו מרחק של 5.0 ס"מ מימין  
למרכז השיפוד ומרחק 5.3 ס"מ  
משמאל למרכז השיפוד. חוסר  
הסימטריה מכוון. הסיבה היא שצד  
אחד של המחגר עוצר את התנועה  
והצד השני דוחף את המטוטלת.



גזרו באופן מדויק ריבוע שאורך צלעו 2.0 ס"מ. סמנו את אחד האלכסונים וגזרו את הריבוע לאורך האלכסון כך שיתקבלו שני משולשים ישרי זווית.

הדביקו כל אחד מהמשולשים במרחקים המסומנים על השיפוד, כך שהמרחק בין ניצבי המשולשים יהיה 10.3 ס"מ (5.3+5.0, ראו את התמונה למעלה). יש להקפיד ששני המשולשים יהיו באותו מישור (הניחו על השולחן ובדקו).

גזרו משיפוד אחר שני קטעים שאורך כל אחד מהם הוא 7.5 ס"מ.

הדביקו כל אחד מקטעי השיפודים לאורך ניצבי המשולשים כך שהמרחק ביניהם יהיה 10.3 ס"מ והם יהיו ניצבים לשיפוד שאורכו 14 ס"מ (ראו את התמונה למעלה).



בעזרת דבק חם הדביקו את מרכז המחגר שסימנתם אל זרוע המטוטלת במרחק 9.5 ס"מ מתחת לציר המטוטלת, בניצב לציר המטוטלת. חזקו את החיבור בעזרת ריבוע קרטון קטן.

המחגר צריך להיות ממוקם בחלק התחתון של גלגל השיניים (ראו תמונה).

נסו להפעיל את השעון. אם יש תקלה אנא פנו לעזרה.

בשעון המטוטלת שלכם, תוכלו להמיר את אורך החוט המשתחרר לזמן.



## בניית מד מרחק

### מבוא – הסבר אינטואיטיבי על עקרון העבודה של המכשיר

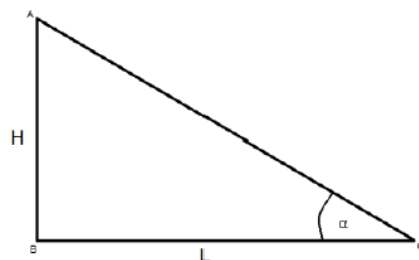
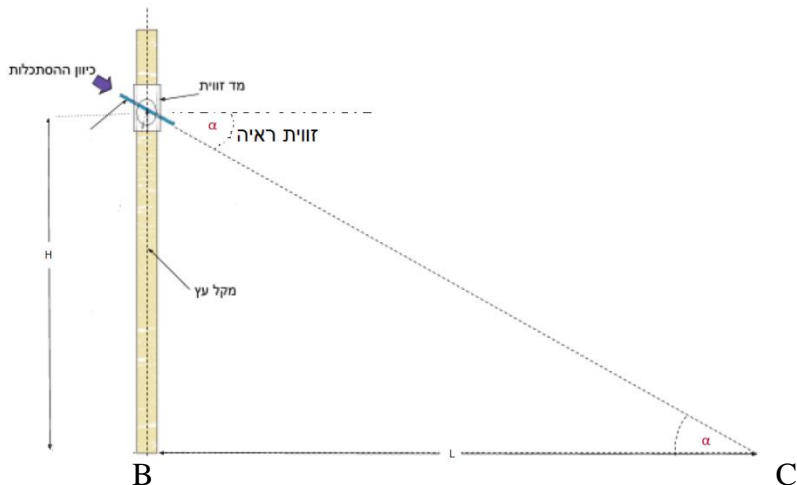


מד המרחק שתבנו הינו אנלוגיה מכאנית לאפליקציה Distance Meter. הוא מאפשר למדוד מרחק באמצעות מדידה של זווית ההטיה של המבט מהאופק.

אנו מודדים מרחקים בין נקודות ביחידות מידה של אורך. אורך הוא גודל בסיסי בפיזיקה. יחידת המידה הבסיסית למדידת אורך היא מטר. במקור הוגדר המטר בשנת 1791 על ידי האקדמיה הצרפתית למדעים כחלק ה-10,000,000 של המרחק על פני כדור הארץ מהקוטב הצפוני עד לקו המשווה לאורך האורך שעובר דרך פריז. ב-1795 אימצה צרפת את המטר כיחידה הרשמית למדידת מרחק. חוסר ודאות בנוגע לדיוקה של מדידת המרחק הנדון הוביל את הלשכה הבינלאומית למידות ולמשקלות להגדיר מחדש את המטר. כיום הגדרת המטר מתבססת על מהירות האור. המטר מוגדר כמרחק שעובר האור בריק, בזמן של  $1/299,792,458$  שנייה.

עקרון העבודה של מד המרחק נשען על תכונות גיאומטריות של משולש ישר זווית.

עבור גובה  $H$  קבוע, לכל זווית  $\alpha$  קיימת צלע  $L$  מתאימה. אם נרצה למדוד את המרחק  $L$  בין הנקודה  $C$  לנקודה  $B$ , נוכל להתבונן אל הנקודה  $C$  מנקודה שנמצאת מעל נקודה  $B$  (ראו תרשים) אם נדע את זווית הראייה, והגובה מעל הנקודה  $B$  ממנו אנו מודדים אותה, נוכל להסיק ממידע זה את המרחק.



## החומרים הדרושים לבניית המכשיר

- מוט עץ שאורכו כמטר שמונים ס"מ
- קשית שתייה
- מד זווית
- חוט
- אומים
- מטר
- נעץ/מסמר/סיכה
- כלי כתיבה
- מספריים
- סלטייפ
- מחשבון

בדקו שכל החומרים נמצאים ברשותכם.

## הוראות בנייה

הדביקו בעזרת סלטייפ את קשית השתייה לאורך ציר האפס של מד הזווית.



חברו אום אל חוט תפירה וקשרו את הקצה השני של החוט למרכז מד הזווית. מערכת החוט והאום ישמשו אותנו כאנך בנאים על מנת להבטיח אנכיות לרצפה.

חברו את מרכז מד הזווית בעזרת נעץ או מסמר אל מוט העץ בגובה עיני הצופה.

יש לוודא שחוט התפירה והמשקולת משוחררים כלפי מטה, ומד הזווית יכול להסתובב.





### כיצד מודדים מרחק בעזרת המכשיר?

- מציבים את המקל כך שאנך הבנאים יתלכד עם הקו שסימנתם (או עם קצה המוט אם הסיכה מודבקת בדבק חם).
- מסתכלים אל תוך קשית השתייה ומכוונים אותה אל נקודה על הריצפה שאת המרחק שלה מבקשים למדוד.
- מודדים בעזרת מד זווית את הזווית  $\alpha$  הנוצרת בין אנך הבנאים לבין האנך לקשית (ראו תמונה).

במד המרחק שלכם, תוכלו להמיר את זווית המדידה למרחק.

## בניית מאזני כפות

### מבוא - הסבר אינטואיטיבי על עקרון העבודה של מאזני הכפות

מאזני הכפות משמשים למדידת מסה. נוכל לחשוב על מסה באופן אינטואיטיבי כעל מדד לכמות החומר. בהמשך לימודיכם תלמדו על הגדרות יותר מדויקות למושג. יחידת המידה של מסה היא ק"ג, גרם וכדומה. בשפה היומיומית איננו מבחינים בין מסה ומשקל - אנו מתארים גוף עם מסה גדולה כגוף עם משקל כבד. בפיזיקה ההבחנה בין השניים חשובה כי הם מתארים דברים שונים. כוח הכבידה בו מושך כדור הארץ גופים הנמצאים בקרבתו גדול יותר ככל שמסת הגוף גדולה יותר. ניוטון התייחס לכוח זה כאל המשקל של הגופים והראה שקיים יחס ישר בינו ובין המסה. לכן, הרבה פעמים אנו מודדים את מסת הגוף באמצעות מדידת המשקל שלו.

עקרון העבודה של מאזני הכפות דומה לזה של הנדנדה הפשוטה בגן השעשועים או של המנוף. מסות זהות שמונחות במרחק שווה מהציר מאזנות אותו. יחד עם זאת ניתן לאזן במנוף מסה קטנה בעזרת מסה גדולה אם נקרב את המסה הכבדה אל הציר. כיוון שאנו מאזנים מסה אחת באמצעות מסה אחרת, מאזני הכפות מודדים מסה, ולא משקל, אבל הם לא היו עובדים אם לא היה כוח כבידה שמושך את המסות לכיוון הארץ. אתם מוזמנים לחקור את עקרון העבודה של המנוף וההבדלים בין מסה ומשקל ושאלות נוספות באמצעות המאזניים שתבנו בתום העבודה.



### החומרים הדרושים לבניית המכשיר

- בקבוק מים + כוס המלאה מים
- 4 אטבים משרדיים גדולים
- 2 כוסות שתייה חד פעמיות מנייר
- שיפוד
- 10 מקלות רופא
- קשיות שתייה
- אקדח דבק חם
- סרגל באורך 30 ס"מ לפחות
- כלי כתיבה
- מספריים
- מטבעות של 10 אגורות שיהוו יחידות מידה
- נייר מילימטרי
- משקל דיגטלי
- דפי ניירות A4

בדקו שכל החומרים נמצאים ברשותכם.

### החלקים העיקריים של מאזני הכפות

- בסיס יציב - בקבוק מלא מים בתור הבסיס של המאזניים.
- ציר סיבוב עם חיכוך קטן – שיפוד שיושחל לפיסה מקשית שתיה על מנת לצמצם את החיכוך במהלך הסיבוב.
- קורה ארוכה – מקלות רופא.

### בניית בסיס יציב למאזניים



סמנו על הבקבוק בעזרת טוש, פס בגובה אחיד מהשולחן ובעזרת המספריים גזרו לאורך הקו, כך שישאר בידכם בסיס עליו יהיה ניתן להרכיב את ציר הסיבוב.

ניתן ליצור שבלונה בעלת גובה אחיד ביחס לבסיס השולחן, כגון אורך של מקל הרופא כדי לסמן את הקו אותו תרצו לגזור.

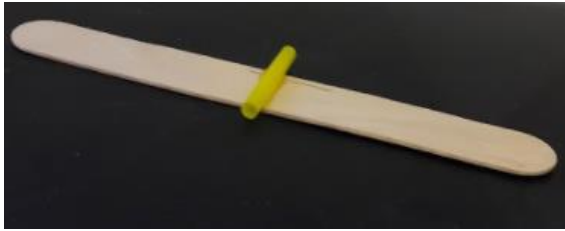
הבקבוק ישמש אותנו בתור הבסיס עליו יונח הציר של המאזניים. כדי שהמאזניים יעבדו כהלכה ציר זה חייב להיות מאוזן ולכן יש להקפיד על חיתוך הבקבוק בגובה אחיד.

### יצירת קורה הנשענת על ציר סיבוב



וודאו שגובה הבקבוק שגזרתם אחיד לכל אורך ההיקף הבקבוק.

גזרו שני פתחים הרחבים, זה מול זה, ברוחב גדול מעט מרוחב מקל הרופא, כך שהמקל יוכל לנוע בחופשיות במרווח שיצרתם.



גיזרו מהקשית קטע שאורכו רחב מעט מרוחב מקל הרופא והדביקו קטע זה במרכז המקל לרוחב המקל ובמאונך לפאותיו. כדי להבטיח ניצבות של הקש למקל העזרו בפינה ישרה של סרגל.



גזרו את השיפוד למחציתו והשחילו את הקשית אל השיפוד. הדביקו את השיפוד אל שפת הבקבוק בעזרת דבק חס, כך שמקל הרופא יוכל להתנדנד באופן חופשי.

חשוב להקפיד שציר

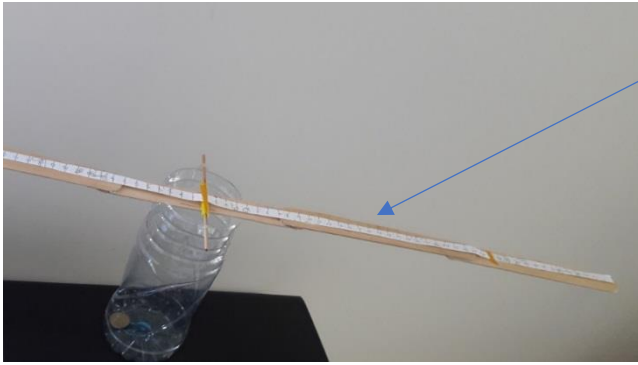


המאזניים (השיפוד) אינו נטוי בשיפוע בשל גבהים שונים של הבקבוק!!



האם מקל הרופא שלכם מאוזן? אם אינכם מצליחים לאזן את המערכת נסו למצוא את הבעיה ולתקן אותה. במידה ולא הצלחתם אנא פנו לעזרה.

במצב בו המערכת מאוזנת צירו בטוש קו על המוט ועל הקשית על מנת לסמן את המצב בו המערכת מאוזנת.



האריכו את זרועות המכשיר כך שאורך כל זרוע יהיה גדול מ 41 ס"מ וקטן מ 44 ס"מ. הקפידו על סימטריה ביחס לציר הסיבוב.



בעזרת האטבים המשרדיים צרו ידיות לכוסות.



חברו את הכוסות במרחק 40 ס"מ מהציר, ואזנו את המערכת.

במאזני הכפות שלכם, תוכלו להמיר את את המרחק מציר הסיבוב של מטבע המנוחת על הצרוע למסה. אחת הכוסות תשמש למסה הנמדדת. ואילו מטבע של 10 א"ג אשר תונח על הזרוע השנייה תשמש לאיזון הזרוע.

## בניית מכשיר למדידת מסה בתנאי חוסר משקל

### מבוא - הסבר אינטואיטיבי על עקרון העבודה של מד המסה

מד המסה שתבנו מדמה את אופן מדידת המסה של אסטרונוטים בתחנות חלל – ראו בסרטון

<https://www.youtube.com/watch?v=8rt3udip714>

נוכל לחשוב על מסה באופן אינטואיטיבי כעל מדד לכמות החומר. בהמשך לימודיכם תלמדו על הגדרות יותר מדויקות למושג. כאשר תולים גוף על קפיץ התלוי על וו, כוח הכבידה של כדור הארץ מושך את הגוף כלפי מטה והגוף מושך יחד איתו את הקפיץ. מכיוון שצדו השני של הקפיץ מחובר לוו הקפיץ מתארך. התארכות הקפיץ נמצאת ביחס ישר לכוח המופעל על הקפיץ. קיים קשר ישר בין כוח הכבידה בו מושך כדור הארץ גופים הנמצאים בקרבתו לבין מסתם של הגופים  $W=mg$  כאשר  $W$  הוא המשקל,  $m$  היא מסת הגוף,  $g$  היא תאוצת הנפילה החופשית). ניוטון התייחס לכוח זה כאל המשקל של הגופים. בשל יחס ישר זה בין המסה למשקל הגוף, אנו יכולים למדוד מסה דרך מדידת משקל, ולכן מאזני הקפיץ המתוארים למעלה יכולים לשמש אותנו למדידת מסה. זהו העיקרון של מאזני האמבט הפשוטים, אלא ששם אנו דוחסים את הקפיץ במקום למתוח אותו.

אם נחזור על הניסוי של תליית מסה על קפיץ המחובר לוו במקום בו אין כוח הכבידה, הגוף לא ימשך מטה ולכן הקפיץ לא ימתח. מכאן שבתנאים של חוסר כבידה (או חוסר משקל) לא נוכל למדוד מסה באמצעות מד משקל, או במקרה הפרטי שלנו מאזני קפיץ שמוודדים מסה דרך השינוי באורך הקפיץ. תופעה דומה תתרחש גם בתנאים בהם יש כבידה, אם במקום לתלות את הקפיץ על וו, נעזוב אותו ואת המסה התלויה וניתן לשניהם ליפול חופשית כלפי הארץ. מכיוון ששני צדי הקפיץ והמסה נופלים באותה תאוצה הקפיץ לא ימתח ולכן יראה משקל השווה לאפס. מאזני הקפיץ אינם מתאימים למדידת מסה גם בתנאים אלה.

במעבורת חלל האסטרונוטים והמעבורת נופלים חופשית כלפי הארץ. מסיבה זו האסטרונוטים לא נופלים ביחס למעבורת (כי לשניהם יש אותה תאוצה ביחס לארץ). לכן האסטרונוטים מרחפים במעבורת בתחושה של חוסר משקל, למרות שעליהם ועל החללית פועל כוח הכבידה. מכאן שלא נוכל למדוד את מסת האסטרונוטים במעבורת בעזרת מאזניים שמוודדות מסה באמצעות מדידת משקל.

ישנה חשיבות רבה למעקב אחר מסת האסטרונוטים במעבורת החלל על מנת לשמור על בריאותם. מאזני הקפיץ שתיארנו למעלה או מאזני הכפות המוכרים שלנו לא יכולים לשמש אותנו לשם כך, כי בשני המקרים כדי שהמאזניים יעבדו צריך כוח שימשוך את המסה כלפי מטה.

אחת מהתכונות שמאפיינות קפיץ היא שכאשר תולים עליו מסה ומושכים אותה ממצב שיווי משקל ומשחררים מתחילות תנודות (כפי שראיתם בסרטון). בהמשך לימודיכם תלמדו שזמן המחזור של התנודות קבוע ותלוי במסת הגוף ובקבוע הקפיץ (מדד לכמה הקפיץ "מתנגד" למתיחה או כיווץ שלו). תנודות אלה יתקיימו גם בתנאים של חוסר משקל שכן מה שמקיים אותן הוא הכוח שמפעיל הקפיץ.



תכונה זו היא שמאפשרת למדוד את מסת האסטרונוטים בעזרת מטוטלת קפיצית בחלל. מסת האסטרונוטים מחושבת מתוך ידיעת זמן המחזור של התנודה וקבוע הקפיץ.

אתם מתבקשים לבנות מטוטלת קפיצית שיכולה למדוד בתחום שיוגדר לכם ע"י המורה (תלוי בקפיצים שיש לכם במעבדה).

### החומרים הדרושים לבניית המכשיר

- כן יציב
- חיבורים ומתלים לכך
- כליבה
- קפיץ בעל קבוע קפיץ ידוע מראש
- נושא משקולות ומשקולות
- סרט מדידה/סרגל
- בדקו שכל החומרים נמצאים ברשותכם.



### הוראות הבניה

- חברו בעזרת הכליבה את הכן אל השולחן.
- חברו מתלה לקפיץ.
- תלו את הקפיץ ועליו את נושא המשקולות.

במכשיר שלכם, תוכלו להמיר את זמן המחזור של תנודות המשקולת למסה.

## 5. כיוול מכשירי המדידה

כדי שתוכלו להשתמש במכשיר המדידה שבניתם, יש לכייל אותו.

**כיוול:** הפעולה שבסופה הוריית המכשיר משקפת את הערך הנמדד.  
לדוגמה המספר 10 בסקאלה של סרגל משקף אורך של 10 ס"מ, המספר 10 במאזני האמבט משקף משקל של 10 ק"ג.  
פעולת הכיוול קושרת בין הוריית המכשיר לגודל אותו המכשיר בא למדוד ומספקת אומדן לערכים של מאפיינים נוספים של המכשיר עליהם נלמד בהמשך.

הכיוול מתבצע באמצעות השוואה לגדלים שאנו יודעים את ערכם מראש (ערכי ייחוס). אלה גדלים שערכם והדיוק בתוצאת המדידה של ערך זה ידועים ומוסכמים. ערכי הייחוס יכולים להגיע מתוך מדידה של מכשיר מדידה מכויל אחר שאנו סומכים על דיוקו (למשל שעון העצר בטלפון, סרגל וכד'), או ערכי ייחוס מוסכמים ע"י הקהילה המדעית (למשל ערכים של קבועים פיזיקאליים, הגדרת המטר וכד'). בקהילה המדעית ישנם מוסדות שאחראים על קביעת הגדלים המוסכמים. באמצעות השוואה לערכי גדלים ידועים מראש (ערכי ייחוס) תוכלו ליצור סקלה למכשיר או גרף כיוול אשר ישקפו את הערך הנמדד.

✓ בחרו את ערכי הייחוס שבאמצעותם תכיילו את המכשיר.  
רשמו את בחירתכם: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## קביעת טווח המדידה של המכשיר

כל מכשיר מדידה מאופיין ע"י טווח מדידה שמוגדר ע"י היצרן.

**טווח המדידה של המכשיר:** תחום הערכים שהמכשיר מסוגל למדוד.

סקלת המכשיר תייצג את טווח המדידה של המכשיר. טווח המדידה יכול להיות מוגבל בגלל ממדים פיזיים של המכשיר, בגלל מגבלות בטיחות, או ע"י תחום הערכים של הגדלים הידועים שעומדים לרשותכם לצורך הכיוול ושיקולים נוספים.

✓ קבעו מהו טווח המדידה של המכשיר שלכם (זכרו לציין יחידות מידה)

✓ הסבירו את השיקולים שלכם בקביעת טווח המדידה של המכשיר

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## בנית טבלה מקשרת בין ערכי הייחוס להוריית המכשיר

✓ הכיול הראשוני של המכשיר יתבצע באמצעות גדלים בעלי ערך ידוע מראש, שמפוזרים על פני כל טווח המדידה של המכשיר שלכם. בנו טבלה שקושרת בין ערכי הגדלים הללו והוריית הסקאלה של המכשיר.

דוגמאות: בשעון המים נמדוד את גובה המים (הוריית המכשיר) המתאים לפרקי זמן ידועים מראש (ערכי הייחוס שמראה למשל שעון העצר בטלפון); במאזני הכפות נמדוד את המרחק של המסה המאזנת מציר הסיבוב של מאזני הכפות (הוריית המכשיר) שמתאים לערכי המסה הנמדדת (ערכי הייחוס שמראים למשל מאזניים דיגיטליים); וכך הלאה. רכזו את מדידותיכם בטבלה בגיליון האלקטרוני. הקפידו על רישום כותרות לטבלה (הוריית המכשיר, ערך הייחוס) וציון יחידות מידה.

✓ חיזרו על המדידות שנית, והוסיפו לטבלה עמודה נוספת שתרכז את תוצאות מדידה זו. חיזרו על התהליך מספר פעמים נוספות (לפחות עוד שלוש פעמים) והוסיפו בכל פעם עמודה לטבלה שמרכזת את התוצאות.

✓ מה תוכלו להסיק ממדידות אלה?

---

---

---

כאשר חוזרים על מדידה מסוימת מספר פעמים, תוצאותיה יכולות להיות שונות במקצת זו מזו. הסיבה נעוצה בשינויים אקראיים בתנאי המדידה, במבנה המכשיר, באדם המודד ובסיבות נוספות שביחד יוצרות פיזור אקראי של התוצאות. חשוב להבין שברמה העקרונית אי אפשר למדוד ערך בדיוק אין סופי ובכל תוצאה של מדידה קיימת אי וודאות.

**אי הוודאות של תוצאות המדידה היא מדד כמותי (מספר חיובי) שמייצג את פיזור הערכים המיוחסים לגודל הנמדד.**

המדידות החוזרות שעשיתם להוריית המכשיר עבור כל אחד מערכי הייחוס יאפשרו לכם להעריך את תוצאת המדידה ואת אי הוודאות בהוריית המכשיר.

קביעת תוצאת מדידה של גודל מסוים מתוך סדרה של מדידות חוזרות תעשה ע"י חישוב הממוצע החשבוני.

**הממוצע החשבוני** של ערכי מדידות חוזרות ישקף טוב יותר את הערך האמיתי של הגודל הנמדד מאשר מדידה בודדת, כיוון שאם נבצע מדידות מרובות של אותו ערך, יהיו פעמים בהן ערך המדידה הבודדת יהיה גדול מהערך האמיתי ויהיו פעמים בהן ערך זה יהיה קטן יותר מהערך האמיתי.

חישוב הממוצע החשבוני:

אם  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  הן תוצאות מדידות חוזרות של אותו גודל, אזי הממוצע החשבוני של ערכים

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{אלו יהיה:}$$

✓ הוסיפו לטבלה עמודה נוספת, שבה תחשבו את הממוצע החשבוני של המדידות החוזרות שעשיתם.

אם מבצעים מספר רב של מדידות חוזרות נוכל **לאמוד את אי הוודאות בתוצאת המדידה** בעזרת מדדי פיזור סטטיסטיים כגון **סטיית תקן**<sup>1</sup>. אומדן פחות מדויק לאי הוודאות של תוצאת המדידה הוא הערך המוחלט של מחצית הפרש בין הערך הגדול ביותר והקטן ביותר של המדידה. בביה"ס התיכון נוכל להחליט להסתפק באומדן זה, ולחכות עם חישוב סטיית התקן ללימודי המשך, בפרט משום שלרוב אנו מבצעים מספר מאד קטן של מדידות חוזרות.

✓ הוסיפו לטבלה עמודה נוספת לאומדן לאי הוודאות בהוריית הסקאלה של המכשיר לכל אחד מערכי הייחוס בו השתמשתם.

כשאנו מדווחים על תוצאות של מדידה צורת הכתיבה צריכה לשקף הן את ערך הגודל המדוד (מספר ויחידת מידה) והן את אי הוודאות במדידה של גודל זה.

<sup>1</sup> **סטיית התקן** היא מדד סטטיסטי (אחד מיני רבים) לתיאור הפיזור של ערכי קבוצת נתונים סביב הממוצע שלהם.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{הביטוי המתמטי לסטיית התקן } \sigma \text{ הוא:}$$

- שימו לב שבמקום לעשות ממוצע חשבוני על הסטייה של כל מדידה מהממוצע, ביטוי היכול לקבל ערך שלילי או חיובי, אנו ממצעים על ריבוע הסטייה, כלומר תמיד על ערכים חיוביים.
- הוצאת השורש מהביטוי גורמת לו להיות באותן יחידות של הממוצע.
- תוכלו לחשב את סטיית התקן בעזרת הגיליון האלקטרוני (הפונקציה STDEV).

הרחבה למתעניינים: כאשר התפלגות הנתונים הנמדדים (הפונקציה שמתארת את ההסתברות לקבלת ערך מסוים למדידה כתלות בערך של מדידה זו) הינה התפלגות נורמאלית (התפלגות סימטרית סביב הממוצע, בעלת שיא אחד ומספר תכונות נוספות) אזי: 68% מהערכים שנמדוד במדידות חוזרות יתקבלו במרחק שאינו עולה על סטיית תקן אחת מהממוצע, ו-95% מהם יתקבלו במרחק שאינו עולה על שתי סטיות תקן מהממוצע. כדי שסטיות התקן שנחשב לתוצאות המדידה של מספר סופי של מדידות חוזרות, תשקף את סטיית התקן בהתפלגות נורמלית, יש צורך במספר רב של מדידות חוזרות (הרבה יותר מ-5!).

כל הזכויות שמורות ©. קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

הספרה משמעותית של ערך מדוד היא הספרה הקטנה ביותר של המספר שמייצג את הערך של גודל זה. ספרה זו משקפת את אי הוודאות בתוצאת המדידה. לכן, ספרות קטנות יותר ממנה אינן בעלות משמעות פיזיקאלית. צורת הכתיבה המקובלת לדיווח על תוצאת מדידה:

אם  $X$  מייצג גודל הפיזיקאלי,  $\Delta X$  מייצג את אי הוודאות בתוצאת המדידה של גודל זה. לכן תוצאת המדידה תירשם באופן הבא:  $X \pm \Delta X$  יחידה. לדוגמה: תוצאה של מדידת אורך:  $20.0 \pm 0.1$  ס"מ.

✓ קבעו את תצוגת המספרים בטבלה כך שהמספרים המוצגים בטבלה ישקפו את הספרה המשמעותית.

### בנית גרף המקשר בין ערכי הייחוס להוריית המכשיר

✓ צרו גרף פיזור לנקודות של ערך הייחוס כתלות בהוריית הסקאלה (הממוצע החשבוני של המדידות החוזרות).

○ הקפידו להוסיף כותרת מתאימות לגרף ולצירים ולציין בכל ציר את יחידות המידה.

✓ התאימו קו מגמה לפיזור הנקודות, ומצאו פונקציה מתמטית שמתארת את הקשר הזה בצורה הטובה ביותר (לא התאמה תיאורטית, אלא משוואה לעקום שעובר בקירוב הטוב ביותר דרך בין כל הנקודות).

✓ הוסיפו אל הנקודות בגרף את אי הוודאות של כל מדידה ( בעזרת Error Bars). צרפו את הגרף המתקבל אל מסמך זה.

✓ מה ניתן להסיק מקו המגמה שקיבלתם?

---



---



---

תלמיד מדד שתי מדידות אורך שונות וקיבל את התוצאות הבאות:

מדידה 1:  $1.0 \pm 0.5$  (cm)

מדידה 2:  $100.0 \pm 0.5$  (cm)

✓ איזו מדידה מדויקת יותר בעיניכם? מדוע?

---



---

המונח **אי הוודאות היחסית**, מתאר את היחס בין אי הוודאות בתוצאת המדידה לערך הגודל הנמדד. נהוג להציג את אי הוודאות היחסית באחוזים. נסמן גודל זה באות  $\delta$

$$\delta = \frac{\Delta X}{X} 100\%$$

מדידה בעלת אי וודאות יחסי קטנה יותר נחשבת למדידה מדויקת יותר. למעשה, אם מקפידים על כתיבה הערכים המספריים של המדידה רק עד **הספרה המשמעותית** ניתן לקבל אומדן לאי הוודאות היחסית בתוצאת המדידה כבר מקריאת הערך המדוד.

- ✓ הוסיפו עמודה נוספת לטבלה שלכם וחשבו בה את אי הוודאות היחסית בתוצאה של כל מדידה.
- ✓ מה ניתן ללמוד מעמודה זו? האם בתחומי מדידה מסוימים יש מדידות מדויקות יותר? האם ניתן לראות זאת גם דרך ה Error Bars?

---

---

---

---

ברכותינו - יצרתם למכשיר שלכם גרף כיוול!

**גרף כיוול:** גרף המופק במהלך פעולת הכיוול ומציג את הקשר בין ערך הגודל שהמכשיר מודד באופן ישיר לבין ערך הגודל שהוא מתוכנן למדוד (כלומר להצביע על ערכו). למשל במקרה של מאזני קפיץ פשוטים, המאזניים צריכים להראות את ערך המשקל של הגוף המונח עליהן, אבל המדידה הישירה היא מדידה של התארכות הקפיץ. גרף כיוול יראה את הקשר האמפירי בין המשקל המונח על המאזניים להתארכות הקפיץ עבור מאזני קפיץ ספציפיים.

## יצירת סקלה למכשיר

בחלק מהמכשירים ניתן ליצור סקלת מספרים שתציג את הערך המדוד. לשם כך נוכל להיעזר בביטוי המתמטי לקו המגמה שהעברנו לגרף ובאי הוודאות של תוצאות המדידה. אי הוודאות בהוריית הסקאלה

**נושר ההפרדה של המכשיר (רזולוציה)** מגדיר לנו את ההפרש המינימאלי בין שני גדלים מדודים שמכשיר המדידה מסוגל להבחין בו. למשל כושר ההפרדה של סרגל במדידת האורך הוא 1 מ"מ. אנו מתייחסים לגודל זה כאחד הגורמים לאי הוודאות במדידה, מכיוון שלא נוכל למדוד בסרגל בדיוק טוב יותר מ 1 מ"מ (כלומר לדייק עד חלקי המילימטר). כושר ההפרדה של המכשיר בא לידי ביטוי במרחק בין שנתות סמוכות.

קובעת לנו את המרווח המינימאלי שנוכל לקבוע בין שתי שנתות. שימו לב, שאין משמעות לשנתות שהרווח ביניהן קטן מכושר ההפרדה של המכשיר.

✓ כתבו מהו המרווח המינימאלי בין כל שתי שנתות סמוכות על הסקאלה של המכשיר לאורך טווח המדידה:

---

---

---

✓ ציינו מהו כושר ההפרדה של המכשיר (תרגמו את ההפרש בהוריית הסקאלה להפרש בגודל אותו בא המכשיר למדוד) לאורך כל טווח המדידה.

---

---

---

זכרו - אין דרך למדוד גודל פיזיקאלי בדיוק אין-סופי כיוון שלכל מכשיר מדידה יש כושר הפרדה סופי. ככל שנשפר את כושר ההפרדה של המכשיר כך אי הוודאות בתוצאות המדידה תקטן ונשפר את דיוק המדידה.

✓ צרו סקלה על גבי המכשיר שלכם. צרפו קובץ עם תמונה של המכשיר עם הסקלה שלו.  
✓ הסבירו את השיקולים שהפעלתם לצורך בניית הסקלה:

---

---

---

---

ישנם מכשירים שלא ניתן לבנות עליהם באופן פיזי סקלה. במקרה זה, המדידה באמצעותם תתבצע בעזרת גרף הכיול. לדוגמה, במד המרחק גרף הכיול מקשר בין זווית הראיה למרחק אותו אנו מבקשים למדוד.

שימו לב שפתרון של פונקציה מתמטית, או קריאה של ערך מגרף רציף, יכולים, לכאורה, לתת מספר מדויק עד אין סוף (אין סוף ספרות אחרי הנקודה). אולם, לדיוק זה אין משמעות פיזיקאלית, כיוון שכפי שראינו כושר ההפרדה של המכשיר מוגבל ובכל מדידה קיימת אי וודאות. נזכיר שהספרה משמעותית של ערך מדוד היא הספרה הקטנה ביותר של המספר המייצג את ערך זה. בין אם הנכם מסיקים את הערך

המדוד מתוך גרף כיוול, מתוך קריאה של סאקלה או מתוך חישוב מתמטי, הקפידו לא לרשום את גודל הערך בדיוק גדול מהספרה המשמעותית!!

✓ מהי הספרה המשמעותית שיש להתייחס אליה בגרף הכיוול שלכם? רשמו אותה על גרף הכיוול. אם יש הבדלים בין תחומים שונים של המדידה ציינו זאת במפורש.

✓ **הדפיסו את גרף כיוול והטבלה וצרפו אותם לחוברת.**



## 6. מדידה

המכשיר שבניתם מכויל. הנכם יודעים את טווח המדידה ואת כושר ההפרדה של המכשיר ומוכנים למדוד איתו!

קבלו מהמורה משימת מדידה של גודל פיזיקאלי שערכו ואי הוודאות שלו ידועים למורה אך אינם ידועים לכם.

נזכור שאנו מתייחסים לכושר ההפרדה של המכשיר כאחד הגורמים לאי הוודאות במדידה.

✓ רשמו את תוצאות המדידה שלכם: \_\_\_\_\_  
(האם הקפדתם לרשום את התשובה עם יחידות מידה, האם ציינתם את אי הוודאות של תוצאת המדידה שלכם? האם כתבתם את המספר עם ספרות משמעותיות?)

נזכור שאי הוודאות בתוצאות המדידה אינה מושפעת רק מכושר ההפרדה של המכשיר אלא מגורמים נוספים שיכולים להשפיע באופן אקראי על תוצאת המדידה (למשל הזווית בה אנו מסתכלים על הסקלה וכד'). כפי שראינו כדי לקבל אומדן לאי הוודאות במדידה יש לבצע מספר מדידות חוזרות ולמצע עליהן.

✓ חזרו על המדידה שלכם שוב כ 5 פעמים ורשמו את התוצאות

\_\_\_\_\_ : מדידה 1

\_\_\_\_\_ : מדידה 2

\_\_\_\_\_ : מדידה 3

\_\_\_\_\_ : מדידה 4

\_\_\_\_\_ : מדידה 5

✓ חשבו את הממוצע החשבוני של המדידות: \_\_\_\_\_

✓ חשבו את אי הוודאות של תוצאות המדידה: \_\_\_\_\_

✓ האם ערך זה גדול/ קטן/אותו סדר גודל ביחס לאי הוודאות בתוצאות המדידה שנובעת מכושר ההפרדה של המכשיר? \_\_\_\_\_

בכל מערך מדידה יש לזהות ולהעריך את השפעה של כל אחד מהגורמים על אי הוודאות בתוצאות המדידה. במידה וקיים גורם שאי הוודאות שלו דומננטית יותר, ניתן להתעלם מאי הוודאות של יתר הגורמים. לדוגמה אם כושר ההפרדה של המכשיר הוא הגורם הדומיננטי באי הוודאות של תוצאת המדידה, נוכל להתייחס רק לאי הוודאות הנובעת ממנו בלבד ולהתעלם מיתר הגורמים לאי הוודאות בתוצאות המדידה. כאשר אי הוודאות בתוצאות המדידה מושפעת מכמה גורמים שאי הוודאות במדידת כל אחד מהם היא מאותו סדר גודל, קיימת דרך מתמטית לשקלל את אי הוודאות הנובעת מכולם. בחוברת זו לא נעסוק בחישובים מסוג זה <sup>2</sup>.

<sup>2</sup> הדרכה לביצוע חישובים מסוג זה ניתן למצוא כאן:

Bell, S. (2001). A beginner's guide to uncertainty of measurement. Measurement good practice guide. National Physical Laboratory, UK. <https://www.dit.ie/media/physics/documents/GPG11.pdf>

כל הזכויות שמורות ©. קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים ו/או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

✓ רשמו את תוצאות המדידה שלכם: \_\_\_\_\_

✓ הסבירו כיצד חיבתם את אי הוודאות של תוצאות מדידה שלכם:

---

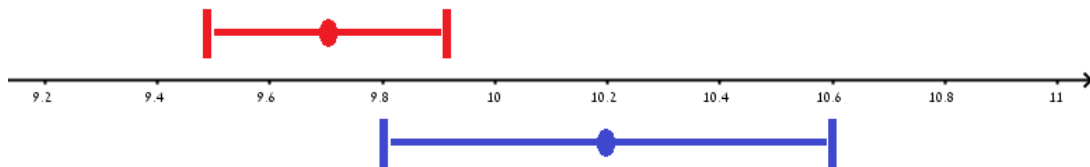
---

---

---

## השוואה בין תוצאות של שתי מדידות בלתי תלויות, או בין מדידה לערך תיאורטי צפוי

כיצד תוכלו להשוות בין שני גדלים? למשל, האם ערך של 9.7 שווה לערך של 10.2? לא ניתן לענות על שאלה זו ללא התייחסות ליחידות המידה של המספרים ולאי הוודאות במדידה. כמו כן, כמובן שלא נוכל להשוות שני מספרים המייצגים ערכים של גדלים פיזיקאליים שונים (למשל השוואה בין מסה ואורך). מסיבה זו הצגת ערך מספרי של מדידה תהיה תמיד ע"י מספר המייצג את הערך הכמותי, יחידת המידה שמאפיינת את הגודל הנמדד, וציון מפורש של אי הוודאות במדידה. חשיבו לדוגמה על שתי מדידות בלתי תלויות לאותו אורך. התוצאה של האחת היא  $9.7 \pm 0.2$  ס"מ ושל השנייה  $10.2 \pm 0.4$  ס"מ. נוכל להסיק שאין סתירה בין שתי המדידות כיוון שקיימת חפיפה בין תחומי אי הוודאות במדידת האורך שלהם.



איור 1. השוואה בין שני גדלים מדודים.

השוואה בין תוצאות של שתי מדידות בלתי תלויות או בין מדידה לערך יחוס תיאורטי, מתבצעת ע"י השוואת תחומי אי הוודאות בתוצאות המדידה. כאשר קיימת חפיפה בין תחומי אי הוודאות, ניתן להסיק שאין סתירה בין השניים, כלומר קיימת התאמה בין שתי המדידות, או בין המדידה והניבוי התיאורטי, בגבולות אי הוודאות בתוצאות המדידה.

✓ בקשו מהמורה את הערך (הידוע לו) של הגודל הפיזיקלי שמדדתם באמצעות המכשיר

✓ השוו בין תוצאת המדידה של המורה שנעשתה במכשיר מדידה מקצועי, לבין תוצאת המדידה שלכם במכשיר המדידה שבניתם. מה מסקנתכם?

---

---

---

---

✓ עמיתים שלכם התאכזבו לגלות שתוצאות המדידה לגודל הלא ידוע במכשיר המדידה שהם בנו אינן תואמות לתוצאות המדידה הבלתי תלויה של אותו גודל, שביצע המורה במכשיר מדידה מקצועי. העלו לפחות שתי השערות לסיבה לאי ההתאמה, והציעו מה ניתן לעשות כדי לפתור את הבעיה בכל מקרה.

---

---

---

---

---

---

---

---

### חישוב השגיאה במדידה

לעיתים קרובות כשאנו עושים ניסוי שבא לבחון השערה תיאורטית אנו משווים את תוצאת המדידה לערך יחוס.

**ערך הייחוס** הינו ערך של גודל פיזיקאלי שמשמש כבסיס להשוואה עם ערכים של גדלים אחרים מאותו סוג. ערך הייחוס הוא לרב ערך ידוע ומוסכם, בעל אי וודאות קטנה בתוצאות המדידה שלו.

כשאנו באים לבחון השערה תיאורטית, אנו בונים מערך מדידה שמתבסס על השערה זו ומודדים בעזרת מערך זה ערך של גודל פיזיקאלי אותו אנו יכולים להשוות לערך יחוס מוסכם וידוע. דוגמה לערכי ייחוס שאנו משתמשים בהם בלימודי הפיזיקה התיכונית: הערך הידוע של תאוצת הנפילה החופשית, מסה של גוף הנמדדת במאזניים דיגיטאליים וכדומה. להשוואה בין הערך הנמדד במערך המדידה וערך הייחוס אנו קוראים חישוב שגיאת המדידה.

**שגיאת המדידה** -- ההפרש בין הערך הנמדד וערך הייחוס.

כל הזכויות שמורות ©. קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים /או כהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה ללא מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

✓ רשמו את ערך הייחוס של המדידה שלכם (רישום מלא כולל אי הוודאות בתוצאות המדידה, אם הוא ידוע)

---

✓ רשמו את תוצאת המדידה שעשיתם (רישום מלא כולל אי הוודאות בתוצאות המדידה!)

---

✓ חשבו את שגיאת המדידה

---

---

---

✓ חשבו את שגיאת המדידה לכל אחת מהמדידות הבודדות שביצעתם :

שגיאת מדידה 1 : \_\_\_\_\_

שגיאת מדידה 2 : \_\_\_\_\_

שגיאת מדידה 3 : \_\_\_\_\_

שגיאת מדידה 4 : \_\_\_\_\_

שגיאת מדידה 5 : \_\_\_\_\_

בוודאי שמתם בוודאי לב לכך שלכל מדידה בודדת קיבלתם שגיאת מדידה שונה. הסיבה שלא קיבלתם את אותה שגיאה בכל אחת מהמדידות שביצעתם היא שחלק מהגורמים לשגיאה משפיעים על תוצאת המדידה באופן אקראי. המשמעות של השפעה אקראית היא שבמדידות חוזרות לעיתים ערך המדידה יהיה גדול מערך הייחוס ולעיתים קטן ממנו. זו הסיבה שמיצוע על הרבה מדידות חוזרות מצמצם את ההשפעה של שגיאה כזו. לעומת זאת, הרבה פעמים איננו שמים לב שמערך המדידה שלנו מושפע מגורמים שלא לקחנו בחשבון בעיבוד הנתונים. למשל, התעלמנו מהחיכוך במערכת ובפועל החיכוך אינו זניח. התעלמות כזו תגרור הסטה של כל תוצאות המדידות במגמה קבועה ביחס לערך הייחוס ולכן מדידות חוזרות לא יוכלו לעזור בצמצום שגיאה מסוג זה. כדי לצמצם שגיאה כזו נצטרך להתעמק במבנה מערך המדידה ולהכניס תיקונים באופן שבו אנו מסיקים ממנו על ערך הגודל המדוד. בתורת המדידה מבחינים בין שני סוגי השגיאה הללו.

**שגיאת מדידה אקראית** – מרכיב של שגיאת המדידה שמשתנה באופן בלתי צפוי במדידות חוזרות של אותו גודל, באמצעות אותו מערך מדידה.

**שגיאת מדידה שיטתית** – מרכיב של שגיאת המדידה שבמדידות חוזרות של אותו גודל, באמצעות אותו מערך מדידה, נשאר קבוע או משתנה באופן שניתן לניבוי.

לעיתים בוחרים לבטא את שגיאת המדידה באחוזים ואז אנו מדברים על שגיאת מדידה יחסית, כדי לקבל תחושה עד כמה ערך הגודל הנמדד קרוב לערך הייחוס.

**שגיאה יחסית** – היחס בין שגיאת המדידה לערך ייחוס

$$e\% = \frac{|x_{measured} - x_{reference}|}{x_{reference}} 100\%$$

✓ חשבו את שגיאת המדידה היחסית המדידה שלכם :

---

---

---

## 7. מה למדנו?

במהלך הפעילות נחשפתם למושגים רבים בתחום המדידה. ניתן לארגן את המושגים תחת ארבעה אשכולות מרכזיים (ראו את מפת המושגים המצורפת בעמוד האחרון של הפרק):

1. מושגים הנוגעים לפעולות שיש לבצע לפני ביצוע מדידה
2. מושגים הנוגעים לביצוע המדידה עצמה
3. מושגים הנוגעים לידע הקודם שמשמש כבסיס להשוואה של תוצאות המדידה
4. מושגים הנוגעים להשוואה בין מדידות והסקת מסקנות

### לפני המדידה

תכנון ניסוי כרוך בחשיבה רבה עוד לפני המדידה עצמה. ראשית יש לקבוע מהן מטרות הניסוי שמהן יהיה אפשר לתכנן את מערך המחקר. במערך המחקר מוגדרים משתני המחקר התנאים לאיסוף הנתונים והליך המדידה שמבוסס על מודל פיזיקאלי. נדרש רישום מפורט לשיטת המדידה והתנאים להוכחת קשר לוגי בין המשתנים. הליך המדידה מחייב התייחסות למכשיר המדידה ולמיומנות הנדרשת מן המודד כיוון שאיכות המדידה נקבעת במידה רבה על ידי דיוק מכשיר המדידה ומיומנות המודד בהפעלת מערך המדידה.

לפני ביצוע המדידה הניסיונית יש לבדוק שכל מכשירי המדידה מכוילים, למשל ע"י מדידה של גודל שערכו ידוע. מכשירי המדידה במעבדה עבור תהליך כיוול ובדיקה מקיפים ע"י היצרן בדומה לזה שאתם עשיתם למכשירים שבניתם. חשבו להבין שאיכות הכיוול של המכשיר תלויה בדיוק של ערכי הייחוס איתם מכיילים אותו. כשמשתמשים במכשיר מדידה מוכן יש להתייחס בתהליך המדידה לתכונות שלו כמו טווח המדידה של המכשיר וכושר ההפרדה של המכשיר.

### מדידה

כפי שתיארנו בפרקים הקודמים, אי אפשר למדוד בדיוק אין סופי. בכל מדידה קיימת אי וודאות בתוצאות המדידה. לפיכך, תוצאת המדידה תתואר ע"י ערך מספרי, יחידת מידה, ואומדן לאי הוודאות בתוצאות המדידה.

אי הוודאות בתוצאות המדידה היא מדד כמותי (מספר חיובי) שמייצג את פיזור הערכים המיוחסים לגודל הנמדד. כדי לבצע הערכה של אי הוודאות בתוצאות המדידה יש לזהות את המקורות המשפיעים עליה ולאמוד את אי הוודאות של כל אחד מהם. אם התרומה של אחד הגורמים גדולה בסדרי גודל מזו של האחרים נוכל להזניח את האחרים ביחס אליו. אם לא, ניתן לחשב את התרומה המשותפת בכלים מתמטיים שונים. בכתובה מדעית של ערך מדוד אנו מקפידים לרשום רק את הספרות המשמעותיות, כאלה שערכן גדול מאי הוודאות במדידה, שכן לספרות קטנות יותר אין משמעות פיזיקאלית. אי הוודאות בתוצאות המדידה חשובה להשוואה בין ערכים של מדידות בלתי תלויות. נוכל להתייחס לשתי מדידות בלתי תלויות כנמצאות בהתאמה, אם הערך של האחת נמצא בתחום אי הוודאות של השנייה. אי הוודאות היחסית (היחס באחוזים בין גודל אי הוודאות לגודל הנמדד) יכולה לתת אומדן נוסף לדיוק המדידה שלנו - ככל שהיא קטנה יותר נוכל לומר שאנו יודעים את ערך המדידה בוודאות גדולה

יותר. כלומר, בעבודה ניסיונית חשוב לשפר ולשכלל את מערך המדידה על מנת להקטין את אי הוודאות בתוצאות מדידה.

## ידע קודם

לרוב כשאנו מבצעים מדידה אנו משווים את המדידה לערך יחוס ידוע ומוסכם. תוצאת המדידה של ערך זה ידועה באי ודאות מאד קטנה – לרוב קטנה בכמה סדרי גודל מאי הוודאות בתוצאות המדידה. ערכי ייחוס של קבועים פיזיקאליים למשל מתקבלים ע"י מדידות רבות, בתנאים שונים, ותוך הקפדה רבה על מערך מדידה תקין. אם ערכי ייחוס למדידה מתקבלים ממדידה בלתי תלויה של הגודל הנמדד במכשיר אחר, יש לבצע את המדידה במכשיר שאי הוודאות במדידה שלו קטנה בהרבה מאי הוודאות בתוצאות המדידה.

## השוואה בין מדידות והסקת מסקנות

כשאנו משווים שתי מדידות בלתי תלויות של אותו גודל נוכל לומר שהן מצביעות על תוצאות מתאימות זו לזו ("שוות") רק אם הערך המוחלט של ההפרש ביניהן קטן מאי הוודאות במדידה של לפחות אחת מהן.

כשאנו בוחנים השערה תיאורטית, אנו בונים מערך מדידה שמסתמך על השערה זו ומודדים באמצעותה גודל פיזיקאלי (למשל מסה של עגלה). תוצאת המדידה מבוטאת ע"י ערך, יחידה, ואומדן ריאלי לאי הוודאות בתוצאות המדידה. אנו מבצעים מדידות חוזרות על מנת לצמצם את השגיאה האקראית במדידה, ומנסים לקחת בחשבון את כל הגורמים שיכולים להשפיע על תוצאת המדידה על מנת לצמצם את השגיאה השיטתית במדידה. אנו משווים את תוצאת המדידה שהתקבלה אחרי מדידות חוזרות, לערך ייחוס מוסכם בעל אי ודאות קטנה. השוואה זו נותנת לנו את שגיאת המדידה. אם שגיאה זו קטנה מאי הוודאות במדידה, נוכל לומר שתוצאות המדידה שלנו מתאימות למודל התיאורטי שבנינו. אם לא, הדבר אינו מצביע בהכרח על כך שהמודל התיאורטי אינו נכון, כיוון שיכולה להיות לנו שגיאה שיטתית. כלומר, הדבר מחייב אותנו קודם כל לחזור ולבחון שוב את מערך המדידה שלנו. לעולם לא נוכל למדוד גודל פיזיקאלי בוודאות אין סופית. יחד עם זאת, חשוב להבין שכדי לבחון השערה תיאורטית בדרך זו עלינו לשאוף להקטין ככל האפשר את אי הוודאות בתוצאות המדידה.

לעיתים נבחר לתאר את שגיאת המדידה באופן שייתן לנו אומדן חסר יחידות על הקרבה בין ערך הייחוס לערך המדוד. אומדן זה מתקבל ע"י שגיאת המדידה היחסית - היחס באחוזים בין שגיאת המדידה וערך הייחוס, וככל שהוא קטן יותר, תוצאת המדידה קרובה יותר לערך הייחוס.

דונו בכיתה במפת המושגים המופיעה בעמוד 49. נסו לחשוב באיזה אופן ה"סיפור" המתואר בפסקות הקודמות מתייחס למפה.

✓ מדוע אם אנו רוצים לבחון באמצעות ניסוי השערה תיאורטית עלינו לשאוף להקטין את אי

הוודאות בתוצאות המדידה ככל האפשר?

---

---

---

האם תוכלו לנסח את תשובתכם לשאלה הקודמת תוך שימוש במושג שגיאת מדידה? ✓

---

---

---

---

---

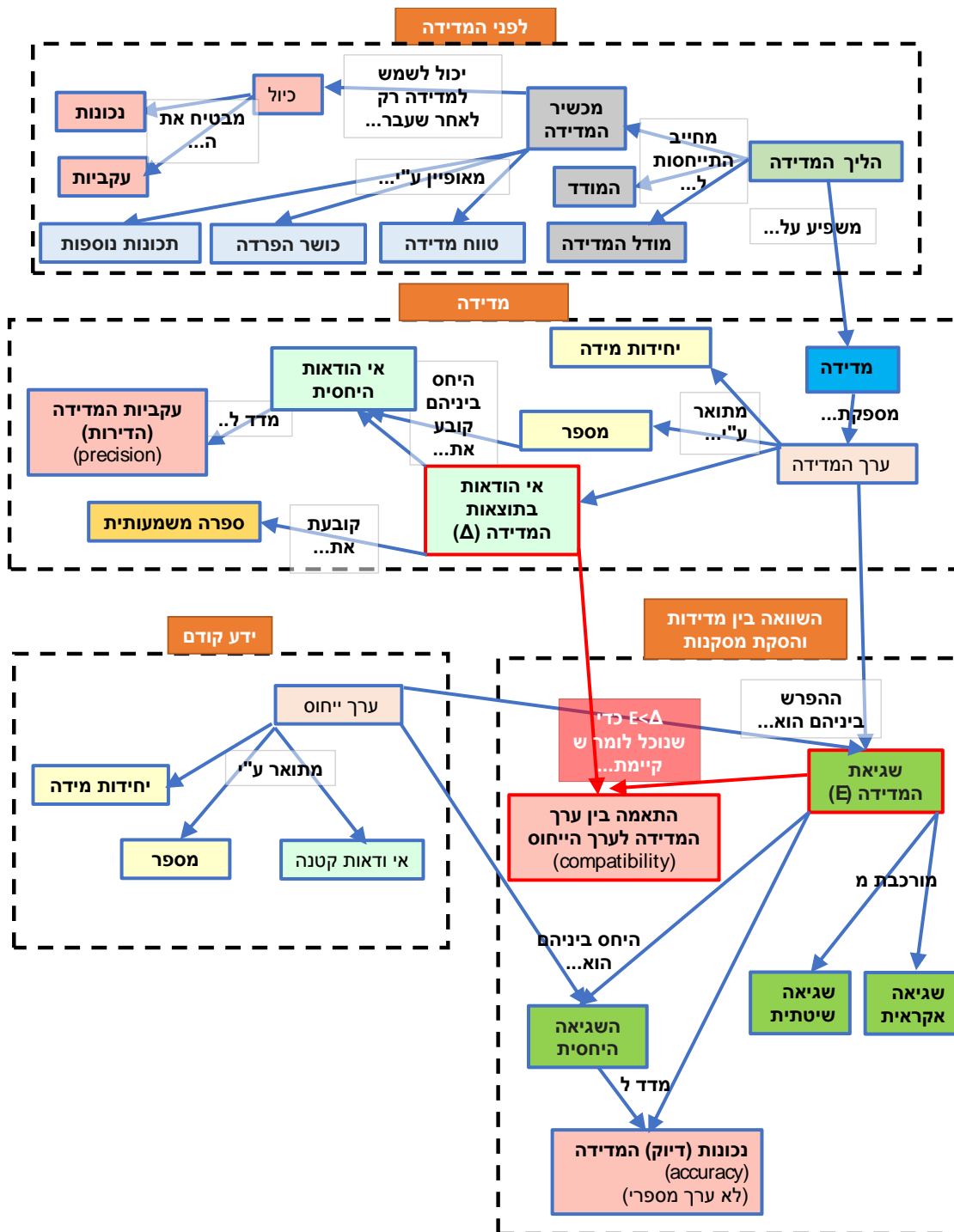
---

מה הדבר המשמעותי ביותר שלמדתם באופן אישי בתהליך הלמידה שחוויתם? ✓





# מפת מושגים



כל הזכויות שמורות ©. קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים /או להוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת ובכלל זה שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר, העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או כל חלק ממנו.

## 8. הצגת המכשיר שבניתם

הכינו מצגת להצגה בת 10 דקות של מכשיר המדידה שבניתם לעמיתים, מורים ואורחים אחרים (מקסימום 10 שקפים).

- ההרצאה (והמצגת עליה היא נשענת) תבנה על דו"ח המעבדה שכתבתם, החומרים בחוברת ומקורות נוספים לפי שיקול דעתכם.
- השקף הראשון של המצגת צריך להציג את שם המכשיר, שמות חברי הקבוצה ושם המנחה של הפרויקט.
- אם תרצו אתם מוזמנים להוסיף שקף שנותן סקירה היסטורית קצרה על התפתחות מדידת הגודל הפיזיקאלי שהמכשיר שבניתם במודד.
- ההרצאה תציג את מבנה המכשיר והסבר אינטואיטיבי קצר על עקרון פעולתו (לא יותר משני שקפים)
- ההרצאה תציג את התכונות של מכשיר המדידה שבניתם ותסביר איך קבעתם אותו (תהליך הכיול) – חלק מרכזי בהרצאתכם!
- הדגימו בהרצאה כיצד מודדים באמצעות המכשיר – חלק מרכזי בהרצאתכם! – ספרו על המדידות שעשיתם עם המכשיר.
- תארו בהרצאה את האתגרים בהם נתקלתם וכיצד התמודדתם איתם.
- השקף האחרון צריך להכיל רשימת מקורות לתכנים ולתמונות בהם השתמשתם.

## 9. פעילות המשך - הזמנה לחקר

עד עתה התמקדנו בעקרונות העומדים בבסיס תהליך המדידה הפיזיקאלית. חלק מכם יסיימו את העבודה בשלב זה. אולם, אם תוכלו להרשות לעצמכם להאריך את העבודה על הפרויקט, כדאי מאד להתבונן במכשירי המדידה שבניתם בשימת לב - הם מעניינים בזכות עצמם ואפשר לצאת מכל אחד מהם לחקר עשיר ומעניין.

ניקח לדוגמה את שעון המים. התבוננות מעמיקה יותר במכשיר המדידה הפשוט הזה מעלה הרבה מאד תהיות.



- האם קדח אחד מספיק לעבודה של השעון? שני קדחים? יותר? שני קדחים וקשית אחת? מדוע?
- מה ההשפעה של קדחים בעוביים שונים, קשיות באורכים שונים וכד'?' מדוע?
- מאיזה פתח נכנסים המים ומאיזה פתח יוצא האוויר? האם יש כאן חוקיות? באילו מקרים? מדוע?
- מדוע גרף הכיול שקיבלתם נראה כפי שהוא נראה?

נסו לתכנן ניסויים שיעמידו למבחן את ההסברים שלכם!

בהצלחה!!

## 10. מחוונים להערכה עצמית ולהערכת עמיתים

### תיעוד תהליך הכיול ותוצאותיו

מה צריך עדיין לשפר? התייחסו למספרי הסעיפים. אם אין מה לשפר בסעיף מסוים ציינו "מושלם" ואם הוא לא רלוונטי ציינו "לא רלוונטי".	ביצוע מספק	
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ערכי הייחוס שנבחרו מצוינים במפורש.</li> <li>2. ערכי הייחוס מתוארים ע"י מספר, יחידה, ואי הוודאות בתוצאת המדידה.</li> </ol>	<b>ערכי הייחוס</b>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. טווח המדידה של המכשיר מצוין באופן מפורש.</li> <li>2. טווח המדידה מתואר ע"י ערך מספרי ויחידת מידה.</li> <li>3. השיקולים לקביעת טווח המדידה של המכשיר מוסברים באופן מפורש וברור.</li> <li>4. השיקולים לקביעת טווח המדידה נכונים.</li> </ol>	<b>טווח המדידה</b>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. לכל כל עמודה בטבלה יש כותרת מתאימה ויחידת מידה.</li> <li>2. הטבלה מציגה את ערכי הייחוס ואת ערכי המדידות החוזרות.</li> <li>3. הטבלה מציגה אומדן לאי הוודאות בתוצאות המדידה של כל אחת מהמדידות החוזרות ושל ערכי הייחוס.</li> <li>4. הטבלה מציגה את תוצאת המדידה (חישוב הממוצע החשבוני של המדידות החוזרות).</li> <li>5. הטבלה מציגה אומדן לאי הוודאות בתוצאת המדידה.</li> <li>6. הערכים המצוינים הגיוניים.</li> <li>7. הטבלה מציגה רק את הספרות המשמעותיות של כל הערכים המוצגים.</li> </ol>	<b>טבלת כיול</b>

מה צריך עדיין לשפר? התייחסו למספרי הסעיפים. אם אין מה לשפר בסעיף מסוים ציינו "מושלם" ואם הוא לא רלוונטי ציינו "לא רלוונטי".	ביצוע מספק	
	1. לגרף יש כותרת ברורה 2. כל ציר מאופיין ע"י כותרת, יחידות מידה ומספרים 3. כיוון ציר ה- X ימינה. 4. בגרף מופיעים קווי רשת 5. קנה המידה של הגרף נכון והנתונים מפורזים על כל שטח הגרף 6. הנתונים מופיעים כנקודות על הגרף ללא קו מחבר בין הנקודות 7. הגרף מציג גם את אי הוודאות במדידה (צלבים Error Bars) 8. מצורף לגרף קו מגמה: א. יחד עם המשוואה מוצג גם מקדם המתאם ( $R^2$ ) ב. המשתנים בקו המגמה מופיעים בפונקציה בסימנים היחודיים להם (לא x,y)	גרף כיוול
	1. כושר הפרדה של המכשיר מצוין באופן מפורש ע"י מספר ויחידה. 2. קיים הסבר לאופן בו נקבע כושר ההפרדה של המכשיר 3. ההסבר נכון.	כושר הפרדה
	1. סקלת המכשיר נוחה לקריאה. 2. קיים הסבר ברור לאופן בו צוירה הסקאלה. 3. אם אין אפשרות לצייר על המכשיר סקלה והמדידה מתבצעת באמצעות גרף הכיוול, קיים הסבר במתייחס לאופן השימוש בגרף שמתייחס לכושר ההפרדה של המכשיר. 4. ההסברים נכונים.	סקלה / קריאה מגרף כיוול

## תיעוד מדידה

מה צריך עדיין לשפר? התייחסו למספרי הסעיפים. אם אין מה לשפר בסעיף מסוים ציינו "מושלם" ואם הוא לא רלוונטי ציינו "לא רלוונטי".	ביצוע מספק	
	1. תיעוד מסודר של ביצוע מדידות חוזרות (ערכים מספריים, יחידות, אי וודאות) 2. קביעת ערך המדידה ע"י ממוצע חשבוני של כל המדידות 3. אומדן נכון לאי הוודאות בתוצאות. 4. הצגת כל התוצאות רק עם ספרות משמעותיות.	<b>מדידה</b>
	1. הצגת ערך הייחוס (מספר, ספרה משמעותית, יחידה, אי הוודאות במדידה)	<b>ערך ייחוס</b>
	1. חישוב נכון של שגיאת המדידה 2. השוואה נכונה בין תוצאת המדידה וערך הייחוס שמתייחסת הן לאי הוודאות בתוצאת המדידה והן לערך השגיאה.. 3. הסקת מסקנות מתוך השוואה זו. 4. התייחסות למקורות השגיאה (שגיאה אקראית, שגיאה שיטתית).	<b>מסקנות</b>
	1. קיים הסבר מלא ונכון למסקנות שעולות מהנתונים תוך שימוש במושגים שגיאה, שגיאה אקראית, שגיאה שיטתית, שגיאה יחסית והשוואות תחומי אי וודאות של תוצאות המדידה.	<b>ניתוח ומסקנות</b>

## תיאור מבנה המכשיר ואופן פעולתו

מה צריך עדיין לשפר? התייחסו למספרי הסעיפים. אם אין מה לשפר בסעיף מסוים ציינו "מושלם" ואם הוא לא רלוונטי ציינו "לא רלוונטי".	ביצוע מספק	
	1. התרשים מתאר את המכשיר ולא מכשיר אחר 2. התרשים כולל את כל המרכיבים המרכזיים במכשיר 3. כל המרכיבים מזוהים (תגים) באופן נכון 4. מידות ניתנות עם יחידות מתאימות בפורמט כתיבה מקובל ואחיד	<b>תרשים</b>
	1. יש התייחסות לעקרונות מדעיים העומדים בבסיס פעולתו של המכשיר 2. ההסבר קושר באופן מפורש ונכון בין עקרונות מדעיים לבין אופן הפעולה של המכשיר 3. ההסבר על אופן הפעולה של המכשיר מתאר באופן נכון את התפקיד של כל אחד ממרכיבי המכשיר	<b>קשר בין הנחות יסוד לתיאור אופן הפעולה</b>
	ההסבר מתייחס באופן מפורש לתרשים, תוך הקפדה על שימוש באותם שמות וסימנים המופיעים בתרשים	<b>פורמט הכתיבה</b>



## הצגת הפרויקט

מה צריך עדיין לשפר? התייחסו למספרי הסעיפים. אם אין מה לשפר בסעיף מסוים ציינו "מושלם" ואם הוא לא רלוונטי ציינו "לא רלוונטי".	ביצוע מספק	
	<p>1. דף השער מזהה באופן ברור את נושא הפרויקט, שמות חברי הקבוצה ושם המורה המנחה.</p> <p>2. המצגת ברורה וקלה למעקב (גודל פונט, צבעים, מספרי שקפים וכד')</p> <p>3. המצגת עוזרת ותומכת בהבנת ההרצאה</p> <p>4. בסוף המצגת מופיעה רשימת מקורות</p>	<b>מצגת</b>
	<p>1. נכונים</p> <p>2. מתייחסים לכל חלקי הפרויקט: הסבר על מבנה ועקרון העבודה של המכשיר, אופן השימוש בו, האתגרים בהם הקבוצה נתקלה במהלך העבודה וכיצד היא התמודדה עם אתגרים אלה.</p>	<b>הסברים</b>
	<p>1. לקהל קל להקשיב ולעקוב אחרי המרצה</p> <p>2. המרצה מתייחס ועונה לשאלות מהקהל באופן בהיר ונכון</p>	<b>תקשורת עם הקהל</b>

## 11. מקורות

גלוק, פ. (1994). שיטות עבודה במעבדת הפיזיקה. ירושלים: משרד החינוך והתרבות, מחלקת פרסומים.

פאטון, א. (2012). מעשה חושב: למידה מבוססת פרויקטים, המדריך למורה. תרגום: ענת פלג ואמנון סדובסקי. ירושלים: התיכון שליד האוניברסיטה העברית.

<https://gifted.cet.ac.il/FileViewer.aspx?nFileID=114836>

Buffler, A., Allie, S. Lubben, F. and Campbell, B. (2007). *Introduction to Measurement in the Physics Laboratory. A Probabilistic Approach*. Department of Physics, University of Cape Town. <https://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/MeasurementIntro.pdf>.

JCGM (2012). *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms*. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>

Knotts, S., Mohr, P. J., & Phillips, W. D. (2017). An Introduction to the New SI. *The Physics Teacher*, 55(1), 16–21. <http://doi.org/10.1119/1.4972491>

Kolodner, J. L., Camp, P. J., Crismond, D., Fasse, B., Gray, J., Holbrook, J., ... Ryan, M. (2003). Problem-Based Learning Meets Case-Based Reasoning in the Middle-School Science Classroom: Putting Learning by Design(tm) Into Practice. *Journal of the Learning Sciences*, 12(4), 495–547. [http://doi.org/10.1207/S15327809JLS1204\\_2](http://doi.org/10.1207/S15327809JLS1204_2)

Newell, D. B. (2014). A more fundamental International System of Units. *Physics Today*, 67(7), 35–41. <http://doi.org/10.1063/PT.3.2448>

Volkwyn, T. S., Allie, S., Buffler, A., & Lubben, F. (2008). Impact of a conventional introductory laboratory course on the understanding of measurement. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 4(1), 1–10. <http://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010108>