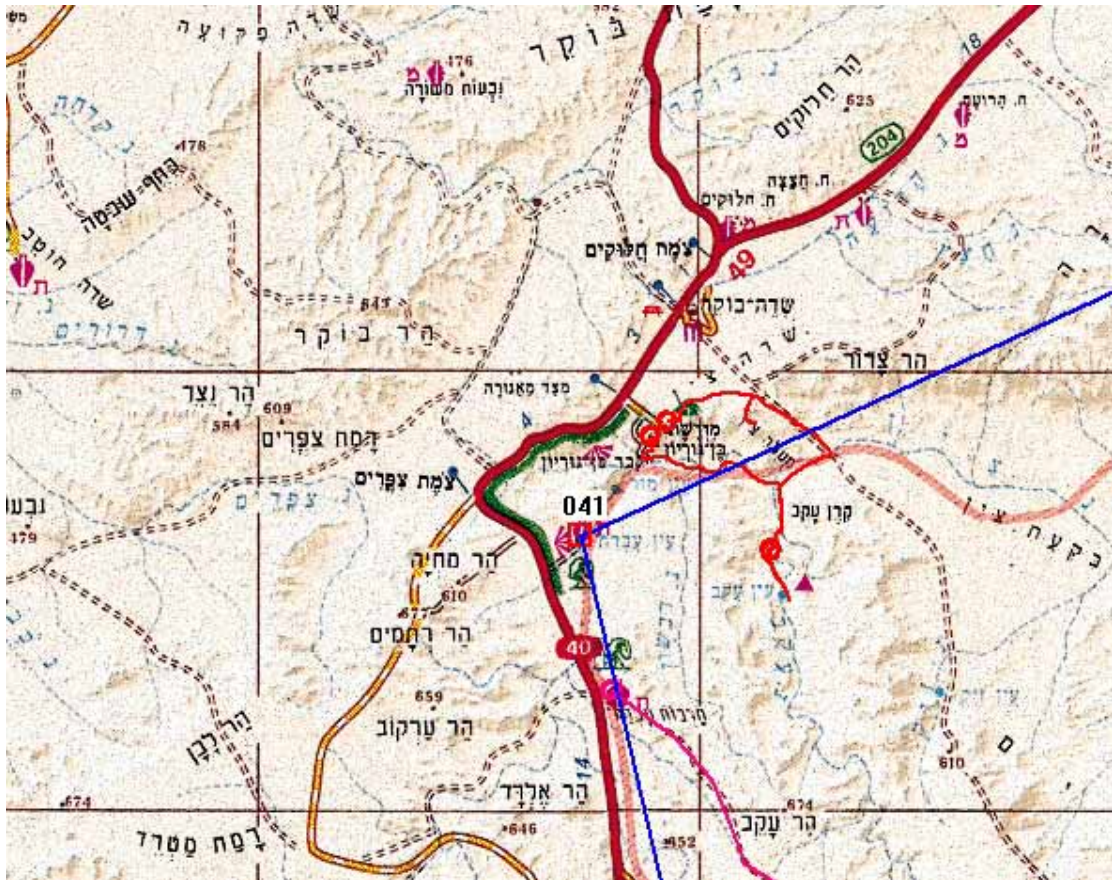




**פיזיקה על גלגלים
השפעת המסה על מהירות הגלישה במורד.
דף פעילות לתלמיד**

מושגים פיזיקליים: החוק השני של ניוטון, חיכוך גלגול, חיכוך עם האוויר, מהירות גבולית.

בניסוי זה נחקר את השפעת המסה על מהירות הגלישה של האופניים במורד, כלומר המהירות אליה הם יגיעו ללא דיווש. הניסוי יתבצע בקטע הכביש העולה מצומת ציפורים לבסיס רמון (ראה מפה מצורפת) בו יש קטע בעל שיפוע קבוע. בניסוי זה יהיה עליך לרכב עם תרמיל שבתוכו יהיו משקולות שבאמצעותן תוכל לשנות את המסה של המערכת אופניים+רוכב בהפרשים של 5 ק"ג.



איור 1: מפת איזור מדרשת בן גוריון. הניסוי יתבצע מהכביש העולה מצומת ציפורים לרמת מטרד. תצלום של הכביש מופיע באיור 2.

הוראות בטיחות:

הרכיבה תתבצע עם קסדות וכפפות. מכיוון שהניסוי מתבצע על כביש שבו חולפות מכוניות מידי פעם, יש להקפיד על רכיב בצד הימני בלבד. חשוב מאד להקפיד לרכב בקו ישר ובזמן הרכיבה להיות מוכנים לעצירת פתאום על ידי לחיצה על שני המעצורים הקדמי והאחורי. שים לב, האופניים מגיעות למהירות של 45 קמ"ש ואף יותר ולכן חייבים להיות מרוכזים מאד במהלך הניסוי.



איור 2: צילום של האופניים ברידה. חובה להקפיד ולרכב רק צד הימני של הכביש, בסמוך לפס הצהוב. המשקולות נמצאות בתוך תרמיל הגב של הרוכב.

רקע תיאורטי

במהלך שיעורי הפיזיקה למדת שבמשור משופע תאוצת הגוף אינה תלויה במסת הגוף, ולכן בהחלקה במורד משור משופע גופים בעלי מסות שונות יגיעו לאותה מהירות סופית בתחתית המישור המשור המשופע. עובדה זו נכונה עבור משור משופע חלק וגם עבור משור משופע לא חלק. האם תמיד המסה אינה משפיעה על מהירות ההחלקה במורד? בניסוי זה נחקר את מהירות הגלישה של אופניים במדרון, ונוכיח שכאשר מתחשבים בחיכוך עם האוויר-המסה משפיעה.

ראשית עליך להבין את הכוחות הפועלים על האופניים במהלך הגלישה במורד. 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. באמצעות 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 סטטי על הקרקע שכיוונו אחורה. על פי החוק השלישי של ניוטון הקרקע מפעילה כח חיכוך סטטי שווה אך בכיוון הפוך על הגלגל

האחורי וזהו למעשה הכח שמניע את האופניים. באיור 3, משורטטים הכוחות הפועלים על האופניים המתקדמים בקו ישר בעלייה.



איור 3: הכוחות הפועלים על המערכת אופניים+רוכב הנעים בקו ישר במורד מישור משופע. המשקל פועל ממרכז המסה של המערכת והכוחות הנורמליים פועלים בנקודות המגע של הצמיגים עם האופניים. 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.

נוכל לרשום את משוואת התנועה של האופניים במורד באופן הבא:

$$1. \quad ma = F_S - F_A - F_R$$

F_A הוא כח ההתנגדות של האוויר, F_S הוא הכח "המדד" הנובע משיפוע הדרך ($mg \sin \alpha$) כאשר α היא זווית השיפוע של המדרון), F_R הוא כח חיכוך הגלגול הנובע מדפורמציה של הצמיג והקרקע. m היא מסת הרוכב והאופניים ו- a היא תאוצת הרוכב והאופניים כאשר הכיוון החיובי של מערכת הצירים נקבע עם כיוון התנועה כלומר במורד המישור המשופע. הכוחות החשובים בכביש יחסית חלק, הם כח החיכוך עם האוויר וחיכוך הגלגול. כח החכוך עם האוויר נובע מדחיפת האוויר הצידה בעת התקדמות האופניים ויצירת לחץ אוויר גבוה לפני הרוחב ולחץ אוויר נמוך מאחורי הרוכב וכן מחיכוך של האוויר הנע על שטחי הפנים של הרוכב והאופניים. הנקודה החשובה היא שכח זה תלוי **בריבוע מהירות האופניים**. ומעל מהירות של 15 קמ"ש כח זה הופך לדומיננטי.

באופן מדויק יותר ניתן לרשום את כח ההתנגדות של האוויר באופן הבא:

$$F_A = K_d v_{b,w}^2 \quad .2$$

כאשר $v_{b,w}$ היא מהירות האופניים ביחס לרוח ו- v_w היא מהירות הרוח ולכן $v_{b,w} = v_b - v_w$ ($v_w < 0$ עבור רוח נגדית¹). המקדם K_d תלוי בשטח חתך של הרכב והאופניים בניצב לכיוון התנועה- A , בסוג האופניים ובצפיפות האוויר ρ ונתון על פי הביטוי הבא:

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

מקדם הגרר c_d (מקדם חסר מימדים) הוא כמעט קבוע ובקירוב ראשון אינו תלוי במהירות. מקדם הגרר נובע בעקר מהתפתחות מערבולות אוויר מאחורי האופניים הנעים. לדוגמה עבור אופני ספורט $c_d = 1.0$ כאשר הרכב זקוף וערכו קטן ל-0.9 כאשר הרכב כפוף. שטח חתך טיפוסי של רוכב במצב זקוף הוא $A = 0.4 \text{ m}^2$. צפיפות האוויר בגובה פני הים היא 1.2 kg/m^3 . באמצעות נתונים נוכל לחשב את כח חיכוך 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 μ_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:

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

עבור אופני מירוץ ערך טיפוסי של מקדם חיכוך גלגול הוא $c_r = 0.003$. לדוגמה עבור מסה כוללת של 85 ק"ג כח חיכוך הגלגול במישור יהיה:

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

כדאי לשים לב שכח חיכוך הגלגול אינו תלוי במהירות (בקירוב) 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 (הקטנת c_d). עושים זאת על ידי בניית מעטפת מיוחדת מסביב לאופניים בהם הרכב 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 בשעה².

¹ עבור רוח צד יש לבצע חיבור וקטורי ולמצוא את וקטור המהירות השקול ומשום שכח החיכוך תלוי בריבוע מהירות הרכב ביחס לאוויר, כח החיכוך עם האוויר גדל לעומת רכיבה ללא רוח צד.

² פרטים נוספים על ההיסטוריה והמכניקה של אופניים אלו ראה <http://home19.inet.tele.dk/badbirk>. שיא המהירות באופניים הושג ב-1995 ע"י פרד רומפלברג שרכב מאחורי רכב ועל אופניים מיוחדים והוא עומד על 268 קמ"ש!.

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 (ראה איור 4).



איור 4: תופעת Drafting בתעופת עגורים, רוכבי אופניים ובמכוניות מירוץ. המטרה היא לנוע בצמוד ומאחור לגוף הנע כדי להימצא באזור בו התנגדות האוויר היא קטנה וכך לחסוך באנרגיה. בדוגמה של האופניים, הרוכב מאחור יכול לחסוך עד 30% באנרגיה לעומת רכיבה באותה מהירות אבל לבד. מידע נוסף על התופעה בתעופה של ציפורים נמצא בקישור: <http://www.loc.gov/rr/scitech/mysteries/geese.html>

עבור אופניים הגולשים במדרון שזווית שיפועו היא α משוואת התנועה של האופניים היא (בהנחה שמהירות הרוח היא אפס):

$$ma = mg(\sin \alpha - \mu_r \cos \alpha) - K_d v^2 \quad .7$$

המהירות הגבולית v_{\max} תתקבל כאשר תאוצת האופניים תתאפס כלומר יתקיים השוויון הבא

$$mg(\sin \alpha - \mu_r \cos \alpha) = K_d v^2 \quad \text{ולכן נקבל עבור } v_r$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{mg(\sin \alpha - \mu_r \cos \alpha)}{K_d}} \quad .8$$

ממשוואה 8 ניתן להסיק שהמהירות הגבולית משתנה כמו השורש הריבועי של המסה בהנחה ששאר הפרמטרים נשארים ללא שינוי. בניסוי נבדוק האם אכן קשר תיאורטי זה נכון ונשוה

בין התוצאות של אופני כביש לעומת אופני הרים ע"י מדידת המהירות המכסימלית במורד עבר מסות שונות.

דגשים למהלך ביצוע הניסוי.

לפני תחילת הניסוי יש לשקול במדויק את מסת הרכב ומסת האופניים באמצעות מאזניים דיגיטליים. כמו כן כדאי לבדוק את מהירות הרוח ואת כיוונה באמצעות מד רוח ולרשום זאת ואת לחץ האוויר בגלגלים. חשוב מאד להקפיד מאד על אותה תנוחת רכיבה במשך כל ביצוע הניסוי וזאת כדי לשמור על שטח חתך A קבוע. כדאי לסמן גם נקודת התחלה ונקודת סיום כדי שכל המדידות יהיו אחידות. תחום שינוי המסה יהיה בין 0 ל-25 ק"ג בהפרשים של 5 ק"ג בסה"כ 6 מדידות לתלמיד. בסוף כל גלישה יש לעצור את שעון הפולאר, כך שלכל מדידה יהיה קובץ נתונים נפרד. את כל הנתונים יש להעביר לקובץ אקסל. עבור כל מדידה יש לקבוע מהי המהירות הגבולית של האופניים.

שאלות:

1. השתמש בנוסחא 8 וחשב את המהירות הגבולית של אופניים בעלי הנתונים הבאים:
 $\alpha = 5^\circ, \mu_r = 0.005, K_d = 0.3$
2. שרטט גרף איכותי של המהירות כפונקציה של הזמן עבור גלישה במורד, הסבר את השיקולים הפיזיקליים שעליהם הסתמכת.
3. כדי לבדוק שאכן המהירות הגבולית תלויה בשורש הריבועי של המסה, שרטט גרף של v_f כפונקציה של \sqrt{m} . האם הגרף שקבלת מאמת את התיאוריה? הסבר. מה מבטא שיפוע הגרף?
(במידה ולמדת את פונקצית הלוגריתם, ניתן לשרטט את $\log v_f$ כפונקציה של m ולבדוק האם שיפוע הישר שמתקבל קרוב ל-0.5.)
4. שרטט גרף של המהירות (במטר לשנייה) כפונקציה של הזמן עבור אחת המדידות שבצעת. האם האופניים הגיעו למהירות גבולית? הסבר כיצד קבעת שאכן הם הגיעו למהירות גבולית.
5. מתוך הגרף הערך את המרחק שעברו האופניים מהלך הרכיבה. הסבר את חישובך.
6. מה יהיו ההבדלים בתוצאות הניסוי בין אופני כביש לבין אופני הרים? חשוב באילו פרמטרים, שונים אופני הכביש מאופני ההרים.
7. כיצד משפיע הגובה הטופוגרפי של המקום בו מתבצע הניסוי על המהירות הגבולית v_{\max} ? הסבר.
8. על טיפת גשם הנופלת לארץ, פועל כח חיכוך עם האוויר הפרופורציוני לריבוע מהירות הטיפה ולשטח החתך שלה. נניח ששתי טיפות גשם בעלי צורה כדורית האחת גדולה והשנייה קטנה נופלות לארץ מאותו ענן. איזו טיפת גשם תגיע ראשונה לארץ? הסבר.
9. נסה לרשום את משוואת התנועה $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ עבור רוכב אופניים במעלה מדרון משופע. שים לב זה במקרה זה הרכב מדווש. בהנחה שהרכב מטפס במהירות קבועה מצא ביטוי למהירות זו. מה ניתן לומר על הקשר בין מסת הרכב+ אופניים לגבי טיפוס בעליות.