

## ניסוי מס' 1 במכניקה – ניתוח נפילה חופשית באמצעות תכנת טרקו

כתב: מתן משכית



### מה נעשה היום?

במהלך השיעור הקרוב נתנסה בעבודה עם תכנת tracker, תכנה המאפשרת, בין היתר, ניתוח קל ונגיש של תנועת גופים המצולמים על ידינו. הפעילות תכלול 3 שלבים: צילום סרטון – נפילה חופשית של כדור; העברת הסרטון לטרקר ועיבודו בתכנה; ניתוח תוצאות העיבוד בעזרת גרף באקסל ומציאת תאוצת הנפילה החופשית.

### ידע קודם דרוש:

1. קינמטיקה: המושגים "מקום" "העתק" "מהירות" ו-"תאוצה", מהירות רגעית, מהירות ממוצעת והקשר ביניהן, ניתוח תנועה של גוף במהירות ו/או בתאוצה קבועה, ייצוגים גרפיים.

2. על המחשב מותקנת תוכנת טרקו

3. שרטוט גרפים בתכנת אקסל

### שלב 1 – צילום סרטון – 20 דק'

כל זוג/שלשה יש כדור. המשימה הינה לצלם באיכות גבוהה נפילה חופשית של הכדור. לצורך כך יש לשחרר את הכדור מגובה של 1.5 מ' לפחות ולהקפיד על:

1. על המצלמה להיות **מקובעת** במקום ואופקית (מקבילה למישור התנועה ולא בזווית). מומלץ להיעזר בסטטיב ומלחציים. על המצלמה להימצא במרחק מתאים כך שכל התנועה תהיה במסגרת הפריים המצולם.

2. חשוב להקפיד על ניגודיות גבוהה בין העצם שאת תנועתו נרצה לנתח ובין הרקע של הסרטון. כמו כן על הרקע להיות חלק ככל הניתן.

3. על מנת לבצע כיול יש למקם **במישור התנועה** בסרטון עצם כלשהו בעל אורך ידוע. ניתן להשתמש בסרגלים באורך 1 מ' הנמצאים במעבדה.

4. יש להקפיד על מאפייני צילום גבוהים, השתמשו במצלמת הוידאו האיכותית ביותר שברשותכם (הפרמטר החשוב הוא מספר הפריימים

בשניה (FPS – Frames Per Second) ככל שיהיו יותר פריימים בשניה כך ניתוח הסרטון בתוכנה יהיה טוב יותר.

5. בסיום הצילום יש להוריד אותו למחשב באמצעות כבל, או שליחה במייל.

6. זוג שלא סיים שלב זה תוך 20 דק' מתבקש לעצור את הצילום ולקבל מהמורה 'סרטון רפרנס' להמשך העבודה.

## שלב 2 – עיבוד הסרטון בתכנה

א. גררו את הסרטון אל תוך החלון הראשי של התוכנה



ב. כעת נכייל את התוכנה:

1. לחצו על כפתור כלי הכיול.

2. בחרו חדש.

3. בחרו מוט הכיול.

גררו את קצוות מוט הכיול כך שיתאימו לעצם הכיול שהוזכר בסעיף 1.

הקפידו לדייק כמה שניתן בסימון המוט כיוון ששגיאה בסימון המוט

תגרור שגיאה במדידת התנועה! (יש לעבוד בזום על ידי גלילת העכבר).

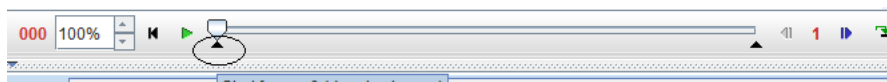
בתהליך הכיול יש לעבוד ביחידות מטרים כלומר להזין בתא הכיול את

אורך העצם המכיל במטרים (מדוע?)

ג. כווננו את הסרטון בעזרת ציר הזמן המופיע בתחתית המסך כך שהפריים

שיופיע על המסך יהא רגע התחלת התנועה. ניתן "לקבע" את תחילת וסוף

הסרטון על ידי הזזת המשולשים השחורים לתחילת וסוף הסרטון בהתאמה:



## ד. מערכת צירים:

הצירים



1. לחצו על כפתור מערכת

2. יש לקבוע את ראשית הצירים כנקודת תחילת התנועה. כלומר – כאשר הסרטון מכוון לרגע **שמיד לאחר שחרור הכדור**. גררו את ראשית הצירים כך ש"תוצמד" לעצם (הכדור) ברגע שהוא מתחיל את תנועתו. אם הצלחנו נקבל בקירוב  $y_0=0.8m$

**הערה:** במידה והסרטון מהופך ב-90 מעלות (כלומר הכיוון האנכי בסרטון הוא ימינה ושמאלה), יש לסובב את הסרטון באמצעות לחיצה על: סרט--<מסננים--<חדש--<סובב.

ה. **יצירת תרשים עקבות של הכדור/הגוף:**

ניתן ליצור תרשים עקבות לכדור בשתי דרכים,

**דרך א' - ליצור את תרשים העקבות באופן ידני באופן הבא:**

1. בחרו בלחצן "צור" ושם בחרו "נקודת מסה".

2. על ידי החזקת shift במקלדת, סמן העכבר יהפוך לצורה של צלב ובעזרתו נסמן את מיקום הכדור. לאחר סימון הנקודה הראשונה התכנה תעבור אוטומטית לפריים הבא, בו נסמן, שוב בעזרת shift את מיקום מרכז המסה של הכדור.

יש להקפיד בכל פריים לסמן את אותה נקודה של הכדור (מרכז המסה של הכדור), וזאת במטרה לצמצם את השפעת 'מריחת הכדור' בפריימים השונים.

דרך שנייה – באופן אוטומטי ע"י התכנה, כפי שמוסבר בסרטון בקישור זה:

<https://www.youtube.com/watch?v=QDCAExReNHY&t=6s>

**שלב 3 – ניתוח התוצאות**

א. בצד ימין של המסך ניתן לראות גרף וטבלה, תכנת הטרקור יכולה לייצר גרפים שונים אך אנו נשתמש בנתונים הגולמיים בכדי לייצר את הגרפים בעצמנו.

ב. הבט על הטבלה בצד ימין למטה של המסך, כעת יש לסמן באמצעות העכבר את כל תאי הטבלה, ללחוץ מקש ימני בעכבר ולבחור ב'העתק תאים שנבחרו' ואז ב'דיוק מלא'.

ג. פתח את תכנת האקסל והעתק את הטבלה.

ד. הוסף לגליון עמודה נוספת:  $V_y$  וחשב את ערכה.

**תזכורת:** אנו מודדים מהירות ממוצעת ומניחים שמצענו על פרק זמן מספיק קטן כך שבקרב זוהי המהירות הרגעית. חישוב המהירות הממוצעת בין שתי נקודות. למשל המהירות הממוצעת שמתאימה לנקודה 6 :

$$V(X_6) = V_6 = \frac{x_7 - x_5}{t_7 - t_5} =$$
  
שימו לב, שעקב כך לא ניתן לחשב מהירות רגעית בנק' העליונה והתחתונה (מדוע?)

ה. צרו שני גרפים: מיקום בציר אנכי כפונקציה של הזמן, ומהירות אנכית כפונקציה של הזמן.

ו.

**דו"ח ניסוי – את הדו"ח יש להכין בשימת לב רבה ובהקפדה על כל כללי הרישום של דו"ח ניסוי כפי שלנלמד בשיעור ומופיע במצגת [כאן](#).** יש להעלות את הדו"ח כקובץ וורד באמצעות האתר . נוסחאות ומשוואות כדאי לכתוב באמצעות כלי המשוואות של הוורד (ניתן לצפות [בסרטון הסבר](#))

**כל פרקי הדו"ח יופיעו במסמך וורד אחד, אין להגיש את קובץ האקסל.**

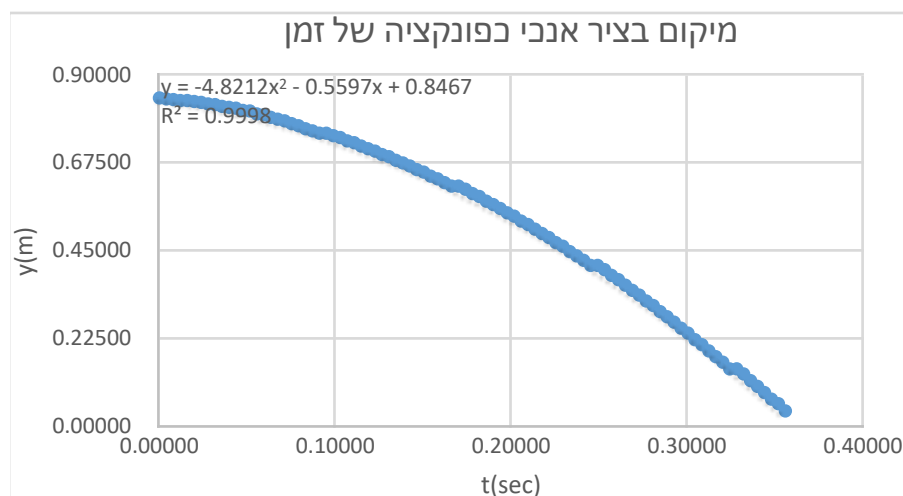
1. יש לנסח בעצמכם את פרקי הדו"ח הראשונים: נושא, מטרות, ציוד וחומרים, מהלך הניסוי. מטרות הניסוי הן: אימות נוסחאות הקינמטיקה ומציאה ניסויית של תאוצת הכובד. הקפידו על תיאור מדויק של מהלך הניסוי כך שתלמיד שיקרא את הדו"ח יבין בדיוק איך בוצע הניסוי.

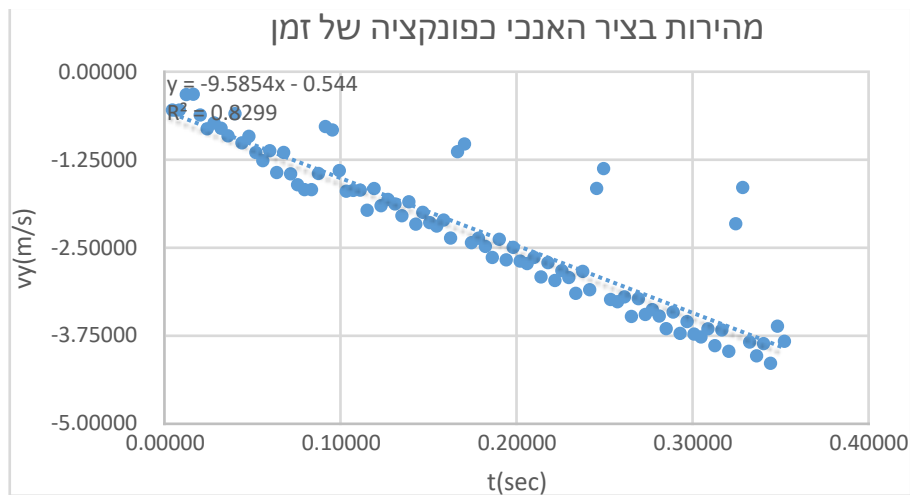
**נושא הניסוי:** שימוש בתוכנת טרקור לניתוח נפילה חופשית.

**מטרות הניסוי:** אימות נוסחאות הקינמטיקה ומציאה ניסויית של תאוצת הכובד.

**ציוד וחומרים:** טלפון/מצלמה, כדור, מטר, מחשב עם תוכנת "טרקר"  
**מהלך הניסוי:** בתחילת הניסוי הצבנו את המצלמה כך שהיא תהיה אנכית לרצפה (ומקבילה לקיר שמולנו הקלטנו). לאחר מכן התחלנו להקליט סרטון שבו רואים כדור בנפילה חופשית שמתחיל ממנוחה ונופל לאורך קטע שאורכו ידוע מראש (ע"י סימון באמצעות מטר). לאחר שהקלטנו את הסרטון והעברנו אותו למחשב, נפתח אותו בתוכנת "טרקר", ולאחר שנעקוב אחרי השלבים שנמצאים בתדריך (קביעת ציר, מוט כיול, תרשים עקבות), נעביר את הנתונים שיהיו בטבלה לתוכנת Excel, כדי ליצור גרפים של מיקום, מהירות כתלות בזמן.

2. פרק תוצאות: יש להציג את הגרפים שהתבקשתם, ולהקפיד על כל הכללים בהצגה של גרף (אין צורך להציג את הטבלה)





### 3. עיבוד התוצאות:

מצאו בעזרת הגרפים את הפרמטרים הבאים:

$Y_0$ ,  $V_0$ ,  $a$  ורשמו בדו"ח בצורה מסודרת כיצד מצאתם כל אחד מהם ומה הוא

מייצג באיזה גרף (חיתוך עם צירים, שיפוע וכו')

\*  $-Y_0$  כדי למצוא את  $Y_0$  (המיקום ההתחלתי), נשתמש בנתון שאנחנו

זרקנו את הכדור מנקודה מסוימת (במקרה שלי, 0.8 מטר מראשית

הצירים), וכך ניתן לדעת ש  $Y_0 = 0.8m$ . ערך ה- $y$  הוא מיקום הכדור

בציר, ביחס לנקודת ה-0 (שנמצאת בסוף המסלול).

\*  $-V_0$  כדי למצוא את  $V_0$  בדומה ל  $Y_0$  אנחנו יודעים שהכדור התחיל

ממנוחה (לא נתנו לו דחיפה, רק הפלנו אותו), לכן ניתן לומר ש  $V_0$

$=0$ . המהירות היא שיפוע המשיק לגרף בנקודה  $(t, y(t))$ .

\*  $-a$  אפשר לחשב את התאוצה ע"י הנגזרת השנייה של המיקום

כפונקציה של זמן. אחרי ששרטטנו את הגרפים באמצעות Excel

קיבלנו ש -

$$x(t) = -4.8212t^2 - 0.5597t + 0.8467$$

ואם נגזור את זה פעמיים נקבל ש  $a = -9.6424 \text{ m/s}^2$ .  
התאוצה היא שווה לתאוצת הכובד (g).

4. **מסקנות:** ענו על השאלות הבאות: (יש להציג בדו"ח המעבדה גם את השאלות עצמן).

א. הטרקר היא תוכנה המודדת מיקום בזמנים שונים. הסבירו, באמצעות המושגים "מהירות ממוצעת" ו"מהירות רגעית", כיצד ניתן למדוד בעזרת הטרקר גם מהירות ותאוצה.

באמצעות שימוש בנוסחה כמו  $v_k = \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{t_{k+1} - t_{k-1}}$  שמחשבת מהירות

ממוצעת בין 2 נקודות, אנחנו יכולים להגיד שככל ההפרש בין הזמנים קטן יותר, המהירות הממוצעת שחישבו תהיה כמעט שווה למהירות הרגעית (המהירות בזמן  $k$ , וכך הטרקר יכול לחשב את המהירות. כדי לחשב תאוצה, הטרקר משתמש בנוסחה  $v_k = v_0 + ak$  ולקיחת נתונים שחישב (לדוגמה מהירות 1 ו-2, והפרש זמן של 1/פריימים בשנייה) (שנקבעים לפי הטלפון), וכך הטרקר יכול לחשב את התאוצה.

ב. מהן מסקנותיך מהגרפים שקיבלת? התייחס לסוג התנועה, ולמה שהתקבל ביחס למה שציפית. אם התשובה אינה כפי שציפית, רשום מה הסיבות האפשריות לכך.

מסקנותיי מהגרפים הם:

1. פונקציית המיקום של הגוף מתוארת ע"י הנוסחה  $x(t) = -\frac{g}{2}t^2$  אבל

בגלל טעויות ואי דיוקים בניסוי, קיבלנו סטייה קלה מהתוצאה. (קיבלנו

בניסוי את הנוסחה  $x(t) = -4.8212t^2 - 0.5597t + 0.8467$

הפונקציה שמתארת את המיקום של הגוף היא פרבולה הפוכה (מכיוון שקבענו שראשית הצירים היא בסוף המסלול, הגוף נע במהירות שלילית).

2. אם נגזור את פונקציית המיקום של הגוף, או נשתמש בפונקציה של Excel מייצרת לנו נקבל שאת מהירות הגוף מתארת פונקציה ליניארית, שהיא

$$v(t) = gt$$

באותו אופן עם פונקציית המיקום, לא קיבלנו את הפונקציה הזאת בדיוק בגלל אי דיוקים בניסוי, ובמקום זה קיבלנו

$$v(t) = -9.5854t - 0.544$$

3. מהפונקציה של המהירות שקיבלנו ניתן לחשב את תאוצת הכובד ולהגיד שהיא בערך שווה ל

$$g \approx 9.5854$$

4. אם נגזור את פונקציית המהירות (או את פונקציית המיקום פעמיים) נקבל שהתאוצה של הכדור תהיה  $a=9.5854$ , שזה גם תאוצת הכובד.

(התאוצה של הכדור בנפילה חופשית שווה לתאוצת הכובד  $g$ ).

ג. חשבו באמצעות הגרפים את תאוצת הכובד המקורבת. במידה והיא אינה שווה לתאוצת הכובד על כדה"א הסבר מה הם המקורות האפשריים להבדל?  $g \approx 9.5854$

תאוצת הכובד (המדויקת) היא 9.80665, קיבלנו טעות של 2.256%, שנוצרה מכמה סיבות:

חוסר דיוק במדידה, דרך הטרקור או בסימון המסלול של הכדור. טעויות בתוכנה, שלא סימנה את מרכז הכדור בדיוק, ועוד.

ד. חישבו על עוד תנועה מעניינת שאפשר לנתח באמצעות הטרקור ואולי להגיע למסקנות מעניינות... (אין צורך לעשות זאת בפועל, רק לחשוב...): – תנועה של כדור שנזרק בזווית ידועה ובמהירות התחלתית ידועה.

## 5. ניתוח שגיאות:

א. יש למלא את הטבלה הבאה (גם כאן מומלץ לעיין בחלק המצגת העוסק ב'ניתוח שגיאות' לפני שמתחילים, להזכר בסוגי השגיאות השונים, ובמקורות הקיימים לשגיאות).

תיאור השגיאה	מקור השגיאה (מחדד/מערך ניסוי/מכשור)	סוג השגיאה (שיטתית/אקראית)
--------------	--	-------------------------------



נפילת הכדור לא בקו ישר	מודד	אקראית
סימון אמצע הכדור	מכשור (טרקר)	אקראית
סימון ראשית הצירים ומוט כיוול	מודד	שיטתית
שימוש במשטח בעל חיכוך	מערך ניסוי	אקראית

ניתן להוסיף עמודות בהתאם לצורך.

ב. התייחסו לשגיאתכם במציאת תאוצת הכובד ונתחו אותה – מהי השגיאה

היחסית שקיבלתם? מהו ערך  $R^2$  בגרף הרלבנטי?

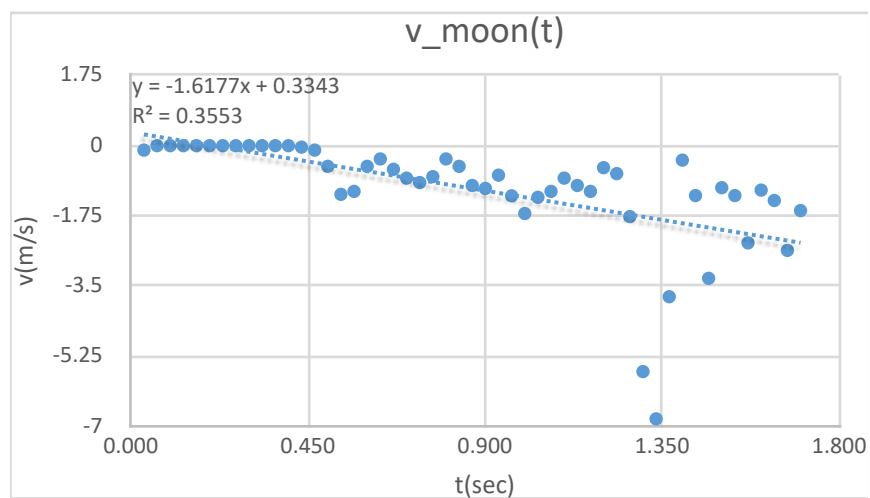
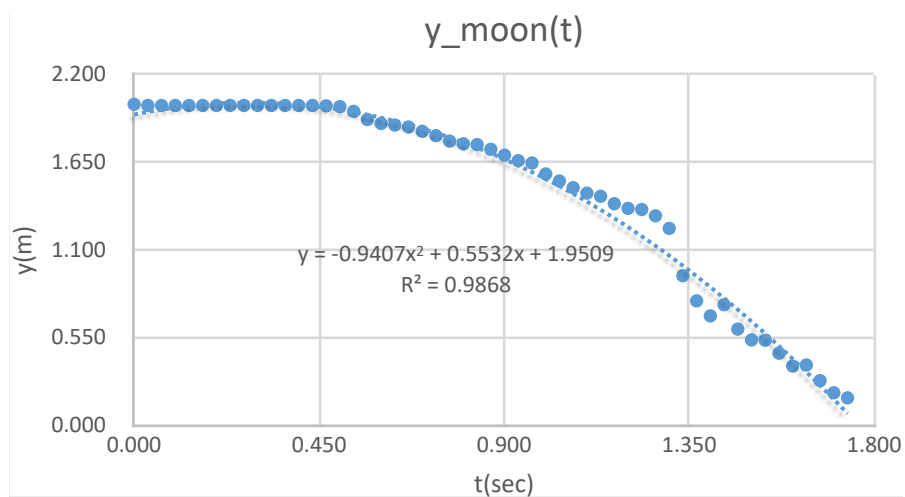
השגיאה היחסית שקיבלתי היא 2.256%, ערך  $R^2 = 0.8299$ .

### משימת אתגר:

ביחרו אחת משתי המשימות הבאות.

### **משימה ב':**

1. הורידו בביתכם את תכנת טרקר ([בקישור](#))
2. הורידו את [הסרטון](#) של האסטרנאוט מאפולו 11 מבצע ניסוי על הירח
3. נתחו את הסרטון והעריכו בעזרתו את תאוצת הכובד בירח (העריכו בקירוב את גובה האסטרנאוט או עצם אחר המופיע בסרטון לצרכי כיוול).



לאחר סימון ידני של המיקום של הפטיש (הסרטון היה מטושטש מדי כדי להשתמש ב-autotracker) קיבלתי טבלה של מיקום הפטיש כפונקציה של זמן. לאחר ששמתי את הנתונים ב Excel וחישבתי את המהירות בכל נקודה (חוץ מבהתחלה ובסוף), ויצירת גרפים, קיבלתי ש:  $g_{moon} = 1.6177$ , עם טעות מדידה של 0.449%!

בהצלחה 😊