

# גוף קשיח

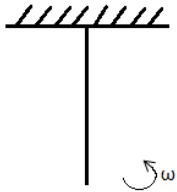
## פרק 6 - גוף קשיח

### תוכן העניינים

1. הגדרות, ציר סיבוב ותנע קווי ..... (ללא ספר)
2. אנרגיה סיבובית של גוף קשיח ..... 1
3. ניתוח לפי כוחות ומומנטים וגלגול ללא החלקה ..... 2
4. גלגול עם החלקה ..... 4
5. תרגילים מסכמים ..... 5

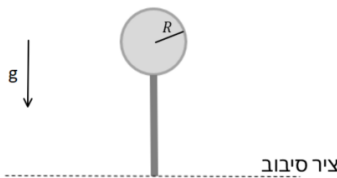
## אנרגיה סיבובית של גוף קשיח:

### שאלות:



#### (1) מוט מסתובב

מוט באורך  $L$  ומסה  $M$  מחובר לתקרה באמצעות ציר ויכול להסתובב. למוט מהירות זוויתית התחלתית  $\omega$ . מהי הזווית המקסימאלית אליה יגיע המוט?



#### (2) דיסקה מחוברת למוט נופלת ממצב אנכי

גוף קשיח מורכב ממוט בעל אורך  $L$  ומסה  $M$  המחובר בקצה אחד לדיסקה מלאה בעלת מסה  $m$  המפולגת באופן אחיד ורדיוס  $R$ . בקצה השני, המוט מחובר לציר אופקי.

המוט חופשי להסתובב סביב הציר (כלומר הגוף יכול לעשות סיבוב אנכי סביב הציר). הגוף מתחיל מהמצב המתואר באיור (מצב אנכי לא יציב) ומקבל דחיפה קטנה לתוך הדף. מה תהיה המהירות הזוויתית של הגוף כאשר יגיע לנקודה הנמוכה ביותר?

### תשובות סופיות:

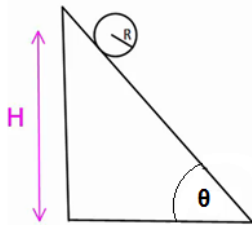
$$\cos \theta = 1 - \frac{L\omega_0^2}{3g} \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2MgL + 2mg(L+R)}{\frac{ML}{3} + \frac{1}{4}mR^2 + m(L+R)^2}} \quad (2)$$

## ניתוח לפי כוחות ומומנטים וגלגול ללא החלקה:

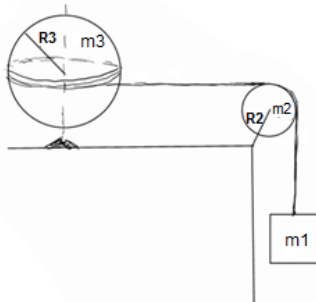
### שאלות:

#### (1) דוגמה - כדור על מדרון משופע



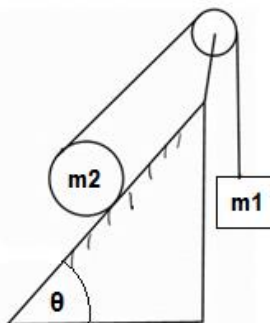
- כדור בעל רדיוס  $R$  מונח בגובה  $H$  על מדרון משופע בעל זווית  $\alpha$ . הכדור מתחיל להתגלגל ללא החלקה.
- א. מצאו את מהירות הכדור בתחתית המדרון.
- ב. מצאו את תאוצת הכדור.

#### (2) גלובוס



- גלובוס (כדור) מונח ומקובע לשולחן ויכול להסתובב סביב ציר המאונך לשולחן.
- מלפפים חוט סביב מרכז הגלובוס (סביב קו המשווה) והחוט ממשיך מהגלובוס דרך גלגלת לא אידיאלית למסה תלויה  $m_1$ .
- נתונים גם:  $m_2$  ו- $R_2$  מסה ורדיוס הגלגלת,  $m_3$  ו- $R_3$  מסה ורדיוס הגלובוס.
- המערכת מתחילה ממנוחה.
- מצא את תאוצת כל הגופים, קווית וזוויתית ואת המתרחות בחוט.

#### (3) יויו במישור מחובר למסה

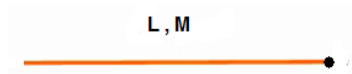


- יויו (כדור שמלופף סביבו חוט) בעל מסה  $m_2$  ורדיוס  $R$  מונח על מישור משופע בעל זווית  $\theta$ .
- החוט של היויו מחובר דרך גלגלת אידיאלית למסה  $m_1$ .
- נתון כי היויו מתגלגל ללא החלקה על המישור וכי קיים חיכוך בין היויו למישור.
- א. מצא לאן תנוע המערכת וכיוון החיכוך הסטטי.
- ב. מצא את תאוצות הגופים וגודל כוח החיכוך.

**(4) מוט אופקי נופל**

מוט בעל מסה  $M$  (צפיפות אחידה) ואורך  $L$  תלוי בקצהו לקיר וחופשי להסתובב סביב נקודת התלייה.

משחררים את המוט ממצב אופקי.



א. מצא את התאוצה הזוויתית ואת תאוצת מרכז

המסה של המוט ברגע השחרור.

כעת המוט נופל עד להגיעו למצב מאונך לקרקע.

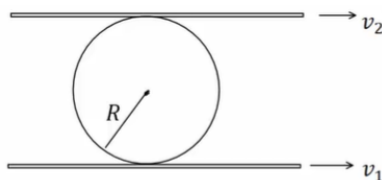
ב. מצא את הכוח שמפעיל הציר שמחבר את המוט

לקיר על המוט, ברגע השחרור.

ג. מצא את המהירות הזוויתית של המוט ברגע זה

(כשהוא מאונך לקרקע).

ד. חזור על סעיפים א' ו-ב' עבור רגע זה.

**(5) משטח מלמעלה ומשטח מלמטה**

כדור בעל רדיוס  $R$  לחוץ בין שני משטחים נעים.

המשטח מתחת לכדור נע במהירות  $v_1$  והמשטח

מעליו נע במהירות  $v_2$ .

א. מהי מהירות מרכז המסה של הכדור אם

ידוע שהוא מתגלגל ללא החלקה ביחס לשני המשטחים?

ב. חזור על סעיף א' אם המשטח העליון נע בכיוון ההפוך.

**תשובות סופיות:**

$$(1) \quad \text{א.} \quad mgH = \frac{1}{2}mv_{c.m.}^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}mR^2\right)\left(\frac{v_{c.m.}}{R}\right)^2 \quad \text{ב.} \quad a = \frac{5}{7}g \sin \theta$$

(2) ראה סרטון.

(3) ראה סרטון.

$$(4) \quad \text{א.} \quad a_{c.m.} = \frac{3}{4}g = a_y, \quad a_x = a_r = 0, \quad \alpha = \frac{3}{2}\frac{g}{L} \quad \text{ב.} \quad \sum F_y = ma_{y_{c.m.}}, \quad \sum F_x = ma_{x_{c.m.}}$$

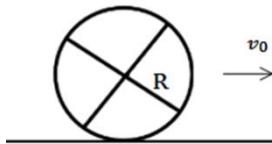
$$\text{ג.} \quad mg \frac{L}{2} = \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$\text{ד.} \quad \alpha = 0, \quad a_\theta = 0 = a_{x_{c.m.}}, \quad a_y = a_r = -\omega^2 \frac{L}{2}, \quad \sum F_y = ma_{y_{c.m.}}, \quad \sum F_x = ma_{x_{c.m.}}$$

$$(5) \quad \text{א.} \quad v_{c.m.} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \text{ב.} \quad v_{c.m.} = \frac{v_1 - v_2}{2}$$

## גלגול עם החלקה:

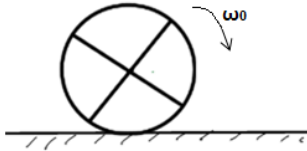
### שאלות:



#### (1) כדור מחליק ללא סיבוב

כדור הומוגני בעל מסה  $M$  מתחיל תנועתו עם מהירות  $V_0$  ללא סיבוב (מהירות זוויתית).

מצא את מהירותו הסופית אם נתון מקדם החיכוך הקינטי.



#### (2) כדור מסתובב מונח על רצפה

כדור הומוגני בעל מסה  $M$  מוחזק באוויר ומסתובב סביב מרכז המסה שלו במהירות זוויתית  $\omega_0$ .

הכדור מונח על הרצפה בעודו מסתובב.

מצא את מהירותו הסופית אם נתון מקדם החיכוך הקינטי  $\mu_k$ .

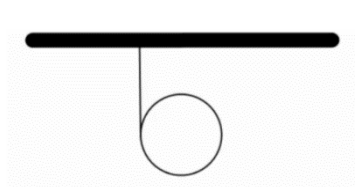
### תשובות סופיות:

$$V_{\text{final}} = \frac{5}{7} V_0 \quad (1)$$

$$V_{\text{final}} = \frac{2}{7} \omega_0 R \quad (2)$$

## תרגילים מסכמים:

### שאלות:

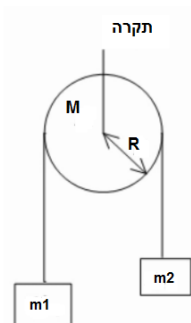


#### (1) חישוק מתגלגל מחבל

חבל מלופף סביב חישוק בעל רדיוס  $R$  ומסה  $m$ .  
(החבל מחובר לתקרה).

א. מהי תאוצת מרכז המסה של החישוק?

ב. לאחר כמה זמן ירד החישוק גובה של  $h$  אם התחיל תנועתו ממנוחה?

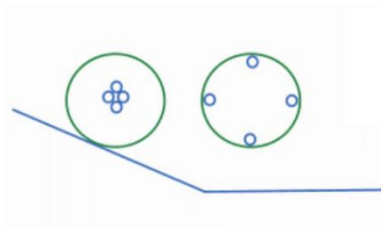


#### (2) מסות וגלגלת

שתי מסות שונות  $m_1, m_2$  תלויות משני הצדדים של גלגלת לא אידיאלית המקובעת במרכזה.  
המסות משוחררות ממנוחה.

מצא את תאוצת המסות אם נתון:

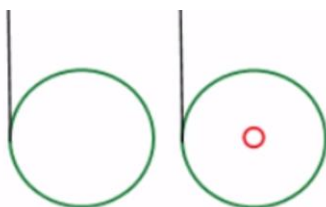
$M$  מסת הגלגלת,  $R$  רדיוס הגלגלת וכי החוט אינו מחליק על הגלגלת.



#### (3) שתי דיסקות שונות במדרון

בגן המדע שבמכון ויצמן יש שתי דסקות קלות אליהן מודבקות 4 מסות כבדות כמתואר בשרטוט. את הדסקות מניחים על שני מדרונים ובודקים מי תנוע בהגיעה למישור מהר יותר.

הסבר כיצד ניתן לחשב מהירות זו על פי נתוני המערכת.



#### (4) שני חישוקים מתגלגלים מחבל

חישוק בעל מסה  $m$  ורדיוס  $R$  תלוי מחבל המלופף סביבו.

א. מה תהיה מהירותו לאחר שנפל מגובה  $h$ ?

מה תהיה תאוצתו? כמה זמן תארך הנפילה?

חישוק אחר חסר מסה בעל רדיוס  $R$  מכיל מסה נקודתית במרכזו בעלת מסה  $m$ .

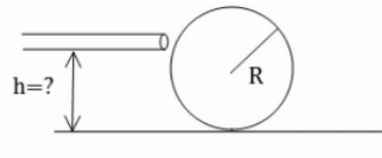
ב. מה תהיה מהירותו לאחר שנפל מגובה  $h$ ?

ג. מה תהיה מהירותו אם החבל יהיה ללא חיכוך?

**(5) מכה בכדור ללא החלקה**

כדור סנוקר ברדיוס  $R$  נמצא במנוח על שולחן ללא חיכוך (חיכוך נמוך מאוד).

מצא באיזה גובה מעל תחתית הכדור יש לתת מכה אופקית עם המקל כך שהכדור יתגלגל ללא החלקה.



$$I_{c.m} = \frac{2}{5} mR^2$$

הדרכה: ערוך תרשים כוחות ונתח את הבעיה בשלב המכה עצמה.

**(6) חוט מושך דיסקה ללא החלקה - תרגיל פשוט**

חוט מלופף מסביב לגליל המונח על מישור שאינו חלק. רדיוס הגליל הוא  $R$  ומסתו  $M$ .

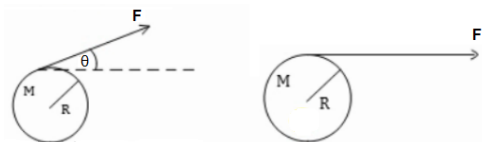
כוח  $F$  נתון מושך את הגליל.

מצא את תאוצת הגליל במקרים הבאים אם ידוע שהגליל מתגלגל ללא החלקה:

א. הכוח פועל בכיוון אופקי.

ב. הכוח פועל בזווית  $\theta$  ביחס לאופק וידוע שהגליל אינו מתרומם.

ג. מה כיוון החיכוך בכל מקרה?


**(7) יויו מתגלגל (חוט מלמעלה)**

יויו מורכב מגליל ברדיוס  $r$  ומסה  $m$ .

משתי צידי הגליל מחוברות דסקות ברדיוס  $R > r$  ומסה  $M$  כל אחת.

סביב הגליל ובמרכזו מלופף חוט.

היויו מונח על משטח לא חלק ומושכים את החוט בכוח  $F$  קבוע

בכיוון ציר ה- $x$ .

נתון כי היויו מתחיל את תנועתו ממנוחה וכי הוא

מתגלגל ללא החלקה (היויו זז בציר ה- $x$ ).

כמו כן כל אות בגוף השאלה נתונה.

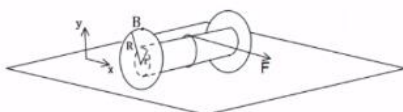
א. מהו מומנט ההתמד של היויו?

ב. מהי תאוצת מרכז המסה של היויו?

ג. מהו מיקום היויו כפונקציה של הזמן?

ד. הנקודה B נמצאת על קצה הגלגל ובדיוק מעל מרכזו ב- $t = 0$ .

מצא את מיקום הנקודה כתלות בזמן.

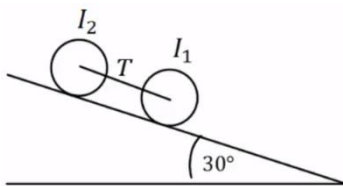


**(8) עיפרון נופל\***

עיפרון באורך  $L$  ניצב אנכית על משטח. ברגע מסוים הוא מתחיל ליפול ימינה. כאשר הזווית בינו לבין האנך למשטח מגיעה ל- $\theta_1$  העיפרון מתחיל להחליק.

א. עבור זוויות  $\theta$  שבהן עדיין אין החלקה  $\theta < \theta_1$ .

- i. מצאו את המהירות הזוויתית של העיפרון  $\omega$ .
  - ii. מצאו את התאוצה הזוויתית של העיפרון  $\alpha$ .
  - iii. מצאו את התאוצה הקווית של מרכז המסה של העיפרון.
  - iv. מצאו את גודלו וכיוונו של כוח החיכוך.
  - v. מצאו את הכוח הנורמלי.
- ב. מצאו את מקדם החיכוך הסטטי  $\mu_s$ .

**(9) שני גלילים מחוברים בחוט על מדרון משופע\***

שני גלילים בעלי מסה  $m = 3\text{kg}$  ורדיוס  $R = 20\text{cm}$  כל אחד, מחוברים בחוט אידיאלי ומתגלגלים יחד ללא החלקה במורד מדרון. זווית המדרון היא  $30^\circ$ . התפלגות המסה של הגלילים אינה אחידה ומומנטי ההתמד שלהם סביב מרכז המסה נתונים:  $I_1 = 50\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ ,  $I_2 = 90\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ . מהי המתיחות בחוט המחבר בין הגלילים?

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad a = \frac{g}{2} \quad \text{א.} \quad t = \sqrt{\frac{4h}{g}} \quad \text{ב.}$$

$$(2) \quad a = \frac{(m_1 - m_2)g}{\frac{1}{2}M + m_1 + m_2}$$

$$(3) \quad \text{ראה סרטון.}$$

$$(4) \quad mgh = mv^2, \quad a = \frac{g}{2}, \quad t = \frac{1}{2} \left( \frac{g}{2} \right) t^2 \quad \text{א.} \quad mgh = \frac{1}{2} mv'^2 \quad \text{ב.} \quad \text{ג. נפילה חופשית.}$$

$$(5) \quad h = \frac{2}{5} R$$

$$(6) \quad a = \frac{4}{3} \frac{F}{m} \quad \text{א.} \quad a = \frac{4}{3} \frac{F}{m} \quad \text{ב.} \quad F \frac{1}{3} (1 + \cos \varphi), \quad \frac{1}{3} F \quad \text{ג.}$$

$$(7) \quad I = 2 \frac{1}{2} MR^2 + \frac{1}{2} mr^2 \quad \text{א.} \quad Fr - I \frac{a}{R} = (m + 2M)(a) \quad \text{ב.}$$

$$B_x = \frac{1}{2} at^2 + R \sin \left( \frac{1}{2} at^2 \right), \quad B_y = R \cos \left( \frac{1}{2} at^2 \right) \quad \text{ד.} \quad x_{(t)} = \frac{1}{2} at^2 \quad \text{ג.}$$

$$(8) \quad \omega = \sqrt{3 \frac{g}{L} (1 - \cos \theta)} \quad \text{א.} \quad \alpha = \frac{3g}{2L} \sin \theta \quad \text{ii.} \quad \vec{a} = -\omega^2 r \hat{r} + \alpha r \hat{\theta} \quad \text{iii.}$$

$$\sum F_y = m(-a_r \cos \theta - a_\theta \sin \theta) \quad \text{v.} \quad \sum F_x = m(-a_r \sin \theta + a_\theta \cos \theta) \quad \text{iv.}$$

$$f_{s_{\max}}(\theta_1) = \mu_s N(\theta_1) \quad \text{ב.}$$

$$(9) \quad T \approx 0.22 \text{ N}$$