

ניסוי "החוק השני של ניוטון" בעזרת מעבדה ממחושבת

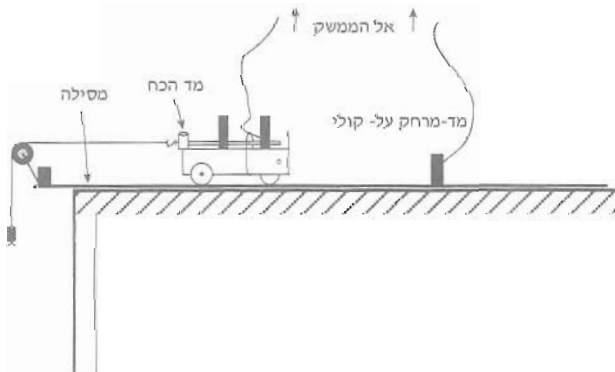
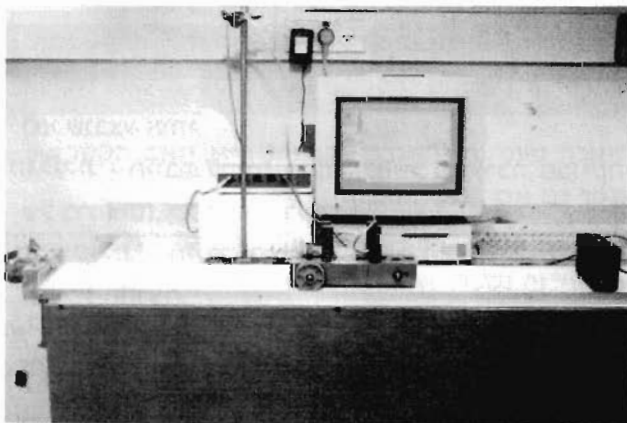
רפי כהן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

ניסוי 1 – החוק השני של ניוטון עם כח קבוע

ניסוי זה (המתואר בתרשים 1) זהה לניסוי של קבוצת רחובות. עגלה נגזרת על שולחן בעזרת משקולת הקשורה בחוט העובר מעל גלגלת. מסת העגלה ניתנת לשינוי על ידי הוספת גלילים (שמסת כל אחד מהם 300 ג'). המשקולת מורכבת ממדהק נייר שעליו מניחים דיסקיות בנות 20 ג' כל אחת.

אמצעי המדידה משופרים בגלל קיום החישובים:

במקום להניח כי הכח המניע הוא משקל המשקולת, מודדים ישירות את הכח הפועל על העגלה בעזרת חיישן הכוח המחובר בין החוט והעגלה. כמו-כן, מד המרחק מחליף את רשם הזמן בהצלחה מרובה.



תרשים 1

שני החישובים מחוברים למחשב ודוגמים את הכוח והמיקום בקצב גבוה מאד של 50 פעם בשניה ($\Delta t = 0.02 \text{ s}$). ניתן

מבוא

אחד החוקים היסודיים ביותר בתחום המכניקה הוא החוק השני של ניוטון, ממנו ניתן לגזור את כל יתר המושגים כתנע, אנרגיה וכו'. ניסוי שמטרתו לבחון את "החוק השני של ניוטון" מחייב מדידה בו זמנית של הכוח הפועל על גוף ושל תאוצתו על מנת לעמוד על הקשר ביניהם. מחשבה רבה הושקעה כדי לפתח ניסויים נוחים לתלמידים, וגם שקופים להבנה.

תכנית PSSC הביאה לעולם, לפני יותר משלושים שנה, ניסוי בו תלמיד משך עגלה בעזרת גומיה, תוך נסיון לשמור את אורך הגומיה קבוע (כח קבוע). ניסוי זה היה קשה מאוד לביצוע, כיוון שעל מנת לשמור על כוח קבוע היה על התלמיד להגביר בהדרגה את המהירות בה הוא משך את העגלה. קבוצת רחובות, שהתבססה על רעיונות של PSSC, פיתחה ניסוי דומה שבו העגלה נגזרת על ידי סל עם משקולות התלוי באמצעות חוט משיחה דק העובר מעל גלגלת. העגלה עמוסה במשקולות שהן גלילי ברזל. מסת העגלה שווה למסתם של שני גלילים. אם דואגים לשמן היטב את גלגלי העגלה והגלגלת, ואם רשם הזמן המחובר לעגלה אינו מגמגם, מתקבלות תוצאות טובות למדי. אלא שניסוי זה סובל מפגם עקרוני: הכח הנמדד (משקל הסל) פועל על הסל ועל העגלה בו זמנית. אלו הם שני גופים שונים, שאינם נעים אפילו באותו הכיוון ולכן מאבדים את ההתייחסות לאופי הוקטורי של החוק השני עקב הפעלתו של חוק זה עבור כל גוף בנפרד.

כאמור, הבעיה המרכזית בכל הגירסאות המסורתיות של ניסויי "החוק השני" נבעה מהקושי למדוד בו זמנית, ובאופן ישיר, את הכוח הפועל על גוף ואת תאוצתו. המעבדה הממוחשבת, על מגוון חיישניה, מאפשרת לנו להתגבר על קושי עקרוני זה, ולהציע גירסאות חדשות ומדוייקות יותר לניסויי "החוק השני".

מאמר זה מתאר שני ניסויים שבוצעו בעזרת מעבדה ממוחשבת של חברת לוגל (ראה תהודה 15 (2)) תוך שימוש בו זמני בשני חיישנים: מד מרחק (מסוג: Sonic Ranger) וחיישן כוח המחוברים דרך קופסת ממשק אל המחשב.

לשנות את קצב הדגימה, אך הקצב של 50 פעם בשניה נמצא כטוב ביותר. תוכנת המחשב מאפשרת להציג על המסך גרף של הכח, המרחק וגם המהירות (המחשב מבצע פעולת גזירה מספרית) כפונקציה של הזמן. אפשר להתאים בצורה נוחה למדי את קנה המידה של הגרף, את גודלו על המסך ואת מיקום יתר האינפורמציה הדרושה.

תנאי הניסוי

על מנת לקבל את תוצאות טובות יש להקפיד על התנאים הבאים:

א. **העגלה** - יש להקפיד לשמן (ספריי) את מיסבי הכדורים של הגלגלים. מדביקים ריבוע קרטון (7×7 ס"מ) לצד העגלה הפונה למד-המרחק, על מנת לאפשר החזרה טובה של גלי הקול. צריך לחבר את מד הכח אל העגלה עם סרט מדבק חזק (מלחמת המפרץ) כך שישאר מקום לגלילים על העגלה (ראה תצלום). החוט המקשר את החיישן לממשק צריך להיות תלוי מעל העגלה (עם סטייב) כך שלא יפריע לתנועתה.

ב. **המסלול** - צריך להיות נקי ואופקי (כדאי לבדוק עם פלס). אפשר להשתמש במסילה המשווקת עם העגלות, אך לא בגלגלת שלה, שאינה מספיק טובה לניסוי רגיש כפי שנבצע אותו.

ג. **הגלגלת** - חייבת להיות טובה (למשל ממערכת מכניקה של ברנדייס), קלה וללא רעידות.

ד. **המשקולת** - חייבת להיות במנוחה (בלי תנודות) לפני תחילת ההרצה.

כיול החיישנים

מד הכוח: לפני תחילת הניסוי יש צורך בכיול של מד הכח - מכילים אותו בשתי נקודות:

אפס כאשר החוט אינו מושך, ו-1 ניוטון במצב סטטי כאשר

מחזיקים את העגלה קבועה במקומה ועל החוט תלויה מסה של 100 ג'. הכיול נעשה בעזרת תכנית מתאימה.

מד המרחק: למד המרחק העל קולי מגיבלת מינימום של מרחק, שמתחתיו לא ניתן לבצע מדידה. במד המרחק שבו בוצע ניסוי זה סף המדידה הוא 41 ס"מ. לכן, אם מעוניינים שגרפי המרחק יתחילו מערך 0, יש להציב את מד המרחק במרחק של 41 ס"מ מן המיקום ההתחלתי של העגלה, בקצה המסילה. שים לב: המרחק נמדד בין המתמר לבין הקרטון המחזיר את ההד.

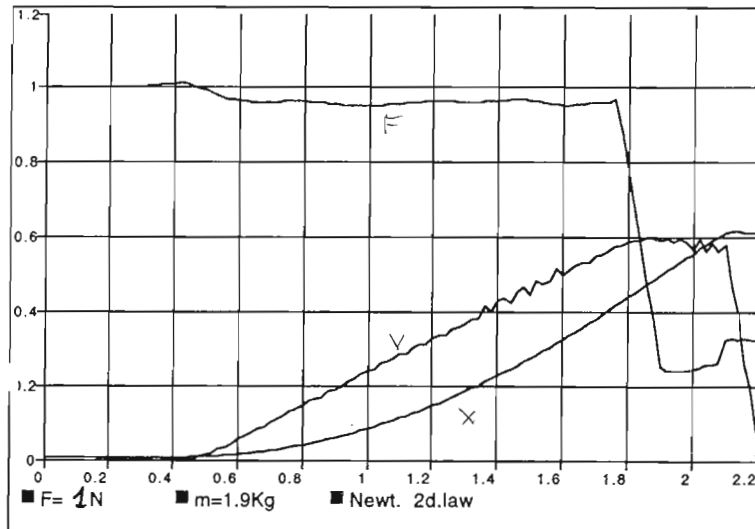
ביצוע הניסוי

מציבים את העגלה, עמוסה 4 גלילים, בקצה המסילה ומחזיקים בה. עתה עוברים לתכנית הראשית ומפעילים את המדידה. עם קבלת ההתראה הקולית המודיעה על התחלת המדידה משחררים את העגלה. על המסך מופיעים שלושה גרפים (אותם הגדרנו מראש): כוח, מיקום ומהירות. הגרפים אינם מופיעים בזמן אמת אלא בפיגור מסויים לאחר התנועה עצמה. מפסיקים את המדידה ברגע שהגרפים מיצגים את סיום התנועה: הכח ירד לאפס (בערך) והעגלה נעצרת (המהירות יורדת לאפס). את הגרף שולחים למדפסת בעזרת פקודה מתאימה.

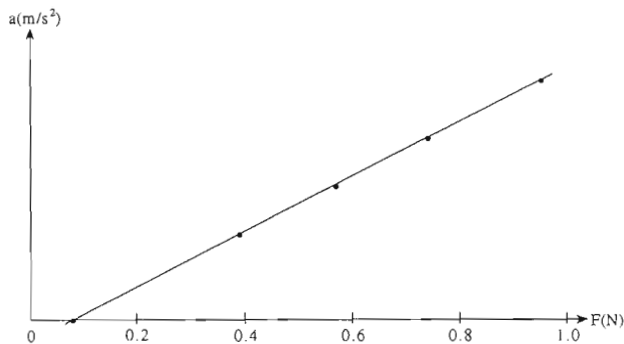
עתה אפשר לחזור על ההרצה עם מסות שונות של העגלה (על ידי הסרת גלילים) ומשקולות שונות (על ידי הסרת דיסקיות). בתום כל מדידה מדפיסים את הגרפים. בניסוי זה בוצעו שתי סדרות של מדידות: 4 כאשר המסה קבועה ו-4 כאשר המשקולת קבועה. מתוך הגרפים ניתן לבדוק את תלות התאוצה בכח ובמסה.

ניתוח הניסוי

בתרשים 2 מוצג גרף אחד:



תרשים 2



תרשים 3

מתוך הגרף ניתן להסיק כי גודלו של כח החיכוך הוא 0.08N. ערך זה מתאים לגודל שחושב קודם על סמך ניסוי בודד, ומאשר את מקדם החיכוך הנמוך. באופן דומה, ניתן מתוך מדידות, תוך שינוי מסת העגלה, לנתח את הקשר בין התאוצה למסה כאשר מופעל כח קבוע.

ניסוי 2 – "תנועה בערך הרמונית" - החוק השני של ניוטון עם כח משתנה

שאלה מעניינת וחשובה עקרונית היא, האם הקשר $F = ma$ תקף גם אם הכח משתנה?

לשם כך בוצע ניסוי נוסף הקרוי "תנועה בערך הרמונית". בניסוי זה נקשרו אל מד הכח הצמוד לעגלה גומיות ארוכות, המחוברות אל קצות השולחן הארוך, כך שאם מזיזים את העגלה ממצב שיווי המשקל, היא מבצעת מספר תנודות עד שהיא נעצרת.

גם כאן מתבצעת מדידה ישירה של כוח ומרחק, אלא שהפעם נרשמת דגימת המדידות ישירות בגליון אלקטרוני (שהוא חלק בלתי נפרד מתוכנת המעבדה הממוחשבת של לוגל). בגליון האלקטרוני נרשמים איפוא, בכל 0.02 שניה, ערך הכח, המקום והמהירות (המחושבת אוטומטית כקודם). בטור נוסף של הגליון, מחושבת התאוצה על פי $\Delta v / \Delta t$ תוך שימוש בשלושה ערכים לפני הרגע בו מבוצע החישוב ושלושה ערכים אחריו על מנת להתגבר על תנודות מקריות של המהירות.

עתה ניתן להציג גרף, המתאר את הכח, המקום, המהירות והתאוצה כפונקציה של הזמן (תרשים 4). מן הגרף הזה ברור, כי הכח F והמקום x הם באנטי פזה (הפוך מופע) המתאים ל $F = -kx$. כמו כן v מקדים את x ברבע מחזור $(\pi/2)$ ו- a מקדים את v ברבע מחזור $(\pi/2)$ ומקדים את x ב- π . כלומר בכל רגע ורגע: $a \propto F$.

מתוך גרף זה ניתן לראות כי:

א. גרף הדרך הוא פרבולה.

ב. גרף המהירות הוא קו ישר. המערכת כה רגישה, שרואים קצת תנודות (מדוע?). מגרף המהירות ניתן להסיק כי כח קבוע גורם לתאוצה קבועה. ניתן גם לחשב את התאוצה. במקרה זה התאוצה הנמדדת מתוך שיפוע הגרף היא: 0.45 m/s^2 .

ג. גרף הכח מראה תופעה מעניינת וחשובה להבנה: בשעת ריצת העגלה, הכח (מתיחות החוט) קטן יותר מהכח הפועל במצב סטטי. הסיבה היא כמובן, שחלק מהכוח צריך להאיץ גם את המשקולת. ידוע לנו כי:

$$T = mg - ma$$

אם מסת המשקולת היא 100 ג', הכח הסטטי הוא 1N, ובשעת הריצה הוא:

$$T = 0.1(9.8 - 0.45) = 0.94 \text{ N}$$

הגרף מראה זאת בברור.

ד. המהירות מתייצבת ברגע שהכח יורד ל- 0 ($t = 1.8\text{s}$).

ה. גרף הדרך הופך לקו ישר מאותו רגע (קשה לראות זאת מתוך קנה המידה בתרשים 3, אך ניתן לשנות את קנה המידה על מנת להתמקד בפרטים).

ו. אפשר לחשב את מקדם החיכוך μ בין העגלה למישור.

כח החיכוך f הוא:

$$f = F - Ma = 0.94 - 1.9 \times 0.45$$

$$f = 0.09 \text{ N}$$

$$\mu = 0.09 / 19 = 0.005$$

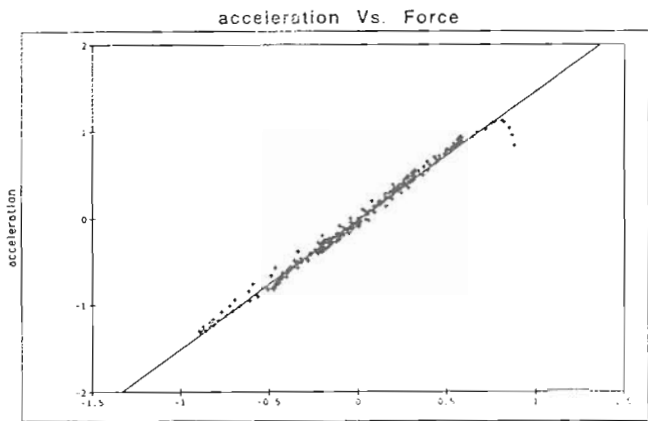
מפתיע! זוהי תוצאת ה"טיפול" בעגלה.

ז. בארבע הריצות שנעשו בכוחות שונים נמדדו התוצאות הבאות:

המשקולת (kg)	הכח הנמדד בחישן (N)	התאוצה m/s^2 (שיפוע הגרף)
0.04	0.38	0.16
0.06	0.57	0.25
0.08	0.74	0.34
0.1	0.95	0.45

כאשר משרטטים תוצאות אלו בגרף, קל לראות מתוך הגרף (תרשים 3) כי ניתן להעביר ישר דרך הנקודות, אך הוא אינו עובר דרך ראשית הצירים בגלל כח החיכוך:

$$F - f = ma$$



תרשים 5

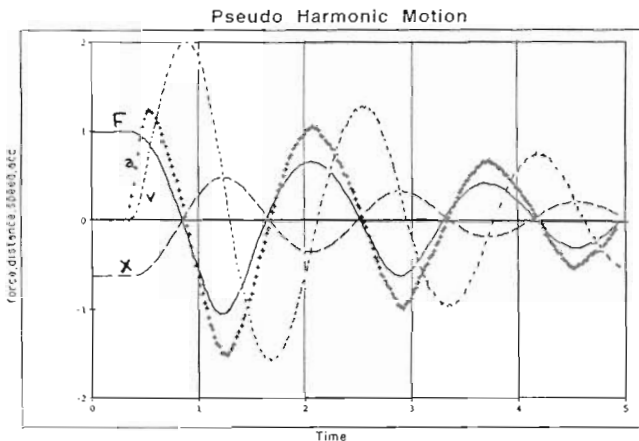
הניסוי ניתן לביצוע על ידי תלמידים רק אם יש להם מיומנות מספקת בשימוש במחשב. יש צורך בפעולות (כיוול מד הכוח, התאמת ערכים לצירים וכיו) שמקשות על תלמיד בלתי מנוסה. אך מספר הניסויים שניתן יהיה לבצע במערכת MBL עשוי להצדיק השקעת זמן ראשונית להכרת התכנה.

הערות:

- ★ הניסוי בוצע תוך שימוש במחשב Macintosh, אך תוכנה זהה קיימת גם עבור מחשבי PC (תואמי IBM) בסביבת Windows.
- ★ התוכנה על תפריטיה כתובה באנגלית.
- ★ בשלב זה עדיין קורה לפעמים שהמערכת מגיבה באופן בלתי צפוי (לפחות למי שאינו מתמצא בה במידה מספקת) ורצוי שיפור נוסף.

ביבליוגרפיה

1. חד זינגר: ניסוי 2: החוק השני של ניוטון, עמ' 11 בספר: פיסיקה - לקט ניסויים, בהוצאת המחלקה להוראת מדעים, מכון ויצמן למדע, 1988.



תרשים 4

ניתן גם לבדוק מספרית שמקדם הפרופורציה בין הכוח לתאוצה הוא מסת העגלה: $F = ma$.

לבסוף, אפשר להשתמש באותם הערכים של הגליון האלקטרוני כדי לתאר גרף של a כפונקציה של F . גרף זה הוא קו ישר, כמתחייב מן היחס הישר (תרשים 5).

לסיכום, צירוף החיישנים מד כח ומד מרחק לתוכנת מחשב טובה מאפשר לבצע ניסוי "נקיי", וגם מדויק למדי. ניתן לבצע את הניסוי גם עם עגלות Pasco, אם כי פחות נוח לחבר אליהן את מד הכח ולשנות את מסתן. מקדם החיכוך שלהן קטן יותר, אך השיפור הנובע מזה בניסוי הוא מזערי. לא ניתן, לפי הערכתנו, לבצע את הניסוי עם ספסל אויר, משום שקשה לחבר את מד-הכח לעגלה שלו, והחוט המקשר את מד הכח למחשב ישפיע הרבה יותר, יחסית למסה הקטנה של העגלה.

... באיור



סוכה קרס

בני שבט של אינדיאנים באמצונס קראו בספר פיסיקה, שהתץ הוא וקטור ושהוקטור הוא א. על כן כשרצו אצור אצור בר שלמדו אפניהם, אצור האינדיאנים כוון אא אצור קצב יאניה, והשני קצב שלאלה אצ איוצב שהאץ האיוצב אא התץ הקוול, והיו אא האציה. שבט אינדיאני צה זועד ברעב ונכאצ.

אא אשכנץ אא אלויוק שהם צוסקים בלנד. הם יאהבו אורץ אא ארצה שהם באא יוסקו בלנד. הם ישנאו אורץ.