

## פיזיקה על גלגלים - לימוד פיזיקה באמצעות רכיבה על אופניים

חזי יצחק<sup>1</sup>, גיל ברן  
תיכון לחינוך סביבתי, מדרשת שדה בוקר  
<sup>1</sup>המכון לחקר המדבר, אוניברסיטת בן גוריון בנגב  
דוא"ל: [yiyeh@bgu.ac.il](mailto:yiyeh@bgu.ac.il)

"החיים הם כמו אופניים, צריך כל הזמן להתקדם מבלי לעצור, כדי לא לאבד את שיווי המשקל"  
אלברט איינשטיין

### תקציר

מי מאיתנו לא רכב מעודו על אופניים? אך רק מעטים נתנו את דעתם לכך שהאופניים הם אמצעי התחבורה היעיל ביותר מבחינה אנרגטית שפיתח האדם. רכיבה על אופניים יעילה יותר מהליכה, ריצה או שחייה. מעטים נתנו את דעתם לבעיית יציבות האופניים - במה תלויה יציבות האופניים? האם זהו האפקט הג'ירוסקופי או שמה זו מיומנות הרוכב או אולי הגיאומטריה של שלדת האופניים? מעניין שזוהי בעיה פיזיקלית מורכבת למדי שהתשובה לה אינה ידועה לאשורה עד היום. במאמר זה אסקור את הכוחות השונים הפועלים על המערכת אופניים+רוכב שקובעים את החוק השני של ניוטון. נציג פתרון של משוואה זו במקרה יחסית פשוט, בו הרוכב אינו מדווש והכוחות היחידים הפועלים על האופניים הם כח החיכוך עם האוויר וחיכוך הגלגול וכן שיטה למדידת הפרמטרים החשובים הקשורים לכוחות חיכוך אלו. כמו כן נציג בקצרה את האפשרויות הגלומות באופניים ללימוד עקרונות הפיזיקה.

### 1. היסטוריה קצרה של התפתחות האופניים

האופניים הם המצאה מאוחרת יחסית. האופניים הראשונים הומצאו על ידי הברון הפרוסי פון דראיס שפיתח למעשה מכונת ריצה בשנת 1817 (ולא ע"י ליאונרדו דה וינצ'י כפי שרבים סבורים). ב-1815 התפרץ הר הגעש Tambora באינדונזיה ופלט כמויות גדולות של אפר שגרמו לכך ששנת 1816 כונתה באירופה "כשנה ללא קיץ". היבולים נפגעו ומחירי המספוא לסוסים עלה וסוסים רבים ששמשו כאמצעי תחבורה הומתו. דראיס המציא את האופניים כדי להתגבר על המחסור בסוסים. אופניים הראשונים שנבנו מעץ הונעו על ידי הרוכב שדחף ברגליו את הקרקע (ראה איור 1). כידון עץ פשוט אפשר היגוי של האופניים. עד מהרה גילה קרל דראיס שכאשר האופניים בתנועה הוא יכול לשמור על יציבותם גם כשרגליו באוויר ולא נוגעות בקרקע. כמו כן התברר שהאופניים מסוגלים להגיע למהירות של 14 קמ"ש ולהשיג מרכבות דואר שהונעו ע"י סוסים אפילו לאורך מסע שנמשך כשעתיים (Wilson 2004).

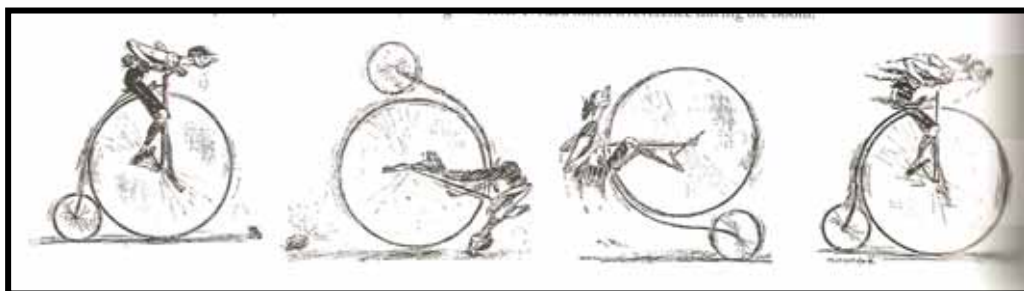


איור 1: האופניים הראשונים שהומצאו על ידי הברון פון דראיס ב-1819. האופניים בנויים מעץ וחסרים פדלים ובעלי מערכת היגוי מאד פשוטה. האופניים הגיעו למהירות מירבית של 14 קמ"ש בירידות, מהר יותר ממהירות ממוצעת של הליכה.

בין השנים 1817-1863 האופניים התפתחו באופן איטי ובשל מחירם הגבוה ואיכות הדרכים הירודה, רק "משוגעים" לדבר השתמשו בהם. ב-1863 יצרו האחים הצרפתיים מיכאוקס אופניים עם פדלים המחוברים לגלגל הקדמי וגלגלים ממתכת. האופניים זכו לכינוי המפוקפק "מטלטלי עצמות" (הצמיג הפניאומטי פותח ע"י מישלן רק ב-1888). באיור 2 מופיע דגם משופר של אופניים שנבנו ע"י פרייס ב-1869, ובהם הורכבו צמיגים מגומי מלא על החישוקים וכן ניתן לראות מעין בולם זעזועים מתחת לכסא. הצעד הבא היה פיתוח אופני הגלגל הגבוה (high wheeler) ע"י גיימס סטרלי באנגליה ב-1868. קוטר הגלגל הגדול הגיע 150 ס"מ וקוטר הגלגל הקטן ל-50 ס"מ.



איור 2: האופניים של פרייס שיוצרו ב-1869. הפדלים הורכבו על הגלגל הקדמי. סיבוב אחד של הפדלים היה שקול לסיבוב אחד של הגלגל הקדמי ולכן האופניים התקדמו בכל סיבוב של הפדלים מרחק השווה להיקף הגלגל.



איור 3: קריקטורה המתארת את היציבות הלקויה של אופני הגלגל הגבוה. נפילה מאופניים אלו לוותה בדרך כלל בחבלות גופניות והאופניים נחשבו ללא בטוחות.

רוכב מיומן מסוגל היה להגיע למהירויות גבוהות ומשקלם היה יחסית נמוך 13.6 ק"ג. אולם אופניים אלו התאימו לבעלי רגליים ארוכות ויציבותם הייתה נמוכה. ב-1873 פותח התלת אופן שהתאים גם לרכיבת נשים הלבושות בשמלות והיה מצויד בדיפרנציאל שאפשר קצב סיבוב שונה של הגלגלים האחוריים בעת סיבוב. בכלל, פיתוח האופניים תרם רבות לעצמאות הנשים שמעתה יכלו לנוע ממקום למקום ללא תלות בבעלים וכן הביא לכך שנשים החלו ללבוש בגדים נוחים יותר כמו מכנסיים במקום שמלות. ב-1885 פיתח סטארלי את האופניים הבטוחים שבהם הרוכב ישב בין שני הגלגלים. השלדה הייתה חזקה והתמסורת נעשתה באמצעות שרשרת. דגם זה היה מוצלח ביותר ולמעשה היווה את האב-טיפוס לאופניים המודרניים של ימינו.



איור 4: האופניים הבטוחים של "רובר" שפותחו על ידי סטארלי בשנת 1885. מיקום הרוכב בין הגלגל האחורי לבין הגלגל הקדמי, תרם לבטיחות הרכיבה. התמסורת התבצעה על ידי שרשרת והכידון אפשר היגוי נוח של האופניים.

במשך השנים נוספו שכלולים רבים לאופניים שכללו שלדות חדשות מחומרים קלים, מערכות הילוכים, מערכות בלמים ועוד, אך המהפיכה הבאה התרחשה בקליפורניה ב-1978 עם המצאתם של אופני ההרים ששחררו את האופניים מהכבישים ואפשרו לרכב כמעט בכל תנאי שטח (ראה איור 5). מהפיכה זו שעדיין נמשכת בימינו היא אחת הסיבות לפופולריות העצומה של הרכיבה על אופני הרים שאנו עדים לה כיום בארץ ובעולם.



איור 5: אופני הרים מודרניים. האופניים מצוידים בבולמי זעזועים קדמיים ואחוריים וכן במעצורי דיסק. השלדה חזקה וקלה והצמיגים הרחבים מאפשרים אחיזה טובה יותר בקרקע בתנאי שטח קשים. כמו כן מערכת ההילוכים כוללת 27 הילוכים המקנים גמישות מרבית ביחס ההעברה ובייחוד מאפשרים טיפוס בעליות תלולות מאד על דרכי עפר או שבילים.

## 2. הכוחות הפועלים על המערכת אופניים+רוכב

על המערכת אופניים+רוכב הנמצאת בתנועה בקו ישר פועלים מספר כוחות. חשוב להדגיש שמערכת זו אינה גוף נקודתי ויש חשיבות גם לנקודת האחיזה בה פועלים הכוחות. ראשית, על ידי סיבוב הפדלים הרוכב מפעיל מומנט סיבוב המסובב את גלגל השיניים הקדמי (שנקרא גם גלגל מניע) ובאמצעות השרשרת, ההנעה עוברת לגלגלי השיניים האחוריים המחברים לגלגל האחורי. הגלגל האחורי מסתובב ומפעיל כח חיכוך על הקרקע שכיוונו אחורה. על פי החוק השלישי של ניוטון הקרקע מפעילה כח שווה אך בכיוון הפוך על האופניים וזהו למעשה הכח שמניע את האופניים. באיור 6, משורטטים הכוחות הפועלים על האופניים המתקדמים בעלייה.



איור 6: הכוחות הפועלים על המערכת אופניים+רוכב הנעים בקו ישר. המשקל פועל ממרכז המסה של המערכת והכוחות הנורמליים פועלים בנקודות המגע של הצמיגים עם האופניים. הכח המניע את האופניים הוא למעשה כח החיכוך שהקרקע מפעילה על הגלגל האחורי. על האופניים פועלים שני כוחות חיכוך עיקריים. האחד הוא כח החיכוך עם האוויר והשני הוא כח החיכוך בין הגלגלים לקרקע. כח החיכוך הפנימי הפועל בצירי הגלגלים הוא קטן והוא מוזנח במשוואה (1).

נוכל לרשום את משוואת התנועה של האופניים (Wilson 2004; Kyle 2003) באופן הבא:

$$ma = F_p - (F_A + F_S + F_R) \quad .1$$

כאשר  $F_p$  הוא הכח המניע את האופניים,  $F_A$  הוא כח ההתנגדות של האוויר,  $F_S$  הוא כח ההתנגדות הנובע משיפוע הדרך,  $F_R$  הוא כח חיכוך הגלגול הנובע מדפורמציה של הצמיג והקרקע.  $m$  היא מסת הרוכב והאופניים ו- $a$  היא תאוצת הרוכב והאופניים. הכוחות החשובים בכביש יחסית חלק, הם כח ההתנגדות של האוויר וחיכוך הגלגול. כח החיכוך עם האוויר נובע מדחיפת האוויר הצידה בעת התקדמות האופניים ויצירת לחץ אוויר גבוה לפני הרוכב ולחץ אוויר נמוך מאחורי הרוכב וכן מחיכוך של האוויר הנע על שטחי הפנים של הרוכב והאופניים. מה שחשוב הוא שכח זה תלוי **בריבוע מהירות האופניים**. לכן מעל מהירות של 10 קמ"ש כח זה הופך לדומיננטי. באופן מדויק יותר ניתן לרשום את כח ההתנגדות של האוויר באופן הבא:

$$F_A = K_A (v + v_w)^2 \quad .2$$

כאשר  $v$  היא מהירות האופניים ביחס לקרקע ו- $v_w$  היא מהירות הרוח ( $v_w > 0$  עבור רוח נגדית). המקדם  $K_A$  תלוי שטח חתך של הרוכב, בסוג האופניים ובצפיפות האוויר ובאופן מדויק על פי הביטוי הבא (Hennekam 1990):

$$K_A = \frac{1}{2} c_d A \rho \quad .3$$

עבור סוג אופניים נתון וצורת הישיבה של הרוכב, מקדם הגרר  $c_d$  (מקדם חסר מימדים) הוא כמעט קבוע ולא תלוי במהירות. לדוגמה עבור אופני ספורט  $c_d = 1.0$  כאשר הרוכב זקוף וערכו קטן ל-0.9 כאשר הרוכב כפוף. שטח חתך טיפוסי של רוכב במצב זקוף הוא  $A = 0.4 \text{ m}^2$ .  $\rho$  היא צפיפות האוויר וערכה בגובה פני הים הוא  $1.2 \text{ kg/m}^3$ . באמצעות נתונים נוכל לחשב את כח התנגדות האוויר עבור רוכב אופני ספורט (במצב זקוף) הנע במהירות 36 קמ"ש (10 מטר לשנייה) ללא רוח:

$$F_A = 0.5 \times 1.0 \times 0.4 \times 1.2 \times 10^2 = 24 \text{ N} \quad .4$$

חיכוך הגלגול תלוי בכוחות הנורמליים הפועלים על כל גלגל ובמקדם חיכוך גלגול  $c_r$  התלוי בלחץ האוויר, בשטח וצורת החתך של הצמיג, בקוטר הגלגל וכן במשטח עצמו. בקירוב נוכל לאחד את שני הכוחות הנורמליים לכח אחד  $N$  ולרשום את חיכוך הגלגול הפועל על שני הגלגלים ביחד באופן הבא:

$$F_R = c_r N \quad .5$$

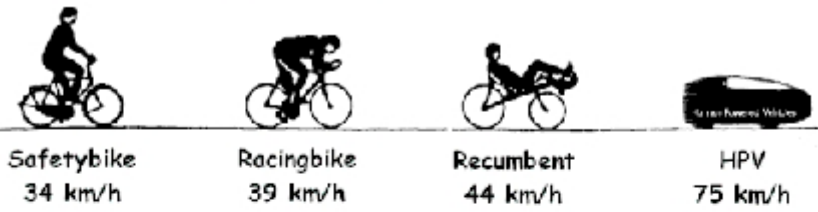
עבור אופני מירוץ ערך טיפוסי של מקדם חיכוך גלגול הוא  $c_r = 0.003$ . לדוגמה נניח מסה כוללת של 85 ק"ג עבור רוכב ואופניים ונוכל לחשב את כח חיכוך הגלגול במישור:

$$F_R = 0.003 \times 85 \times 9.8 = 2.50 \text{ N} \quad .6$$

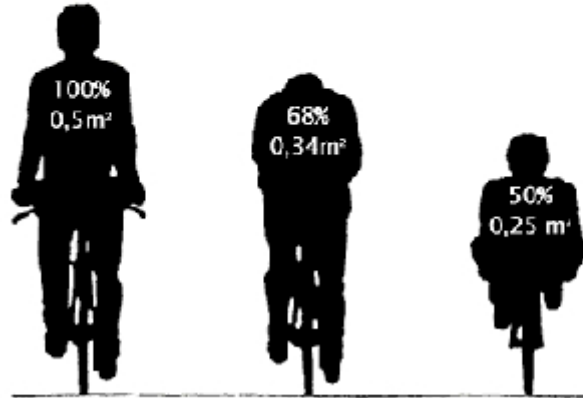
כדאי לשים לב שכח חיכוך הגלגול אינו תלוי במהירות (למעשה הוא תלוי במקצת) בעוד שכח התנגדות האוויר תלוי בריבוע המהירות. עובדה זו היא בעלת חשיבות מכרעת למהירות האופניים. כדי להגיע למהירויות גבוהות יש להקטין את כח התנגדות האוויר על ידי שיפור הצורה האווירודינמית של האופניים. עושים זאת על ידי בניית מעטפת מיוחדת מסביב לאופניים בהם הרוכב נמצא במצב של ישיבה. אופניים כאלו נקראות בשם הכללי HPV שפירושו Human Powered Vehicles ומידי שנה נערכות תחרויות שבהן מנסים לשבור את שיא המהירות במישור או לשבור את שיא המרחק שניתן לעבור בשעה<sup>1</sup>. איור 7 מדגים את המהירויות שניתן להגיע בסוגים שונים של אופניים תוך השקעת הספק של 315 וואט. רוכבים תחרותיים מקטינים את התנגדות האוויר על ידי רכיבה בטור כאשר הרוכבים צמודים האחד לשני, מה שנקרא בשפה המקצועית Drafting, במקרה זה הרוכבים מאחור חוסכים כ-20% מהאנרגיה שהייתה דרושה להם לו רכבו לבד.

<sup>1</sup> פרטים נוספים על ההיסטוריה והמכניקה של אופניים אלו ראה <http://home19.inet.tele.dk/badbirk>

If you use 315W you will gain this speed:



The explanation is the reduction of frontal area:



Source: HPV Club Denmark, publication nr 1/92

איור 7: המהירות שניתן להגיע בסוגים שונים של אופניים כאשר ההספק המושקע הוא 315 וואט. הגורם העיקרי המאפשר את הגדלת המהירות הוא הקטנת שטח החתך (A בנוסחה 3) וכן הקטנת מקדם הגרר על ידי שיפור זרימת האוויר מסביב למעטפת של אופני ה-HPV.  
(מקור התמונה הקישור <http://home19.inet.tele.dk/badbirk/aerodyna.htm>)

נוכל לסכם ולרשום את משוואת התנועה של האופניים באופן הבא (בהזנחת כח החיכוך במיסבים וכן בהנחה שחיכוך הגלגול אינו תלוי במהירות):

$$ma = F_p - mg \sin \theta - (mg \cos \theta)c_r - K_A(v + v_w)^2 \quad .7$$

כאשר  $\theta$  היא זווית השיפוע,  $m$  היא המסה של הרוכב והאופניים ו-  $K_A$  נתון על ידי נוסחה (3) והיחידות שלו הן  $\text{kg/m}$ . ממשוואה זו נובע שהרוכב חייב להשקיע כח השווה לכוחות החיכוך השונים כדי לשמור על מהירות קבועה. מקרה פרטי של משוואה זו, מתקבל עבור אופניים שבהם הרוכב הפסיק לדווש והרכיבה מתבצעת במישור<sup>2</sup> כלומר  $\theta = 0$  ו-  $F_p = 0$  (הנחנו גם שמהירות הרוח היא אפס):

$$ma = m \frac{dv}{dt} = -F_R - K_A v^2 \quad .8$$

בסעיף הבא נראה כיצד משוואה זו מאפשרת לחשב את כח חיכוך הגלגול  $F_R$  ואת הגורם  $K_A$  הקובע את התנגדות האוויר.

<sup>2</sup> ניתוח הרכיבה במורד משור משופע בו האופניים מגיעות למהירות גבולית מופיע במאמר:

Hennekam and Bontsema, J. 1991. Determination of  $F_r$  and  $K_d$  from the solution of the equation of motion of a cyclist. Eur. J. Phys. 12, 59-63.

### 3. מדידת כח חיכוך גלגול ומקדם חיכוך האוויר

משוואה (8) היא משוואה דיפרנציאלית לא ליניארית שקיים עבורה פתרון אנליטי מדויק (Hennekam and Govers 1996):

$$v(t) = \beta \tan(\phi - t / \tau) \quad .9$$

כאשר  $\beta = \sqrt{F_R / K_A}$  ו-  $\tau = m / \sqrt{F_R K_A}$  קשורים לגדלים הפיזיקליים  $F_R$  ו-  $K_A$  שמעניינים אותנו על ידי

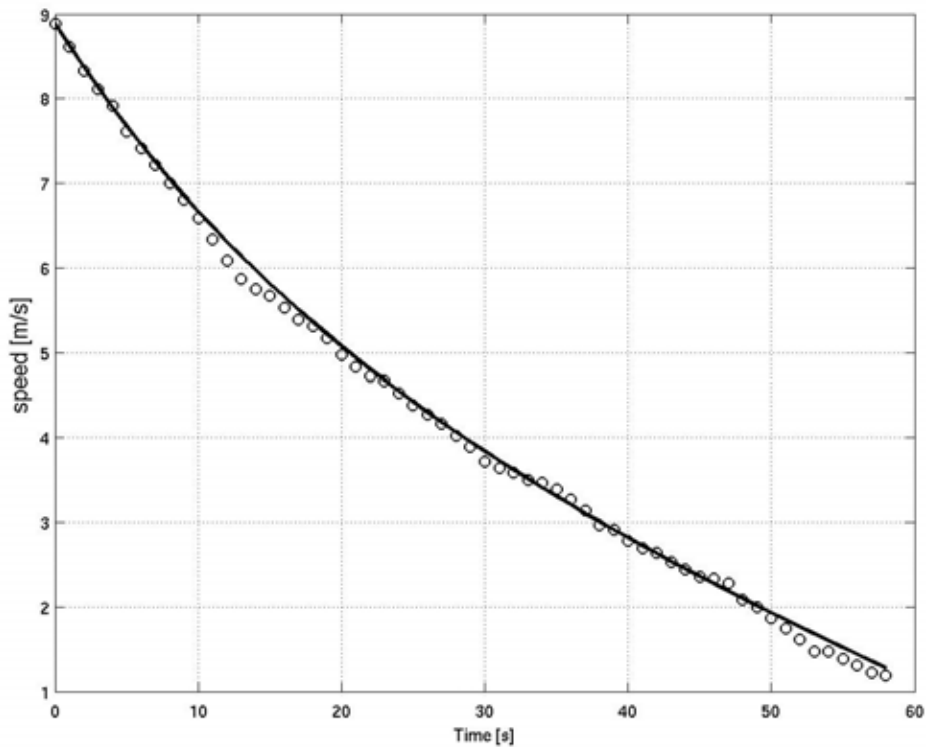
$$F_R = m\beta / \tau, \quad K_A = m / \beta\tau, \quad v(0) = v_0 = \beta \tan \phi \quad .10$$

אחת השיטות המעשיות למדידת  $F_R$  ו-  $K_A$  נקראת Freewheeling בה הרכב מגיע למהירות מסוימת ורצוי שהיא תהיה גבוהה, ואחר מפסיק לדווש ומאפשר לאופניים להתקדם עד שמהירותם תקטן בשל כוחות החיכוך עד למתחת לסף שניתן לשמור בו על יציבות. הרעיון הוא למדוד את שינוי המהירות בזמן. דיוק המדידה יגדל כאשר המסלול יהיה מישורי ומוגן מהשפעות רוח. בשנים האחרונות חלה מהפיכה באמצעי מדידה המותקנים על האופניים עצמם ומאפשרים למדוד ולאגור נתונים שונים על הרכיבה כמו: מרחק, מהירות, גובה טופוגרפי, סיבובי פדלים, דופק והחידוש הגדול הוא מדידת הספק מושקע (במאמר זה לא התייחסנו כמעט לנושא החשוב של הספק). שתי מערכות חיישניים האחת של חברת Polar והשנייה של חברת Power Tap זמינות כיום בשוק ומחירם נע סביב 600 דולר<sup>3</sup> למערכת. מערכת ה- Power Tap מאפשרת מדידות במרווחי זמן של שניה (לעומת כל 5 שניות במערכת ה- Polar) ולכן היא מתאימה יותר לביצוע הניסויים הללו.

איור 8 מציג תוצאות של מדידה שנעשתה על ידינו באופני מרוץ קלים שעליהם הותקנה מערכת מדידה מסוג Power Tap. חשוב לציין שהמהירות קטנה עם הזמן, אך בשניות הראשונות כאשר מהירות האופניים גדולה היא פוחתת בקצב מהיר יותר מאשר לקראת סוף התנועה. התנהגות זו נובעת מכך שבתחילה כח ההתנגדות עם האוויר הוא הדומיננטי ובמהירויות נמוכות כח חיכוך הגלגול הוא הכח העקרי העוצר את האופניים.

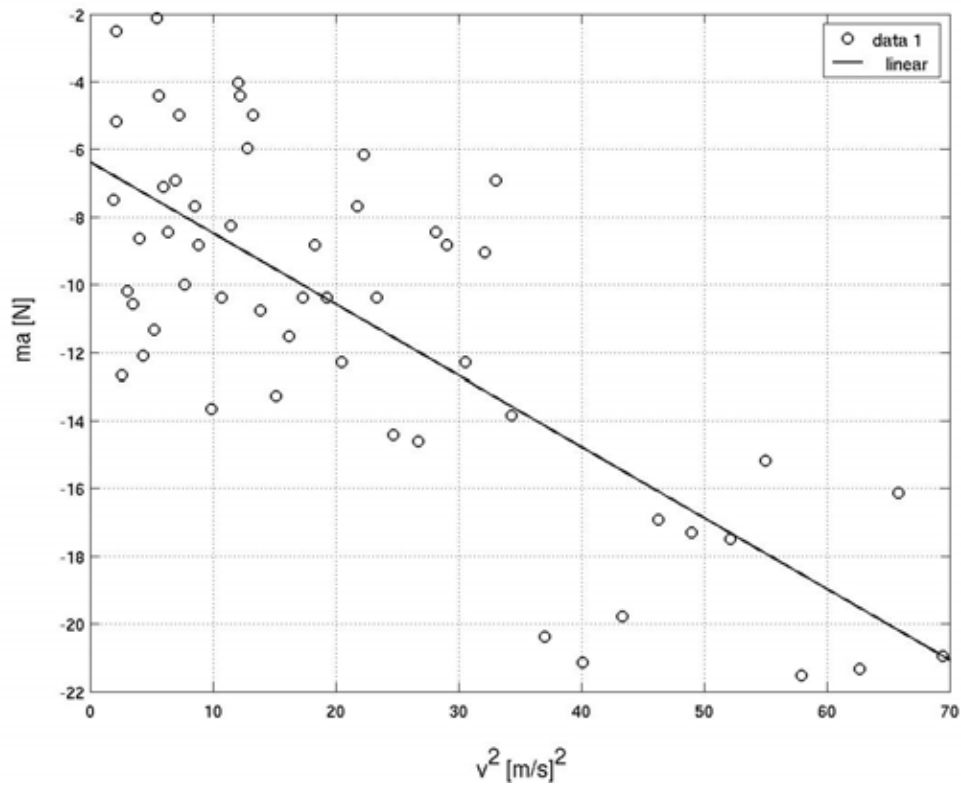
<sup>3</sup> מערכת נוספת יקרה הרבה יותר של חברת SRM מותקנת על זרועות הפדלים.





איור 8: הנקודות מציגות את תוצאות מדידת המהירות של אופני מרוץ איכותיים במשך כ- 58 שניות על כביש משורי. הקו מציג את הקירוב לנקודות על פי משוואה (9) כאשר  $K_A = 0.205 \text{ kg/m}$  ו-  $F_R = 6.2 \text{ N}$ , המהירות ההתחלתית של האופניים בסוף קטע הדיווש הייתה 8.9 מטר לשנייה.

במקום הניתוח הלא ליניארי הנ"ל של הפתרון האנליטי המדויק של המהירות כפונקציה של הזמן ניתן לשרטט את הגרף של התאוצה (למעשה  $ma$ ) כפונקציה של ריבוע המהירות. על פי משוואה (8) אמור להתקבל קו ישר יורד ששיפועו  $(-K_A)$  ונקודת החיתוך עם הציר האנכי היא  $(-F_R)$ . את התאוצה ניתן למצוא באמצעות נגזרת של המהירות או במדידה ישירה עם חיישן תאוצה ומערכת Xplorer GLX של חברת "פסקו" המשווקת ע"י חברת "שולמן". אנו מתכוונים בעתיד לבצע מדידה זו ולהשוות את התוצאות עם המערכות הייעודיות לאופניים. איור 9 מציג את תוצאות של האנליזה המתקבלת מחישוב התאוצות. ניתן לראות שכתוצאה מחישוב הנגזרת, הערכים של התאוצה רגישים מאוד לשינויים קלים ולרעידות של האופניים, דבר המתבטא בפיזור גדול של הנקודות.



איור 9: גרף של  $ma$  כפונקציה של ריבוע המהירות. התאוצה חושבה מתוך נתוני המהירות ע"פ הנוסחא:  $a(i) = (-v(i+2) + 8v(i+1) - 8v(i-1) + v(i+2))/12$ . הקו הישר מציג את הקירוב הטוב ביותר לנקודות. ע"פ קו זה:  $K_A = 0.21 \text{ kg/m}$  ו-  $F_R = 6.4 \text{ N}$ . חישוב התאוצה על ידי נגזרת רגיש מאד לשינויים קטנים של המהירות וזו הסיבה לפיזור הגדול של הנקודות. בעתיד אנו מתכננים למדוד באופן ישיר את התאוצה על ידי חיישנים שיותקנו על הרוכב ועל האופניים.

באמצעות שיטת מדידה זו ניתן יהיה למדוד את ההבדלים בערכים של  $F_R$  ו-  $K_A$  עבור אופני הרים בעלי צמיגים רחבים לעומת אופני כביש בעלי הצמיגים הצרים וכן לבדוק את ההשפעה של מצב הישיבה על אופניים, ישיבה זקופה לעומת הישיבה הספורטיבית שהיא כפופה. כמו כן ניתן יהיה לבדוק כיצד תלויים ערכים אלו ברכיבה בתנאי שטח שונים כמו כביש או דרך עפר.

"The beauty of the bicycle resides in its sincerity. It contains nothing. All its workings are open and visible." (Bertaut 1936<sup>4</sup>)

האופניים בתוספת מערכת חיישנים המסוגלים למדוד ולאגור נתונים שונים הקשורים לרכיבה מהווים למעשה מעבדה ממוחשבת שניתן לבצע באמצעותה ניסויים ברמות קושי והעמקה שונים להבנת עקרונות הפיזיקה. האופניים הם מערכת מכנית יחסית פשוטה ונפוצה מאד בחיי היומיום ומהווה דוגמה מצוינת להמחשת עקרונות המכניקה (Smith 2006). התלמיד הוא שותף פעיל בניסויים משום שהוא ינתח את הנתונים שיתקבלו מרכיבה שהוא ביצע בעצמו. נושא חשוב שניתן יהיה לחקור אותו עם המערכות החדשות הוא הקשר בין ההספק שהרוכב משקיע למהירות האופניים. ההספק שהוא מושג פיזיקלי שתלמידים מתקשים בדרך כלל בהבנתו, יהפוך למוחשי הרבה יותר וכן ניתן יהיה לדון בנצילות המכנית של האופניים. התלמיד יוכל לבדוק את החשיבות של הגורמים השונים כמו, ההילוך, קצב סיבובי הפדלים, גובה המושב וכושר גופני להספק שהוא מסוגל ליצר בזמן רכיבה. במאמר הראינו דוגמה לניסוי שניתן לבצע באמצעות ניתוח נתוני המהירות של אופניים שהכוחות הפועלים עליהם הם כח חיכוך גלגול וכח ההתנגדות עם האוויר, אך זוהי רק דוגמה אחת לשפע ניסויים שאפשר יהיה לבצע. ברמה נמוכה יותר ניתן לבנות פעילויות להבנת מושגי הקינמטיקה הבסיסיים: העתק, מהירות ותאוצה. במקום לבצע ניסוי ממחושב במעבדה התלמיד יוכל לבצע ניסוי על ידי רכיבה על אופניים. בישראל ספורט רכיבת אופניים נמצא בתנופה חסרת תקדים, ובני נוער רבים (כמו גם מבוגרים) רוכבים הן בשטח והן בכביש וזוהי הזדמנות טובה לנצל את הפופולריות הגדולה של הענף ללימוד מדע וטכנולוגיה.

#### תודות:

הפרויקט "פיזיקה על גלגלים" ממומן ע"י הקרן לעידוד יוזמות חינוכיות, קרן יק"א ישראל ומדרשת שדה בוקר.

#### 5. ביבליוגרפיה ומידע נוסף

מידע נוסף הקשור לפיזיקה של הרכיבה והאופניים ניתן למצוא בקישור:

[http://www.boker.org.il/meida/negev/desert\\_biking/n/physics.htm](http://www.boker.org.il/meida/negev/desert_biking/n/physics.htm)

מידע על מסלולי רכיבה באזורי הנגב ומדבר יהודה ניתן למצוא באתר "באופן אחר":

[biking.boker.org.il](http://biking.boker.org.il)

Hennekam, W. 1990. The speed of a cyclist. *Physics Education*, 25, 141-146.

Hennekam, W. and Govers, M. 1996. The freewheeling cyclist. *Physics Education*, 31, 320-328.

Kyle, C. R. 2003. Selecting cycling equipment. In *High-Tech Cycling 2<sup>nd</sup> edition*. edited by E. R. Burke. Human Kinematics, Champaign, IL, U.S.A, 1-48.

Smith, D. 2006. Mechanics in the real world. *The Physics Teacher*, 44, 144-145.

Wilson, D. G. 2004. *Bicycling Science*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

על ההתפתחות הטכנולוגית של האופניים ראה:

Wilson, S. S. Bicycle technology. *Scientific American*, 81-91.

על האווירודינמיקה של האופניים ראה:

Gross, A. C., Kyle, C. R. and Malewicki, D. J. 1983. The aerodynamics of human-powered land vehicles. *Scientific American*, December, 126-134.

<sup>4</sup> הציטוט מופיע במאמר של D. A. Zolman בקישור:

[http://www.boker.org.il/meida/negev/desert\\_biking/physics/The\\_Bicycle\\_india.pdf](http://www.boker.org.il/meida/negev/desert_biking/physics/The_Bicycle_india.pdf)

