

מציאת מהירות האופניים בתנועה מעגלית ע"י מדידת זווית ההטיה של האופניים

חזי יצחק, גיל ברן
תיכון לחינוך סביבתי, מדרשת שדה בוקר
המכון לחקר המדבר, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
דוא"ל: yiyeh@bgu.ac.il

בפעילות זו נרגיש באופן מוחשי את חוקי הפיזיקה הפועלים על גוף הנמצא בתנועה מעגלית. רוכב האופניים הנע בתנועה מעגלית חייב להטות את גופו כלפי מרכז המעגל כדי להשלים את הסיבוב כפי שמודגם באיור 1:



איור 1: רוכב האופניים נע במעגל שרדיוסו כ-10 מטרים ובמהירות של כ-20 קמ"ש כדי להשלים את הסיבוב על הרוכב להטות את גופו בזווית של 17° .

כדי לנתח את התנועה יש לשרטט את הכוחות הפועלים על האופניים והרוכב כפי שמתואר באיור 2. ע"פ החוק השני של ניוטון נוכל לרשום את המשוואות הבאות. כמו כן נניח שהרוכב נע במהירות המכסימלית כך שהוא על סף החלקה. הנחה זו מאפשרת לנו לבטא את כח החיכוך הסטטי בין גלגלי האופניים לבין הכביש ע"י $f_s = \mu_s N$:

$$\sum F_x = \mu_s N = \frac{mv^2}{R} \quad .1$$
$$\sum F_y = N - mg = 0$$

אבל משום שהאופניים אינם גוף נקודתי הרי תנאי שוויו המשקל לגבי תנועה סיבובית חייב גם כן להתקיים. זוהי הסיבה מדוע רוכב האופניים מטה את גופו. ע"י הטיית הגוף נוצר מומנט

סיבוב שיכול לבטל את מומנט הסיבוב שנוצר ע"י כח החיכוך (כח החיכוך ע"פ משוואה 1 הוא למעשה הכוח הצנטריפוגלי). נרשום את משוואת המומנטים סביב מרכז המסה של האופניים והרוכב ונקבל:

$$Nl \sin \alpha = f_s l \cos \alpha \quad .2$$

כאשר l הוא המרחק בין מרכז המסה של המערכת אופניים+רוכב לבין נקודת המגע של הגלגל הקדמי עם הקרקע. בעזרת משוואות 1 נוכל לרשום:

$$mg \sin \alpha = \mu_s mg \cos \alpha \quad .3$$

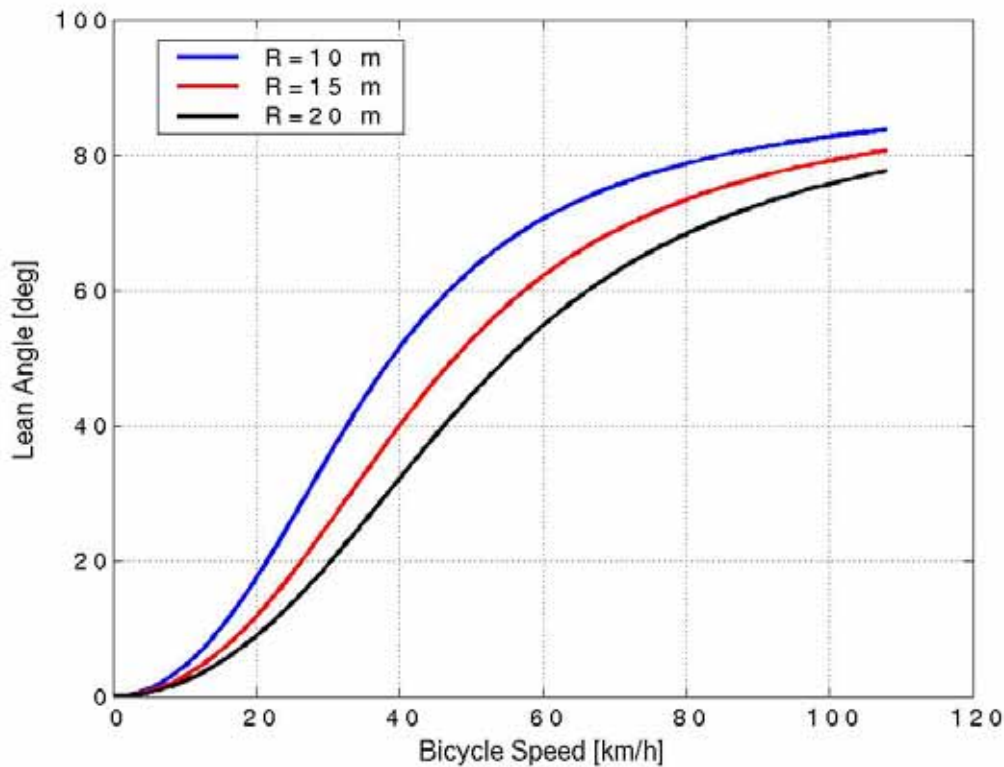
$$\rightarrow \mu_s = \tan \alpha$$

או כאשר נשתמש בקשר $\mu_s mg = \frac{mv^2}{R}$ נקבל:

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{Rg} \quad .4$$



משוואה 4 קובעת את הקשר בין זווית ההטיה לבין מהירות האופניים ורדיוס הסיבוב. טנגס זווית זו נמצא ביחס ישר למהירות האופניים וביחס הפוך לרדיוס הסיבוב. איור 3 מציג את הגרפים התיאורטיים של זווית ההטיה לבין מהירותה האופניים עבור מספר רדיוסי סיבוב.



איור 3: זווית ההטיה של האופניים בתנועה מעגלית כפונקציה של מהירות האופניים עבור שלושה רדיוסים 10, 15 ו-20 מטר.

משוואה (4) אינה כוללת את מקדם החיכוך הסטטי והיא נכונה למעשה לא רק במצב שהרוכב נמצא על סף החלקה אלא גם עבור מהירות כלשהיא וזאת משום שתמיד מתקיים

$$f_s = \frac{mv^2}{R} \text{ . ע"י ההנחה שהמערכת היא על סף החלקה נוכל למצוא את הביטוי עבור}$$

המהירות המכסימלית של הרוכב עבור מעגל ברדיוס R ו- מקדם חיכוך סטטי :

$$v_{\max} = \sqrt{\mu_s Rg} \quad .5$$

במהלך הניסוי יהיה עליך לרכוב מסביב לכיכר במספר מהירויות. תוך כדי הרכיבה אנו נצלם את אופניים והרוכב ונדפיס את התמונה. את זווית ההטיה נוכל למדוד מתך התמונה ואת מהירות האופניים נקרא משעון הפולאר. יש להקפיד שהצילום יעשה בדיוק מול האופניים ואת הזווית יש למדוד יחסית לצינור שמחבר את המזלג עם הכידון (head tube). תמונה מוצלחת כזו מופיעה באיור 3.



איור 4: רוכב בתנועה לאורך מעגל שרדיוסו 10.5 מטר ובמהירות של – 23 קמ"ש. הסימנים על הכביש נועדו להנחות את הרוכב לנוע בתנועה מעגלית וכן כדי למדוד את הרדיוס באופן מדויק יותר.

שאלות:

1. מדוד את זווית ההטיה עבור 3 מהירויות שונות וחשב את מהירות האופניים המתקבלת. השווה מהירות זו למהירות שקראת משעון הפולאר.
2. עבור איזה אופניים תתקבל זווית הטיה גדולה יותר, אופני כביש או אופני הרים? נמק.
3. כיצד תלויה זווית ההטיה של האופניים במסת הרוכב?
4. כיצד תלויה זווית ההטיה של האופניים בסוג המשטח (אספלט לעומת דרך עפר?)