

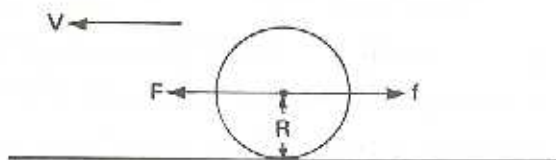
חיכוך הגלילה וחקירתו

מאת: אשר כץ
תיכון עירוני א', חיפה

חיכוך הגלילה

נעקוב אחרי תנועתו של גלגל הנע ללא החלקה על מישור אופקי. גלגל זה, אשר קיבל מהירות התחלתית מגורט מסויט, נע במהירות ההולכת ופוחתת עד לעצירה מלאה. אם נחזור על הניסוי ונקנה לאותו גלגל אותה מהירות התחלתית על משטח אופקי מכוסה בשטיח גומי, הוא ייעצר לאחר שעבר מרחק קטן יותר.

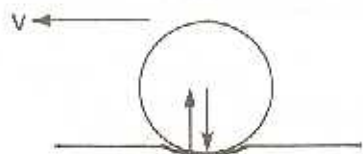
עובדת ההאטה של הגלגל בניסויים אלה בהכרח מביאה למסקנה, שעל הגלגל פועל מומנט מאט כיחס לציר הרגעי שהוא מקום המגע של הגלגל עם המשטח אשר עליו הוא נע. על מנת לגרום לתנועה קצובה של הגלגל על המשטח האופקי, יש להפעיל עליו מומנט (יחסית לציר הרגעי) שיאזן את המומנט המעכב, למשל, על-ידי הפעלת כוח אופקי F על מרכז הגלגל בכיוון התנועה (תרשים 1).



אפשר לומר, שכוח זה מאזן את כוח החיכוך הגלילה: $f = -F$. כלומר, אפשר לראות את כוח חיכוך הגלילה פועל במרכז הכדור. כוח חיכוך הגלילה עושה עבודה מכנית שלילית.

חיכוך הגלילה הוא תוצאה של שינויים אלסטיים של הגלגל עצמו ושל המשטח, אשר עליו הוא נע (אין גופים בעלי קשיחות אידיאלית). הכוח, שבו מעיק הגלגל על המשטח, גורם ליצירת שקע במשטח התנועה. נוצר שטח מגע בין הגלגל לבין המשטח במקום קטע-מגע או נקודה-מגע. דבר זה גורם ליצירת מומנט-כוח המהונגר לגלגולו של הגלגל.

היות ולא קיימים שינויים אלסטילים ארויאליים, גורם הדיבר להפסד של אנרגיה מכנית.



קולון מצא באופן נסיוני, שמומנט כוח חיכוך הגלילה פועל גם על גוף הנמצא במנוחה ואינו יכול לעלות על ערך מירבי מסוים, התלוי בתנאי המקרה.

הערך המירבי של המומנט M של כוח חיכוך הגלילה אינו תלוי ברדיוס הגלגל ונמצא ביחס ישר לכוח הניצב N המופעל מצד הגלגל על המשטח: $M \propto N$ והוא שפועל על הגלגל בזמן תנועתו (ללא החלקה).

מקדם חיכוך הגלילה μ מוגדר ביחס בין מומנט כוח חיכוך הגלילה M לבין הכוח הניצב N , הפועל על המשטח מצד הגלגל:

$$\mu = \frac{M}{N} \quad \text{או} \quad \mu = \frac{F \cdot R}{N}$$

כאשר R רדיוס הגלגל.

מקדם חיכוך-הגלילה במדד ביחידות אורך.

כטבלה הבאה מספר ערכים של מקדם חיכוך הגלילה:

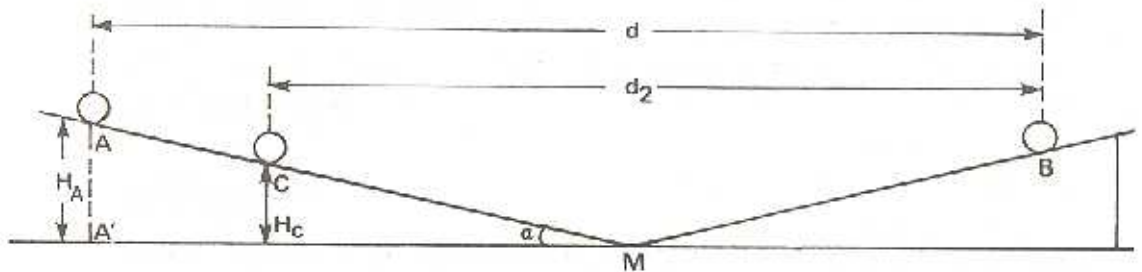
מקדם חיכוך הגלילה בס"מ	ה ח ו מ ר י ם
0.05-0.06	עץ על גבי עץ
0,005	פלדה רכה על גבי פלדה רכה
0.05-0.04	פלדה על גבי עץ
0.001	פלדה קשה על גבי פלדה קשה

לסיכום ייאמר, שעל גלגל מכוניה פועלים בשעת תנועת הגלילה (ללא החלקה) הכוחות הבאים:

- (א) חיכוך הגלילה, המנוגד לכיוון התנועה.
- (ב) כוח חיכוך סטטי, שכיוונו ככיוון התנועה, המאפשר את תנועת הגלגל ללא החלקה. לכוח החיכוך הסטטי גם תפקיד נוסף. כוח זה מונע החלקה הצידה בפניות או כתוצאה מפעולת רוח-צד.
- (ג) כוח חיכוך-ההחלקה. פועל על תוף הבלימה או על דיסקית הבלימה בשעת העצירה.

חקירת חיכוך הגלילה

את עבודת המעבדה על חיכוך הגלילה אפשר לשלב בנושא העבודה והאנרגיה, אפשר לבצע את העבודה גם את החלמידים לא למדו על מומנטים ועל תנועה סיבובית של גוף קשיח. מטרת העבודה יכולה להיות חקירת היחס בין כוח חיכוך הגלילה F לבין הכוח הניצב N ומציאת התלות בינו לבין רדיוס הכדור, משתמשים במסילה, אשר קצותיה מוגבהים לעומת אמצעה, כמתואר בתרשים 2.



משחררים כדור בנקודה A. הכדור ינוע מ-A, יעבור בנקודת האמצע M ויגיע לנקודה B. מהנקודה B ינוע הכדור בכיוון ההפוך וייעצר בנקודה C. התנועה יכולה להימשך עד אשר הכדור ייעצר כליל. נקודה B נמוכה מנקודה A, ונקודה C נמוכה מנקודה B בגלל הפסוקי האנרגיה שנגרמו על-ידי חיכוך-הגלילה. העבודה של כוח החיכוך שווה לשינוי באנרגיה המכנית של הכדור. היות והאנרגיה הסופית (ברגע עצירת הכדור) והאנרגיה ההתחלתית (ברגע שיחרור הכדור) הן אנרגיות פוטנציאליות של כובד, הפרש האנרגיות הוא $-mg\Delta H$.

נחשב את העבודה שעשה כוח חיכוך-הגלילה. נסמן ב-P את היחס $\frac{f}{N} = mg \cos \alpha$. מכאן: $f = PN = Pmg \cos \alpha$. עבודת כוח חיכוך הגלילה במסלול AM שווה $-P \cdot mg \cos \alpha (\overline{AM})$ או $-Pmg(\overline{A'M})$ - Pmg הוא היטל הקטע \overline{AM} על המישור האופקי). העבודה W_f שיעשה חיכוך הגלילה מרגע השיחרור בנקודה A עד הגיע הכדור לנקודה C היא: $W_f = -Pmg(d_1 + d_2)$. עבודה זאת שווה לשינוי באנרגיה המכנית. מכאן:

$$-Pmg(d_1 + d_2) = -mg(H_A - H_C)$$

$$P = \frac{H_A - H_C}{d_1 + d_2}$$

הביצוע פשוט מאוד. מסמנים את מקום השיחרור (נקודה A), מסמנים את מקום העצירה הראשון (נקודה B) ומסמנים את מקום העצירה השני (נקודה C). מודדים את גובה הנקודה A ואת גובה הנקודה C מהמישור האופקי. חשוב לציין, שהמישור האופקי, אשר ממנו מודדים את הגבהים יהיה ללא שיפוע ויש לאזנו עם פלס מיט, היות והפרש הגבהים קטן יחסית, יגרום שיפוע של מישור היחוס לשגיאה נוספת במדידה. זו גם הסיבה שבגללה מומלץ למדוד את הפרש הגבהים בין הנקודות A ו C, ולא בין הנקודות A ו B. חזרה על הניסוי עם כדורים בעלי רדיוסים שונים מאפשרת למצוא את התלות בין $\frac{f}{N}$ לבין הרדיוס ולהוכיח, כי $\frac{f}{N} \cdot R$ הוא גודל קבוע. גודל זה הוא מקדם חיכוך-גלילה.

תוצאות הניסוי

בניסוי המבוצע בכיתה המסילה עשויה מפרופיל אלומיניום בצורת בעל רוחב פנימי של 6 מ"מ. המסילה מותקנת על בסיס יציב. החלמידים מבצעים את הניסוי עם כדורי פלדה בעלי רדיוסים שונים, וכן עם כדורי זכוכית. כאחד הניסויים נתקבלו התוצאות הבאות:

R (cm) רדיוס הכדור הפלדה	ΔH (cm) הפרש הגבהים	d (cm) המרחק הלך ושוב ($d_1 + d_2$)	$\frac{f}{N}$	$\mu = \frac{f}{N} \cdot r$ (cm)
1	1.4	200	$7 \cdot 10^{-3}$	7×10^{-3}
1.2	1.2	205	$5.85 \cdot 10^{-3}$	7.02×10^{-3}
1.6	0.9	212	$4.24 \cdot 10^{-3}$	6.79×10^{-3}
1.9	0.8	215	$3.72 \cdot 10^{-3}$	7.06×10^{-3}
2.4	0.6	227	$2.72 \cdot 10^{-3}$	6.54×10^{-3}

עבור כדור הזכוכית נתקבל מקדם חיכוך גלילה בשיעור $\mu = 9.6 \times 10^{-3}$.

ספרות לקריאה נוספת:

- 1) Mechanik, Akustik und Wärmelehre. p. 113 R.W. Pohl
Springer 1959.
- 2) Friction - F.P. Bowden and D. Tabor, Doubleday 1973.
- 3) הערך חיכוך, האנציקלופדיה העברית, מסדה.