

# פיזיקה 1 לפיזיקאים

פרק 20 - גוף קשיח

תוכן העניינים

1. הגדרות, ציר סיבוב ותנע קווי ..... 1
2. תנע זוויתי של גוף קשיח ..... 2
3. אנרגיה סיבובית של גוף קשיח ..... 5
4. ניתוח לפי כוחות ומומנטים וגלגול ללא החלקה ..... 8
5. גלגול עם החלקה ..... 11
6. תרגילים מסכמים ..... 12
7. תרגילים מסכמים כולל פרסציה ..... 19
8. תרגילים עם תנועה הרמונית (רק למי שיודע תנועה הרמונית כבר) ..... 20

## הגדרות, ציר סיבוב ותנע קווי:

**רקע:**

הגדרה: המרחק בין כל שתי נקודות על הגוף תמיד קבוע.

אם גוף קשיח מסתובב סביב ציר סיבוב כל נקודות על הגוף מבצעות תנועה מעגלית באותה מהירות הזוויתית (אך לא באותה מהירות קווית)

תנע קווי של גוף קשיח:

$$\vec{p} = M\vec{v}_{c.m.}$$

## תנע זוויתי של גוף קשיח:

רקע:

תנ"ז של גוף הנע בקו ישר (ללא סיבוב פנימי, כלומר לכל החלקים בגוף אותה מהירות קווית):

$$\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.}$$

תנ"ז של גוף קשיח המסתובב סביב ציר קבוע:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}$$

$I$  - מומנט ההתמד ביחס לציר

תנ"ז של תנועה משולבת (ציר שזז, כלומר הגוף גם זז וגם מסתובב):

$$\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.} + \vec{L}_{c.m.}$$

כאשר  $\vec{L}_{c.m.}$  הוא התנ"ז ביחס לציר העובר במרכז המסה ושווה ל-

$$\vec{L}_{c.m.} = I_{c.m.}\vec{\omega}$$

שאלות:



### 1) כדור מתנגש בדיסקה

דיסקה בעלת מסה  $M$  ורדיוס  $R$  מחוברת באמצעות ציר העובר במרכזה לשולחן אופקי חסר חיכוך.

כדור פלסטלינה בעל מסה  $m$  נע במהירות  $V_0$  לעבר הדיסקה.

הכדור פוגע בדיסקה משמאלה, ובמרחק  $d$  ממרכזה. הכדור נדבק לדיסקה ושניהם מתחילים להסתובב יחדיו (סביב הציר במרכז הדיסקה). הדיסקה נמצאת במנוחה לפני הפגיעה וכוח הכובד אינו משפיע על הגופים (המערכת אופקית). מצא את המהירות הזוויתית בה יסתובבו הגופים לאחר הפגיעה.

**(2) אדם קופץ מדיסקה**

נתונה דיסקה בעלת רדיוס  $R$  המסתובבת סביב מרכז במהירות זוויתית קבועה  $\omega$ . בקצה הדיסקה עומד איש נקודתי ומסתובב ביחד עם הדיסקה. ברגע מסוים האיש קופץ מהדיסקה ונתון כי מהירותו מיד לאחר הקפיצה היא  $V_0$  בכיוון הרדיאלי, ביחס לקרקע. מצא את המהירות הזוויתית של הדיסקה לאחר הקפיצה אם נתונים מסת האיש  $m$  ומסת הדיסקה  $M$ .

**(3) דוגמה - תנע זוויתי של תנועה משולבת**

נתון מוט בעל אורך  $L$  ומסה  $M$ . המרחק בין הקצה התחתון של המוט עד ראשית הצירים הוא  $d$ . המוט מסתובב בכיוון השעון מסביב לראשית. חשב את התנע הזוויתי.

**(4) שלושה כדורים**

שלושה כדורים זהים בעלי מסה  $m$  נמצאים בפינותיו של משולש שווה צלעות. הכדורים מחוברים באמצעות שלושה מוטות חסרי מסה ואורך  $L$  (צלעות המשולש).  
 א. חשבו את מיקום מרכז המסה של המערכת.  
 כעת, נתון כי הגוף מסתובב במהירות זוויתית  $\omega$  נתונה, סביב מרכז המסה שלו. ברגע מסוים, כאשר הגוף נמצא במצב המתואר בצור, הכדור התחתון ניתק מהגוף.  
 ב. מצאו את מהירות הכדור שניתק לאחר הניתוק.  
 ג. מצאו את מהירות מרכז המסה של החלק הנותר.  
 ד. מצאו את המהירות הזוויתית של החלק הנותר סביב מרכז המסה שלו.

**(5) מסמר נועץ דיסקה מסתובבת**

דיסקה ברדיוס  $R$  ומסה  $m$  מונחת על שולחן אופקי במנוחה. מסובבים את הדיסקה במהירות זוויתית  $\omega$  סביב מרכז המסה של (סביב ציר  $z$ ). מסמר נופל מהשמים ופוגע בקצה של הדיסקה ונועץ אותה לשולחן.  
 א. מהי המהירות הזוויתית של הדיסקה סביב המסמר לאחר הנעיצה?  
 ב. ענו שוב על השאלה רק הפעם הניחו שבנוסף לסיבוב, מרכז המסה של הדיסקה נע במהירות  $v$  לפי הנעיצה.

## תשובות סופיות:

$$\omega = \frac{mv_0 d}{I} \quad (1)$$

$$\omega' = \frac{\left(\frac{1}{2}M + m\right)\omega_0}{\frac{1}{2}M} \quad (2)$$

$$\left(\frac{L}{2} + d\right)^2 M\omega + I_{c.m.}\omega_{c.m.} = L \quad (3)$$

$$v_{1,2,c.m.} = \frac{1}{2}\omega R \hat{x} \quad \text{ג.} \quad v_3 = -\omega R \hat{x} \quad \text{ב.} \quad y_{c.m.} = \frac{1}{2\sqrt{3}}, \quad x_{c.m.} = \frac{L}{2} \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$I_{1,2,3}\omega = m|v_3|R + 2mv_{1,2}y_{c.m.} + 2m\left(\frac{1}{2}L\right)^2 \quad \text{ד.}$$

$$\frac{1}{3}\left(\omega + 2\frac{v}{R}\right) \quad \text{ב.} \quad \frac{1}{3}\omega \quad \text{א.} \quad (5)$$

## אנרגיה סיבובית של גוף קשיח:

### רקע:

אנרגיה קינטית סיבובית סביב ציר קבוע כלשהו:

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$$

אנרגיה קינטית עבור ציר לא קבוע (תנועה משולבת) העובר במרכז המסה:

$$E_k = \frac{1}{2} m v_{c.m.}^2 + \frac{1}{2} I_{c.m.} \omega^2$$

אנרגיה קינטית עבור ציר לא קבוע (תנועה משולבת) כלשהו\*:

$$E_k = \frac{1}{2} m v_o^2 + \frac{1}{2} I_o \omega^2 + m \vec{r}_{c.m.,o} \cdot (\vec{v}_o \times \vec{\omega})$$

$I_o$  - מומנט ההתמד ביחס לציר

$\vec{v}_o$  - היא מהירות הציר

$\vec{r}_{c.m.,o}$  - מיקום מרכז המסה ביחס לציר

\* השימוש בנוסחה מאוד נדיר

### 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?

**(3) כדור פוגע במוט שתלוי מהתקרה (כולל תנז)**

כדור בעל מסה  $m$  פוגע במוט שתלוי מהתקרה במרחק  $x$  מציר הסיבוב של המוט. המוט בעל אורך  $L$  ובעל מסה  $M$ . מהירותו ההתחלתית של הכדור היא  $\mu_0$  והוא מתנגש פלסטית עם המוט.

א. מהי המהירות הזוויתית של המערכת מיד לאחר ההתנגשות?

ב. מהי הזווית המקסימלית אליה יגיע המוט?

ג. מצא  $x$  כך שהכוח שמפעילה התקרה על המוט יתאפס.

**(4) מסה מתנגשת בשתי מסות מחוברות במוט (כולל תנז)**

שני גופים נקודתיים בעלי מסה  $M$  כל אחד מחוברים בשני קצותיו של מוט דק חסר מסה באורך  $l$ . המערכת נמצאת במנוחה על גבי משטח אופקי חלק לאורך ציר  $y$ .

כדור נוסף שמסתו  $m$  פוגע במוט במאונך למוט ובמרחק  $d$  ממרכז המוט. מהירות הכדור הנוסף היא  $v$  וההתנגשות עם המוט היא אלסטית.

מה צריכה להיות מהירותו של הכדור הנוסף, כך שישאר במנוחה לאחר ההתנגשות.

## תשובות סופיות:

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

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

$$\omega = \frac{mv_0x}{mx^2 + \frac{ML^2}{3}} \quad \text{א.} \quad (3)$$

$$x_{c.m} = \frac{M\frac{L}{2} + mx}{M+m}, \quad I = \frac{ML^2}{3} + mx^2 \quad \text{ב.} \quad \cos \theta = 1 - \frac{I\omega^2}{(M+m)gx_{c.m}}$$

ו- $\omega$  מצאנו בסעיף א'.

$$\mu_0 = M\frac{L}{r} + mx \quad \text{ג.} \quad (4)$$

$$m = \frac{2M}{1 + \frac{4d^2}{l^2}} \quad (5)$$

## ניתוח לפי כוחות ומומנטים וגלגול ללא החלקה:

רקע:

טבלת השוואה בין תנועה סיבובית לתנועה בקו ישר

תנועה בקו ישר	תנועה סיבובית
$x$	$\theta$
$v = \dot{x}$	$\omega = \dot{\theta}$
$a = \dot{v} = \ddot{x}$	$\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\theta}$
$m$	$I$
$p$	$L$
$F$	$\tau$

כל הנוסחאות זהות בהחלפת אותיות

גלגול ללא החלקה:

מהירות הנקודה שנוגעת במשטח שווה לאפס

$$v_{c.m.} = \omega R$$

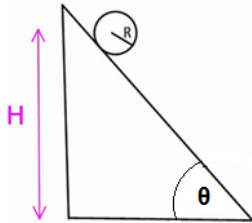
$$a_{c.m.} = \alpha R$$

בגלגול ללא החלקה החיכוך הוא סטטי ולכן אין איבוד אנרגיה.

איך ניצלים  $W_{nc}$ ?



## שאלות:

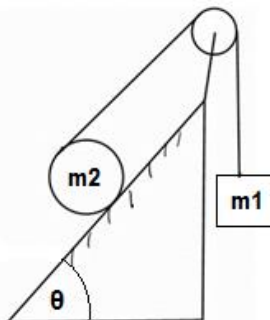
**(1) דוגמה - כדור על מדרון משופע**

- 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 המתיחות 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:**

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

(2) ראה סרטון.

(3) ראה סרטון.

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

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

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

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

## 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 דיסקות קלות אליהן מודבקות 4 מסות כבדות כמתואר בשרטוט. את הדיסקות 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) מצמד**

בכלי עבודה רבים קיים מנגנון הקרוי מצמד (קלאץ'). תפקיד המצמד הוא להעביר את הכוח המניע אל החלק המונע בצורה הדרגתית (למשל להעביר את כוח המנוע ברכב אל הגלגלים מבלי לגרום לתנועה פתאומית בגלגלים). המצמד מופעל ע"י הצמדת דסקה מסתובבת אל דסקה ניידת והעברת אנרגיה מזו לזו בעזרת כוח החיכוך. לפניך מצמד הבנוי משתי דסקות בעלות מומנט התמד שונה. הדסקה התחתונה מסתובבת במהירות התחלתית נתונה. בשלב מסוים הדסקה העליונה מונחת על הדסקה התחתונה ובעזרת כוח המשיכה וכוח החיכוך מתחילה לנוע בעצמה עד ששתי הדיסקות ינועו ביחד.

א. מצא את המהירות הסופית של הדיסקות.

ב. כמה אנרגיה אבדה בתהליך זה?

**(6) 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.



מומנט ההתמד של הכדור הוא:  $I_{c.m} = \frac{2}{5} mR^2$

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

**(7) 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.

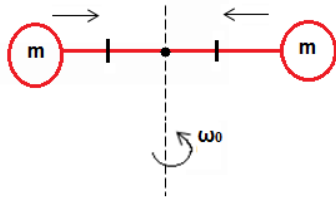
מצא את תאוצת הגליל במקרים הבאים אם ידוע שהגליל מתגלגל ללא החלקה:

א. הכוח פועל בכיוון אופקי.

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

ג. מה כיוון החיכוך בכל מקרה?

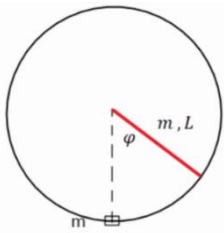


**(8) מחליקה על קרח סוגרת ידיים**

- מחליקה על הקרח מסתובבת במהירות  $w_0$ . המחליקה בעלת מסה זניחה אך היא מחזיקה מסה  $m$  בכל יד. הידיים פרוסות לצדדים ואורך כל יד  $l$ . לפתע המחליקה סוגרת את ידיה לחצי מאורכן המקורי. א. מה תהיה מהירות הסיבוב החדשה? ב. כמה אנרגיה הושקעה בתהליך?

**(9) גלגול עם החלקה**

- אל עבר דסקה בעלת מסה  $M$  ורדיוס  $R$  נורה קליע בעל מסה  $m$  במהירות  $v$ . הדסקה מונחת על מישור בעל מקדם חיכוך נתון. מצא כמה זמן תימשך ההחלקה.

**(10) מוט משוחרר בזווית פוגע במסה**

- מוט המחובר לציר משוחרר ממנוחה מזווית נתונה. כשהמוט מגיע לנקודה הנמוכה ביותר הוא פוגע במסה ודוחף אותה במהירות לא ידועה לעבר מסילה מעגלית. נתון כי הקצה התחתון של המוט נע מיד לאחר ההתנגשות במהירות משיקית  $u$ . א. מהי הזווית המקסימלית אליה יגיע המוט לאחר הפגיעה? ב. מהי מהירות המסה מיד לאחר הפגיעה? ג. מהו הכוח אותו מפעילה המסילה על המסה מיד לאחר ההתנגשות?

**(11) צמד לוליינים בטרפז**

- בקרס ישנו מכשיר הקרוי טרפז. על הטרפז נתלה לוליין המחזיק בידיו לוליין אחר. נתון כי צמד הלוליינים התחילו את תנועתם ממנוחה במצב מאוזן וניתקו ידיהם במצב מאונך. הניחו כי אורך כל לוליין  $l$  ומסתו  $m$ . לאחר הניתוק הלוליין המנותק סוגר את גופו לחצי מאורכו. א. מהי המהירות הזוויתית ברגע הניתוק? ב. מהי המהירות הזוויתית של הלוליין המנותק מיד לאחר הניתוק ולפני שסגר את גופו? ג. מהי המהירות הזוויתית לאחר שסגר את גופו?

**(12) מוט מתגלש - מציאת מהירות**

מוט בעל מסה  $m$  ואורך  $l$  מונח על רצפה וקיר חלקים בזווית נתונה  $\theta_0$ . מיד לאחר שהניחו את המוט, המוט מתחיל להחליק עד הפגיעה ברצפה. אין חיכוך בין המוט לקיר או לרצפה. מצאו את מהירות מרכז המסה של המוט בזמן פגיעתו ברצפה.


**(13) 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 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.


**(14) 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  $\mu_s$ .



**15) גליל בתוך גליל\***


גליל מלא ברדיוס  $R$  ומסה  $M$  המפולגת אחידה מתגלגל ללא החלקה בתוך גליל גדול ודק שרדיוסו  $4R$ . הגליל הגדול מקובע במקומו.

א. נתון שמהירות מרכז המסה של הגליל הקטן כאשר הוא בגובה מרכז הגליל הגדול ובדרכו מטה היא  $v_0$ . מהו גודלו וכיוונו של כוח החיכוך הפועל על הגליל בנקודה זו? ומהו התנאי על  $v_0$  כך שיתאפשר לגלול ללא החלקה אם מקדם החיכוך  $\mu_s$  נתון?

ב. מהי מהירות מרכז המסה של הגליל הקטן כאשר הוא בתחתית הגליל הגדול?  
 ג. כאשר הגליל הקטן נמצא בתחתית הגדול, פוגע בו קליע נקודתי, גם הוא בעל מסה  $M$  הנע ישר כלפי מטה. הקליע נדבק לשפת הגליל בדיוק מעל מרכזו ונע עמו (זמן ההתנגשות קצר מאוד וניתן להזניח את השפעת החיכוך עם הגליל הגדול בהתנגשות).  
 שים לב שלאחר הפגיעה הגלול כבר לא חייב להיות ללא החלקה. מצא את מהירות מרכז הגליל (לא מרכז המסה) לאחר הפגיעה.

**16) תיבה מתנגשת באבן\***


תיבה דו מימדית בגודל  $a \times b$  ומסה  $M$  נעה על משטח אופקי חלק במהירות  $v_0$ .

ברגע מסוים התיבה מתנגשת התנגשות אלסטית באבן עם מסה  $m$  הנמצאת במנוחה על המשטח. כתוצאה מההתנגשות התיבה ממשיכה בתנועה ימינה אך גם מתחילה להסתובב.

ניתן להניח שהפינה הימנית תחתונה של התיבה כל הזמן נוגעת בקרקע.

א. מה התנאי על  $v_0$  כך שהתיבה לא תתהפך?

ב. מה קורה לתנאי של סעיף א' אם  $a \ll b$ ?

**17) 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 המחובר בין הגלילים?

## תשובות סופיות:

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

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

(3) ראה סרטון.

$$mgh = mv^2, a = \frac{g}{2}, t = \frac{1}{2} \left( \frac{g}{2} \right) t^2 \quad \text{א.} \quad mgh = \frac{1}{2} mv^2 \quad \text{ב.} \quad \text{ג. נפילה חופשית.} \quad (4)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} I_1 \omega_0^2 - \frac{1}{2} (I_1 + I_2) \omega_1^2 \quad \text{ב.} \quad \omega_1 = \omega_0 \frac{I_1}{I_1 + I_2} \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$h = \frac{2}{5} R \quad (6)$$

$$a = \frac{4}{3} \frac{F}{m} \quad \text{א.} \quad a = \frac{4}{3} \frac{F}{m} \quad \text{ב.} \quad F \frac{1}{3} (1 + \cos \varphi), \frac{1}{3} F \quad \text{ג.} \quad (7)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} I_1 \omega_1^2 - \frac{1}{2} I_0 \omega_0^2 \quad \text{ב.} \quad \omega_1 = \omega_0 \cdot 4 \quad \text{א.} \quad (8)$$

(9) ראה סרטון.

(10) ראה סרטון.

$$\sqrt{\frac{8g}{3l}} \quad \text{ג.} \quad \text{ב. אין שינוי.} \quad \sqrt{\frac{g}{6l}} \quad \text{א.} \quad (11)$$

$$\sqrt{\frac{3}{4} g l \sin \theta_0} \quad (12)$$

$$F + \frac{Fr - I \frac{a}{R}}{R} = (m + 2M)(a) \quad \text{ב.}$$

$$I = 2 \frac{1}{2} MR^2 + \frac{1}{2} mr^2 \quad \text{א.} \quad (13)$$

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

$$x_{(t)} = \frac{1}{2} at^2 \quad \text{ג.}$$

$$\vec{a} = -\omega^2 r \hat{r} + \alpha r \hat{\theta} \quad \text{.iii} \quad \alpha = \frac{3g}{2L} \sin \theta \quad \text{.ii}$$

$$\omega = \sqrt{3 \frac{g}{L} (1 - \cos \theta)} \quad \text{.i. א.} \quad (14)$$

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

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

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

$$v_0 = \frac{1}{2} v_1 \quad \text{.ג} \quad v_1 = \sqrt{v_0^2 + 4gR} \quad \text{ב.}$$

$$f_s = \frac{mg}{3}, v_0 \geq \sqrt{\frac{Rg}{\mu_s}} \quad \text{א.} \quad (15)$$

$$v_0 = \frac{\left[ \left( \left( \frac{a}{2} \right)^2 + \frac{I}{M} \right) \left( 1 + \frac{m}{M} \right) + \left( \frac{b}{2} \right)^2 \right] \sqrt{g(2R-b)}}{b \sqrt{\left( \left( \frac{a}{2} \right)^2 + \frac{I}{M} \right)}} \quad \text{א. (16)}$$

כאשר:  $R = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2}$   $I = \frac{M}{12} (a^2 + b^2)$

ב.  $v_0 = 0$

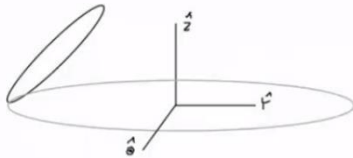
$T \approx 0.22N$  (17)

## תרגילים מסכמים כולל פרסציה:

### שאלות:

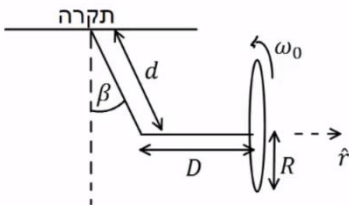
#### (1) מטבע בזווית

נתונה דסקה המתגלגלת ללא החלקה במעגל ברדיוס  $R$  במהירות זוויתית  $\omega$ . נתון גם רדיוס הדסקה. מצא את זווית ההטיה של הדסקה.



#### (2) גלגל קשור בחוט עם זווית

גלגל ברדיוס  $R$  ומסה  $m$  מחובר במרכזו לציר חסר מסה באורך  $D$ . הציר מחובר בקצהו השני לחוט באורך  $d$  הקשור לתקרה ויוצר זווית  $\beta$  עם האנך לתקרה. מסובבים את הגלגל סביב הציר הרדיאלי העובר במרכזו במהירות זוויתית קבועה:  $\vec{\omega} = -\omega_0 \hat{r}$ .



- א. לאן ינוע מרכז המסה של הגלגל ברגע הראשון?  
 ב. מצא את גודלה של הזווית  $\beta$ .  
 הנח שהזווית קטנה וניתן להשתמש בקירוב של זוויות קטנות:  $\sin \beta \approx \beta$ ,  $\cos \beta \approx 1$ .  
 התייחס לגלגל כחישוק.

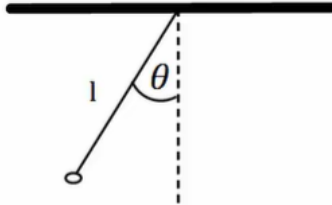
### תשובות סופיות:

$$\tan(\varphi) = \frac{2gR}{3v^2} \quad (1)$$

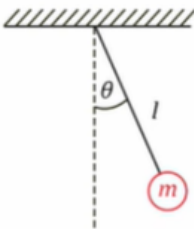
$$\beta = \frac{gD^3}{\omega_0^2 R^4 - dgD^2} \quad (2) \quad \text{א. מרכז המסה ייצא מהדף. ב.}$$

## תרגילים עם תנועה הרמונית:

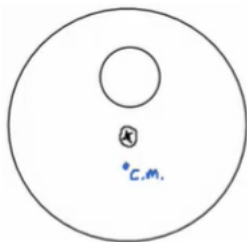
### שאלות:



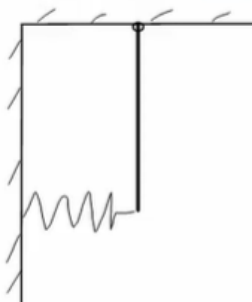
- (1) **מטוטלת מתמטית (עם מומנטים)**  
 נתונה מטוטלת (מתמטית) התלויה מהתקרה.  
 אורך החוט של המטוטלת הוא  $l$ .  
 מצא את תדירות התנודות הקטנות ואת הזווית כפונקציה של הזמן.  
 הנח כי המטוטלת מתחילה את תנועתה ממנוחה בזווית ידועה  $\theta$ .



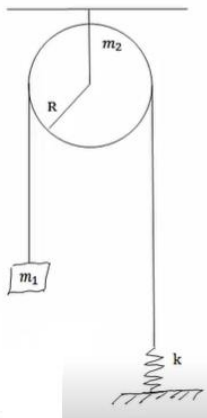
- (2) **מטוטלת פיזיקלית פשוטה**  
 מצא את התדירות של דיסקה  $m$  הקשורה בחוט בעל מסה  $M$  ואורך  $l$ .



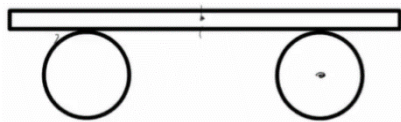
- (3) **דיסקה עם חור**  
 מצא את תדירות התנודות הקטנות של דיסקה בעלת מסה  $M$  ורדיוס  $R$ , אם ידוע כי במרחק  $R$  ממרכז הדיסקה קדחו חור ברדיוס  $R$ .  
 (הדיסקה מחוברת במסמר במרכזה אל הקיר).



- (4) **מוט תלוי מחובר עם קפיץ לקיר**  
 מוט בעל אורך  $L$  ומסה  $M$  (התפלגות אחידה) תלוי מהתקרה וחופשי להסתובב סביב נקודת התלייה.  
 קצהו השני של המוט מחובר בקפיץ, בעל קבוע  $k$  לקיר.  
 הקפיץ רפוי כאשר המוט נמצא מאונך לתקרה.  
 א. הראה כי תנועת המוט בזוויות קטנות היא תנועה הרמונית ומצא את תדירות התנועה.  
 ב. מצא את הזווית של המוט כפונקציה של הזמן אם המוט משוחרר ממנוחה בזווית נתונה  $\theta_0$ .

**(5) גלגלת מסה וקפיץ**

- במערכת הבאה המסה  $m_1$  קשורה בחוט דרך גלגלת אל קפיץ המחובר לקרקע. הגלגלת אינה אידיאלית. נתון:  $R$  רדיוס הגלגלת,  $m_2$  מסת הגלגלת,  $k$  קבוע הקפיץ. הנח כי החוט לא מחליק על הגלגלת.
- מצא את נקודת שיווי המשקל.
  - מצא את תדירות התנודה.
  - מושכים את המסה אורך  $d$  מנקודת שיווי המשקל. מהו  $d_{\max}$ , (המרחק המקסימלי שניתן למשוך את המסה מבלי שהמתיחות בחוט תתאפס במהלך התנועה)?

**(6) מוט על שני גלגלים**

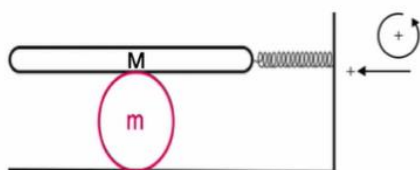
- נתון מוט בעל מסה  $M$  ושתי גלגלות אשר מסתובבות במהירות  $\omega_0$ . המוט מונח על הגלגלות במרחק  $d$  מקדם החיכוך הקינטי הוא  $\mu_k$ . נותנים למוט תנועה קטנה. הראה את התנועה ההרמונית שהמוט עושה.

**(7) שני חצאי דיסקה**

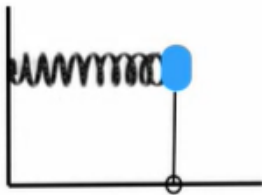
- נתונים שני חצאי דיסקה התלויים על מסמר כמתואר בשרטוט. מסת הדיסקה ורדיוסה נתונים. מצא את התדירות של כל אחת מחצאי הדיסקה.

**(8) חצי חישוק ושתי מסות**

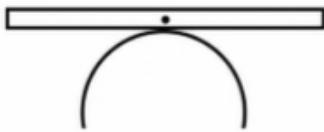
- מצא את תדירות חצי החישוק שבתמונה. רדיוסו  $R$ , מסתו  $M$ , בקצותיו חוברים שתי מסות  $m$ . החישוק תלוי ממסמר בקודקודו.

**(9) משטח על דסקה מחובר לקפיץ**

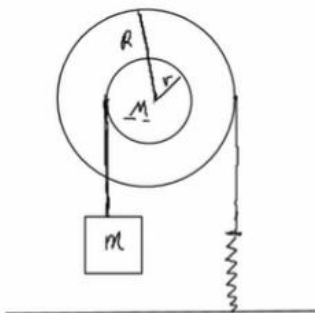
- נתונה מערכת כבשרטוט (אין החלקה במערכת). מהי התדירות?

**10 קפיץ מוט ומסה**

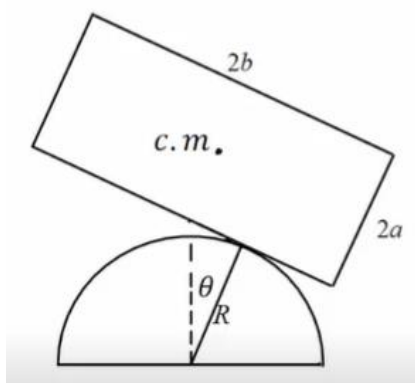
- נתונה מסה  $m$  המחוברת לקפיץ בעל קבוע  $k$ .  
 המסה גם מחוברת למוט חסר מסה בעל אורך  $l$ .  
 המוט מחובר לרצפה בציר המאפשר לו להסתובב.  
 המערכת בשרטוט נמצאת במצב שיווי משקל.  
 א. מהי תדירות התנודות הקטנות של המערכת?  
 ב. מהי המסה המקסימלית שתאפשר תדירות זו?

**11 מוט על חצי כדור**

- מוט בעל אורך  $l$  ומסה  $m$  מונח על כדור בעל רדיוס  $R$ .  
 א. מצא את תדירות התנודות הקטנות של המוט.  
 ב. מצא את גובה מרכז המסה של המוט כפונקציה של זווית ההטיה.

**12 דיסקה כפולה מסה וקפיץ**

- נתונה דיסקה ממוסמרת במרכזה לקיר (כלומר הדיסקה יכולה להסתובב אך לא לנוע מעלה ומטה).  
 הדיסקה בנויה משתי דיסקות מודבקות בעלות רדיוס  $r$  לדיסקה הקטנה ו- $R$  לדיסקה הגדולה.  
 סביב הדיסקות מלופפים חוטים כמתואר בשרטוט. עוד נתון כי אין החלקה לחוטים.  
 א. מצא את תדירות התנודות.  
 ב. מהי האנרגיה הכוללת של המערכת?

**13 תיבה על כיפה חצי כדורית\*\***

- תיבה שמסתה  $M$  מונחת על כיפה גלילית חצי עגולה ברדיוס  $R$ . גודל התיבה הוא  $2a \times 2b$ .  
 מניחים את התיבה על ראש הכיפה כך שמרכזה בדיוק מעל מרכז הכיפה.  
 לאחר מכן מטים את התיבה מעט הצידה כך שהיא מתגלגלת ללא החלקה על הכיפה.  
 מצא את תדירות התנודות הקטנות של התיבה על ראש הכיפה.  
 מה התנאי שיהיו תנודות?

## תשובות סופיות:

$$\theta(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (1)$$

$$-\left[ \frac{(m+M)g \cdot \frac{ml + M \frac{1}{2}}{m+M}}{\frac{1}{3}Ml^2 + \frac{1}{2}mR^2 + m(1+R)} \right] \cdot \theta = \ddot{\theta} \quad (2)$$

$$-\left( \frac{16}{247} \frac{g}{R} \right) (\theta - (0)) = \ddot{\theta} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{k^+}{m^+}} t\right) \quad \text{ב.} \quad \omega = \sqrt{\frac{k^+}{m^+}} \quad \text{א.} \quad (4)$$

$$d_{\max} = \frac{m_1 g}{k} \quad \text{ג.} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m_1 + \frac{1}{2}m_2}} \quad \text{ב.} \quad x_0 = \frac{m_1 g}{k} \quad \text{א.} \quad (5)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\mu_k g}{d}} \quad (6)$$

$$\text{דיסקה 1: } -\left(\frac{A}{B}\right) \cdot (\theta - (0)) = \ddot{\theta}, \quad \text{דיסקה 2: ראה סרטון.} \quad (7)$$

$$-\frac{(2m+M) \cdot gb}{I} \theta = \ddot{\theta} \quad (8)$$

$$\ddot{x} = -\left(\frac{K}{m+2M}\right)x \quad (9)$$

$$m < \frac{lk}{gv} \quad \text{ב.} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{g}{l}} > 0 \quad \text{א.} \quad (10)$$

$$y_{\text{cm}} = R \left(1 + \frac{\theta^2}{2}\right) \quad \text{ב.} \quad \omega = \sqrt{\frac{12gR}{l^2}} \quad \text{א.} \quad (11)$$

$$-\frac{KR}{\frac{1}{2}MR + \frac{r^2}{R}} x + \frac{rmg}{\frac{1}{2}MR + \frac{r^2}{R}} = \ddot{x} \quad \text{א.} \quad (12)$$

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2}Kx^2 - mgx + \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2 \quad \text{ב.}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g(R-a)}{\frac{1}{3}(a^2+b^2)+a^2}} \quad (13)$$