# פיזיקה 1 מכניקה למהנדסים

## פרק 6 - תנועה מעגלית

### תוכן העניינים


1. נוסחאות בסיסיות בתנועה מעגלית ..... 1
2. הכוח הצנטרפוגלי ..... 7
3. וקטורים בתנועה מעגלית ..... 9
4. תרגילים מסכמים ..... 12
5. תרגילים מסכמים למתקדמים ..... 16

# נוסחאות בסיסיות בתנועה מעגלית

## רקע

- תנועה מעגלית היא תנועה על מעגל עם רדיוס קבוע.

| | | |
|---|---|---|
| הדרך בתנועה מעגלית | $S = \Delta\theta \cdot R$ | יש להציב את הזווית ברדיאנים |
| גודל המהירות הקווית הרגעית (speed) | $v(t) = \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}$ | כיוון המהירות תמיד משיק למעגל |
| מהירות זוויתית | $\omega = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ | $f$- התדירות<br>$T$ - זמן המחזור<br>התדירות וזמן המחזור מוגדרים רק בתנועה מעגלית קצובה |
| קשר בין המהירות הקווית לזוויתית | $v = \omega R$ | קשר רק בין הגדלים |
| תאוצה רדיאלית<br>לכיוון מרכז המעגל | $a_r = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$ | |
| **הכוח** | $\Sigma F_{\text{למרכז המעגל}} = m\frac{v^2}{R} = m\omega^2 R$ | |
| **תאוצה זוויתית** | $\alpha = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}$ | |
| תאוצה משיקית | $a_\theta = \frac{\mathrm{d}\lvert\vec{v}\rvert}{\mathrm{d}t} = \alpha R$ | |
| **הגובה במעגל אנכי** | $\mathrm{h} = R(1 - \cos\theta)$ | כאשר h ו- $\theta$ נמדדים מתחתית המעגל |

## שאלות

**1) דוגמה-נהג מרוצים**

נהג מרוצים נוסע במסלול מעגלי שרדיוסו 50 מטר.

מהירותו של הנהג כתלות בזמן היא: $v(t)=4t$.

א. מצא את המהירות הזוויתית של הנהג כתלות בזמן ומצא את הזווית של הנהג לאחר 5 שניות? (בהנחה כי התחיל מזווית אפס).

ב. מתי ישלים הנהג את הסיבוב הראשון?

**2) דוגמה-חישוב מהירות זוויתית של מחוגי שעון**

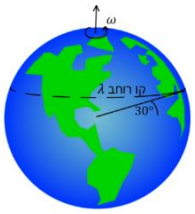
חשב את המהירות הזוויתית של מחוג השניות, מחוג הדקות ומחוג השעות בשעון מחוגים.

**3) חישוב מהירות זוויתית של כדור הארץ**

א. חשב את המהירות הזוויתית של סיבוב כדור הארץ סביב עצמו.

ב. מהי המהירות הקווית של אדם הנמצא בקו המשווה אם רדיוס כדור הארץ הוא בערך 6400 ק"מ?

ג. מהי המהירות הקווית של אדם הנמצא בקו רוחב $\lambda=30^\circ$?




**4) דוגמה-יובל מסובבת אבן**

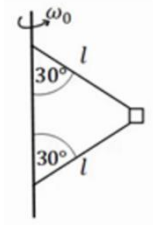
יובל קושרת אבן שמסתה 200 גרם לחוט באורך 0.7 מטר.

יובל מסובבת את האבן באמצעות החוט במעגל אופקי מעל ראשה (כמו שמסובבים קלע). המהירות הזוויתית של האבן היא: $12\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$.

מהי התאוצה הרדיאלית של האבן ומהי המתיחות בחוט?

הנח שכוח הכובד זניח.

**5) מסה קשורה לעמוד מסתובב**



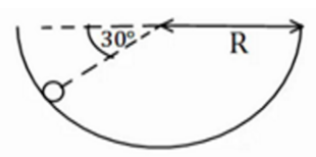

במערכת הבאה מסה $m$ קשורה דרך שני חוטים למוט המסתובב במהירות זוויתית $\omega_0$. אורך החוטים זהה ושווה ל-$l$.

הזווית של החוטים עם המוט היא 30 מעלות.

מהי המתיחות בכל חוט? בשאלה זו כוח הכובד אינו זניח.

נתונים: $m, l, \omega_0$.

**6) כדור בקערה כדורית**




כדור קטן מונח בתוך קערה כדורית בעלת רדיוס $R$.
מניחים את הכדור בזווית של 30 מעלות ביחס לאופק
ונותנים לו מהירות התחלתית לתוך הדף.
מהו גודל המהירות ההתחלתית הדרוש כך שהכדור
יישאר בתנועה מעגלית בגובה קבוע?

**7) דוגמה-תאוצה זוויתית נהג המרוצים**

מצא את התאוצה הזוויתית בדוגמה-נהג מרוצים (שאלה 1).

**8) זווית משתנה בזמן**

המיקום הזוויתי של נקודה על גבי שפת גלגל מסתובב נתונה
ע"י: $\phi = 5t + 3t^2 - 2t^3$.

א. מהי המהירות הזוויתית ב-$t = 2\sec$ ו-$t = 4\sec$?

ב. מהי התאוצה הזוויתית הממוצעת בין זמנים אלו?

ג. מהי התאוצה הזוויתית הרגעית בזמנים אלו?

**9) תאוצה משיקית קבועה**

גוף נע במעגל בעל רדיוס $R$ בתאוצה משיקית קבועה $a_t$
וללא מהירות התחלתית.
מצאו את גודל התאוצה הרדיאלית:

א. כפונקציה של הזמן.

ב. כפונקציה של זווית הסיבוב.

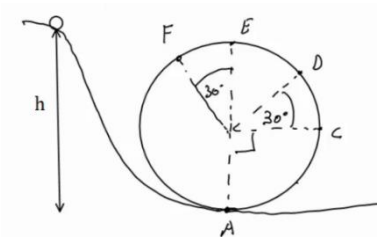
**10) תאוצה משיקית רדיאלית וכוללת**

גוף נע במעגל שרדיוסו 3 מטר.
הדרך שעובר הגוף נתונה ע"י: $s = 6t^2 + 3t$.
חשב את התאוצה המשיקית, הרדיאלית והכוללת (כתלות בזמן).

**11) דוגמה-כוח על נהג המרוצים**

בדוגמה של נהג המרוצים (שאלה 1), מצא מה הכוח הפועל על המכונית
אם מסת המכונית (כולל הנהג) היא טון אחד.
מי מפעיל כוח זה?

**12) דוגמה-כדור בלופ**




כדור קטן מאוד מתחיל להתגלגל ממנוחה מגובה $h=6m$ ונכנס לתוך מעגל אנכי.
נתון שהכדור משלים סיבוב ואין חיכוך בינו לבין הרצפה.
רדיוס המעגל הוא: $R=2m$.

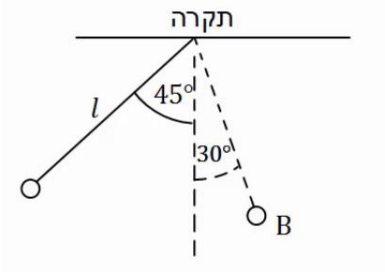
א. מצא את מהירות הכדור בכל הנקודות באיור.
(רמז: שימור אנרגיה).

ב. מצא את התאוצה הרדיאלית של הכדור באותן נקודות.

ג. מצא את התאוצה בכיוון המשיק באותן נקודות.

ד. מצא את גודל התאוצה הכוללת באותן נקודות.

**13) כוחות במטוטלת**




מטוטלת משוחררת ממנוחה מזווית של 45 מעלות.
אורך החוט הוא $l$ והמסה היא $m$.

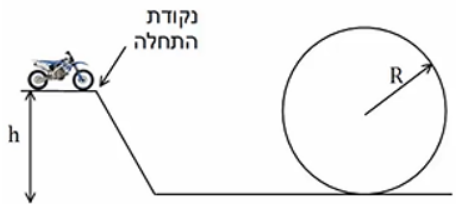
א. מהי מהירות המסה בתחתית המסלול?

ב. מהי המתיחות בחוט ברגע זה?

ג. מהי מהירות המסה בנקודה B הנמצאת בזווית 30 מעלות? ומהי המתיחות בחוט באותה נקודה?

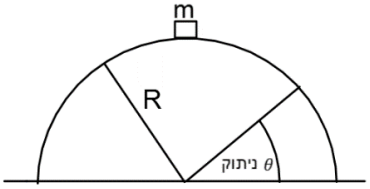
ד. מהי המתיחות בחוט בשיא הגובה וברגע השחרור?

**14) רוכב אופנוע במעגל אנכי**




רוכב אופנוע מתחיל תנועתו מנקודת ההתחלה שבציור.
מהי המהירות ההתחלתית המינימלית הנדרשת עבור הרוכב כך שיוכל להשלים את הסיבוב האנכי.
הנח שהרוכב אינו משתמש במנוע לאחר נקודת ההתחלה.
נתון: $R$ , $h$.

**15) קופסה מחליקה על גבעה מעגלית**




קופסה במסה $m$ מונחת על ראש גבעה בצורת חצי מעגל ברדיוס $R$.
הקופסה מתחילה להחליק לאחד הצדדים ממנוחה כאשר אין חיכוך בינה לבין הגבעה.
מצא באיזה זווית הקופסה תתנתק מהגבעה.

## תשובות סופיות

**1)** א. $\theta \approx 57.3^\circ$ , $\omega = \frac{2t}{25}$ ב. $12.5\text{sec}$

**2)** מחוג שניות: $0.105\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ מחוג דקות: $1.75\cdot10^{-3}\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$

מחוג שעות: $1.45\cdot10^{-4}\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$

**3)** א. $7.27\cdot10^{-5}\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ ב. $465\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ג. $400\frac{\text{m}}{\text{sec}}$

**4)** $T = 20.16\text{N}$ , $a_r = 100.8\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

**5)** $T_1 = \frac{mg}{\sqrt{3}} + \frac{m\omega_0^2 l}{2}$ , $T_2 = \frac{-mg}{\sqrt{3}} + \frac{m\omega_0^2 l}{2}$

**6)** $v = \sqrt{\frac{3gR}{2}}$

**7)** $\alpha = \frac{2}{25}\frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$

**8)** א. $\omega(t=4) = -67\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ , $\omega(t=2) = -7\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ ב. $\bar{\alpha} = -30\frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$

ג. $\alpha(t=4) = -42\frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$ , $\alpha(t=2) = 18\frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$

**9)** א. $a_r = \frac{(a_t \cdot t)^2}{R}$ ב. $a_r = 2a_t\theta$

**10)** $a = \sqrt{12^2 + 9(4t+1)^4}$ , $a_r = (4t+1)^2 \cdot 3\frac{m}{\text{sec}}^2$ , $a_\theta = 12\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

**11)** $|F| = \sqrt{(80t)^2 + 4000^2}$ , הכביש מפעיל כוח זה.

**12)** החיכוך מהכביש: $|F| = \sqrt{(80t)^2 + 4000^2}$

**13)** א. $v_F \approx 6.73\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , $v_E \approx 6.32\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , $v_D \approx 7.975\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , $v_C \approx 8.94\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , $v_A \approx 10.95\frac{\text{m}}{\text{sec}}$

ב. $a_{r_B} = 40\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ , $a_{r_A} = 60\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ וכו', לפי הנוסחה $a_r = \frac{v^2}{R}$.

ג. $a_{\theta_F} = 5\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ , $a_{\theta_E} = 0$ , $a_{\theta_D} = -10\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ , $a_{\theta_C} = -g$ , $a_{\theta_A} = 0$

ד. $|\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{a_r^2 + a_\theta^2}$

**14)** א. $v=\sqrt{0.58gl}$ ב. $T=1.58mg$

ג. מהירות: $v_B=\sqrt{0.32gl}$, מתיחות: $T=mg(1.19)$.

ד. בשניהם: $T=mg\frac{1}{\sqrt{2}}$.

**15)** $\theta=41.8°$

# הכוח הצנטרפוגלי

## רקע

$$F_r = m\omega^2 R$$

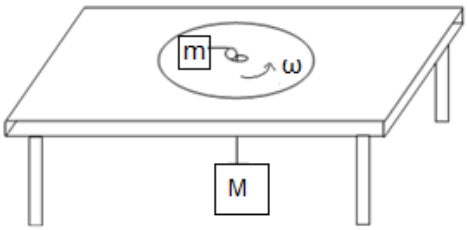
בכיוון החוצה מהמעגל

שימו לב שהכוח הצנטריפוגלי הוא כוח מדומה והוא מגיע מדרך הסתכלות שונה על תנועה מעגלית של צופה המסתובב עם המערכת. בצורת ההסתכלות הזו אין לגוף תאוצה רדיאלית.

## שאלות

**1) מסה על שולחן מסתובב**

מסה m מונחת על דיסק המסתובב על שולחן במהירות זוויתית קבועה $\omega$.
המסה מחוברת לחוט העובר דרך מרכז השולחן ומחובר למסה m.
בין המסה m לדיסק יש חיכוך ומקדם החיכוך הסטטי הוא $\mu_s$.
נתון: $\omega$ , $\mu$ , m , $\mu_s$.
מהו הרדיוס המינימלי והרדיוס המקסימאלי שבו ניתן להניח את המסה כך שלא תזוז בכיוון הרדיאלי?



## תשובות סופיות

**1)** $r_{\substack{\max\\\min}} = \dfrac{Mg \pm \mu_s mg}{m\omega^2}$

# וקטורים בתנועה מעגלית

## רקע

וקטור המיקום: $\vec{r} = R\cos\theta\hat{x} + R\sin\theta\hat{y}$

הקשר בכללי בין המהירות הקווית לזוויתית: $\vec{v} = \vec{\omega}\times\vec{r}$

וקטורי יחידה בכיוון רדיאלי ומשיק:

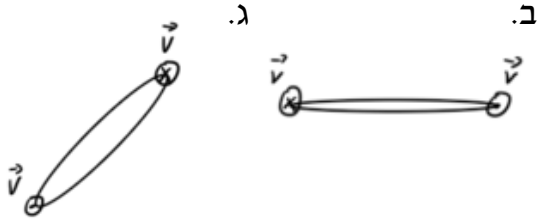
$$\hat{r} = \cos\theta\,\hat{x} + \sin\theta\hat{y} \;\; ; \;\; \hat{\theta} = -\sin\theta\,\hat{x} + \cos\theta\hat{y}$$

## שאלות

**1) מציאת הכיוון של אומגה**

במקרים הבאים נתון כיוונה של המהירות הקווית של גוף הנע במעגל.
מצא את הכיוון של המהירות הזוויתית בכל מקרה:

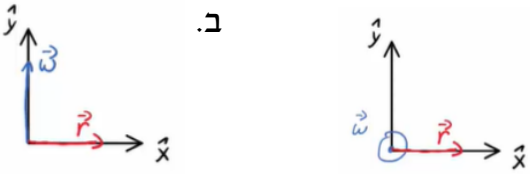
א. ב. ג.



**2) תרגיל לנוסחה** $\vec{v} = \vec{\omega}\times\vec{r}$

מצא את כיוון המהירות הקווית של הגוף במקרים הבאים בהנחה כי הגוף נע בתנועה מעגלית.

א. ב.



**3) תאוצה זוויתית קבועה כוקטור**

גוף נע במעגל בעל רדיוס קבוע שאינו ידוע.

התאוצה הזוויתית של הגוף קבועה ונתונה לפי: $\vec{\alpha} = 2\hat{x} + 3\hat{y} + 1\hat{z}$ ביחידות של רדיאן לשניה בריבוע.

המיקום ההתחלתי והמהירות הזוויתית ההתחלתית הם: $\vec{r}_0 = 5\hat{x} + 3\hat{y} - 2\hat{z}$

במטרים ו- $\vec{\omega}_0 = -2\hat{x} + 3\hat{y} - 4\hat{z}$ ברדיאן לשניה.

מצא את גודל המהירות הקווית של הגוף ב- $t = 2\,\text{sec}$.

**4) דוגמה-וקטור המיקום של נהג המרוצים**

מצא את וקטור המיקום כתלות בזמן בדוגמה עם נהג המרוצים:

נהג מרוצים נוסע במסלול מעגלי שרדיוסו 50 מטר. מהירותו של הנהג כתלות בזמן היא $v(t)=4t$.

א. מצאו את המהירות הזוויתית של הנהג כתלות בזמן, ומצאו את הזווית של הנהג לאחר 5 שניות (בהנחה כי התחיל מזווית אפס).

ב. מתי ישלים הנהג את הסיבוב הראשון?

**5) תנועה מעגלית שאינה סביב הראשית**

גוף נע על מעגל ברדיוס 3m.

הגוף חולף דרך הנקודה (5,4) ביחס לראשית הצירים O.

נתון כי מרכז המעגל נמצא ב- (5,7) והמהירות הזוויתית היא: $\omega=\frac{2\pi\ \text{rad}}{20\ \text{sec}}$.

א. מצא את וקטור המיקום של הגוף כפונקציה של הזמן.

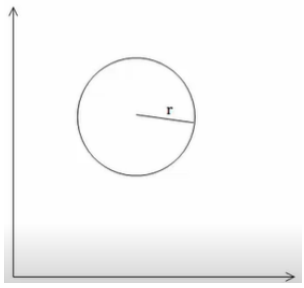
ב. מצא את וקטור המהירות של הגוף כפונקציה של הזמן.

ג. מצא את וקטור התאוצה של הגוף כפונקציה של הזמן.

ד. מצא את המהירות הממוצעת בין $t=5\,\text{sec}$ ל- $t=10\,\text{sec}$.

ה. מצא את תחום הזווית ביחס לראשית בו נע וקטור המקום.

ו. מצא את תחום הגדלים של וקטור המקום.



## תשובות סופיות

1) א. $\otimes$ ב. $\downarrow$ ג. $\wedge$

2) א. $\hat{y}$ ב. $-\hat{x}$

3) $63.63\frac{\text{m}}{\text{sec}}$

4) $\vec{r} = 50\cos\left(\frac{t^2}{25}\right)\hat{x} + 50\sin\left(\frac{t^2}{25}\right)\hat{y}$

5) א. $\vec{r} = \left(5+3\cos\left(\frac{3\pi}{2}+\frac{\pi}{10}t\right), 7+3\sin\left(\frac{3\pi}{2}+\frac{\pi}{10}t\right)\right)$

ב. $\vec{v} = \dot{\vec{r}} = \left(-3\sin\left(\frac{3\pi}{2}+\frac{\pi}{10}t\right)\frac{\pi}{10}, 3\cos\left(\frac{3\pi}{2}+\frac{\pi}{10}t\right)\frac{\pi}{10}\right)$

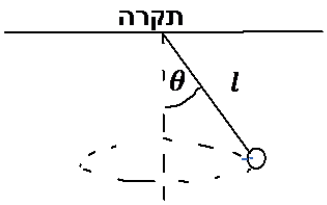
ג. $\vec{a} = \dot{\vec{v}} = -\omega^2\vec{r}$ ' ד. $\vec{v} = \left(\frac{-3}{5}, \frac{3}{5}\right)$

ה. $\theta_{\max} = 74.9°$ , $\theta_{\min} = 34.5°$ ו. $r_{\max} = 8.6+3$ , $r_{\min} = 8.6-3$

# תרגילים מסכמים:

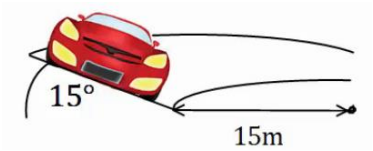
## שאלות:

**1) מטוטלת מסתובבת אופקית**



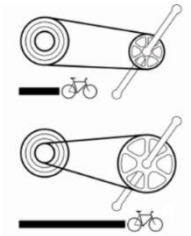

מטוטלת בעלת אורך $l$ מסתובבת סביב ציר האנך לתקרה בזווית מפתח קבועה $\theta$. נתון: $l$ , $\theta$.
מצא את התדירות וזמן המחזור של הסיבוב.

**2) מכונית במחלך**




מכונית נוסעת על מחלך משופע.
זווית השיפוע של המחלך היא 15 מעלות.
רדיוס הסיבוב של המחלך הוא 15 מטרים.
אם נניח שלמכונית אין חיכוך עם הכביש,
מה המהירות בה צריכה לנסוע המכונית על מנת לא להחליק?

**3) הילוכי אופניים**

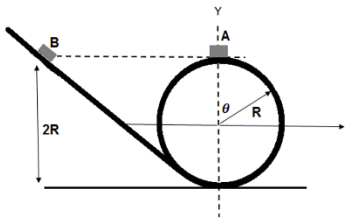


הילוכים של אופניים מורכבים משני גלגלי שיניים ברדיוסים שונים ושרשרת המקיפה את שני הגלגלים. כאשר השרשרת מתוחה האורך שלה קבוע. מצאו את הקשר בין מהירות הסיבוב של גלגלי השיניים אם הרדיוסים שבהם מקיפה השרשרת כל אחד מהגלגלים ידועים.

**4) שני גופים על מסילה מעגלית אנכית (כולל עבודה ואנרגיה)**

מסילה מעגלית חלקה, דקה ובעלת רדיוס R מוצבת במישור אנכי.
מישור משופע וחלק משיק למסילה ומשתלב בה כמתואר בתרשים.
מציבים את בול A בגובה $2R$ ואת בול B על המישור המשופע בגובה זהה מהרצפה.
נותנים ל-A דחיפה קלה ועוזבים את B ממצב מנוחה.
שני הגופים מחליקים, גוף A בצידה החיצוני של המסילה ואילו גוף B משתלב ונכנס לתוך המסילה. בשלב מסוים כל אחד מהגופים מתנתק מהמסילה.
התייחסו לגופים כאל גופים נקודתיים.

א. באיזו זווית $\theta_1$ עם ציר ה- $y$ , יתנתק גוף A מהמסילה?




ב. באיזו זווית $\theta_2$ יתנתק גוף B מהמסילה?

ג. אם שני הגופים מתנתקים מהמסילה בו זמנית.
מה גודל המהירות היחסית בניהם?

ד. מה יהיה המרחק בין הגופים לאחר הניתוק,
אחרי פרק זמן $\Delta t$ (הניחו שהגופים עדיין באוויר).

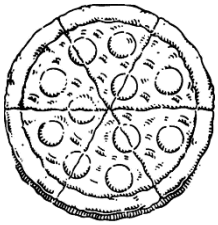
**5) מציאת מיקום כפונקציה של הזמן**

חלקיק מוגבל לנוע על מעגל ברדיוס R.

נתון שגודל המהירות של החלקיק: $V(t)=Ct^2$ כאשר C קבוע.

מצאו ופתרו את משוואת המיקום של החלקיק.

**6) מסובבים פיצה בתנועה מעגלית**



מסובבים פיצה בתנועה מעגלית כך שמתקיים: $\theta=4t^2+5t$
כאשר $\theta$ נמדדת ברדיאנים ו- $t$ בשניות.

א. מצאו את המהירות הזוויתית של הבצק.

ב. מצאו את התאוצה הזוויתית של הבצק.

ג. לאחר שהוסיפו את הזיתים מסובבים עוד פעם את הפיצה באותו אופן.

מצאו את הרדיוס בו נמצא זית הנע בתאוצה משיקית של $0.2\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$.

ד. חזור על סעיף ג' אם ידוע שהתאוצה הקווית הכוללת ב- $t=1\text{sec}$ היא: $0.2\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$.

**7) תאוצה משיקית קבועה**

נקודה נעה במסלול מעגלי שרדיוסו 30 ס"מ.

הנקודה נעה בתאוצה משיקית קבועה של 4 מטר לשנייה בריבוע.

לאחר כמה זמן מתחילת התנועה התאוצה הרדיאלית של הנקודה תהיה:

א. גדולה פי 2 מהתאוצה המשיקית?

ב. שווה לתאוצה המשיקית?

**8) זווית בין משיקית לכוללת**

גוף נקודתי מתחיל לנוע ממנוחה במסלול מעגלי בעל רדיוס 2 מטר בתאוצה משיקית קבועה. ידוע כי לאחר שני סיבובים שלמים הגיע הגוף למהירות קווית של 2 מטר לשנייה.

א. תוך כמה זמן השלים הגוף את שני הסיבובים הראשונים?

ב. מה הייתה התאוצה המשיקית של הגוף?

ג. מה הייתה הזווית בין וקטור התאוצה המשיקית לווקטור התאוצה השקולה לאחר שני הסיבובים הראשונים?

ד. מתי, החל מעת תחילת התנועה, תהיה התאוצה המשיקית שווה בגודלה לתאוצה המרכזית של הגוף?

ה. איזה מרחק יעבור הגוף עד אז? (ראה סעיף ד').

**9) חמישה סיבובים**

נקודה שנמצאת במרחק 15 ס״מ ממרכז הגלגל, מתחילה להסתובב בתאוצה משיקית קבועה. הנקודה מגיעה למהירות זוויתית של $20\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ לאחר 5 סיבובים.

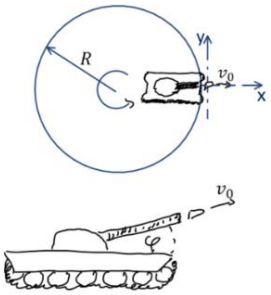
מצא את:

א. התאוצה המרכזית של הנקודה כעבור 5 שניות.

ב. התאוצה המשיקית של הנקודה כעבור 5 שניות.

ג. התאוצה השקולה של הנקודה כעבור 5 שניות.

**10) טנק יורה פגז מדיסקה מסתובבת**




טנק נמצא בקצה של דיסקה ברדיוס R היכולה להסתובב במקביל לקרקע. הדיסקה מתחילה להסתובב ב-$t=0$ בתאוצה זוויתית $\ddot{\theta}=kt^2$.

כעבור זמן $t_0$ הטנק נמצא במיקום שבאיור ויורה פגז.

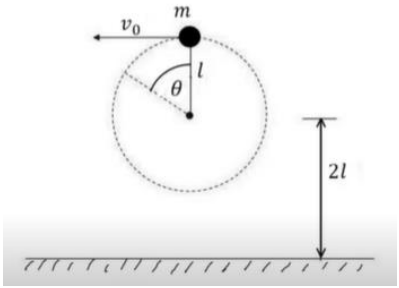
מהירות הלוע של הפגז היא $v_0$.

התותח מכוון בכיוון הרדיאלי כלפי חוץ, ובזווית $\varphi$ מעל הקרקע (במאונך למישור שבו מסתובבת הדיסקה).

א. באיזה מהירות ביחס לצופה נייח יוצא הכדור מלוע הטנק?

ב. באיזה מרחק מנקודת הירי יפגע הפגז?

**11) חוט נקרע במעגל אנכי גבוה**




כדור קטן שמסתו m קשור לקצהו של חוט שאורכו l.

הכדור מסתובב במעגל אנכי שמרכזו בגובה 2l מעל הרצפה.

כאשר החוט מתוח והכדור נמצא אנכית מעל ציר סיבוב מעניקים לו מהירות אופקית $v_0$.

א. מה המהירות המינימלית $v_0$ הנדרשת כדי שהכדור יבצע תנועה מעגלית שלמה?

ב. מעניקים לכדור מהירות התחלתית: $v_0=1.5\sqrt{gl}$,
אם החוט נקרע ברגע שמתיחותו עולה על $5.25mg$
מצאו את הזווית $\theta$ שבה יקרע החוט.

ג. מה מהירות הכדור ברגע שהחוט נקרע, אם נתון ש: $l=2m$?

ד. תוך כמה זמן מרגע קריעת החוט יפגע הכדור ברצפה?

## תשובות סופיות:

1) $f=\frac{\omega}{2\pi}$ , $T=\frac{2\pi}{\omega}$

2) $V\approx 6.34\frac{m}{sec}$

3) $\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{r_2}{r_1}$

4) א. $\theta_1=48.2°$ ב. $\theta_2=\theta_1=48.2°$ ג. $\left|\vec{V}_{AB}\right|=\sqrt{\frac{8}{3}gR}$ ד. $d=\sqrt{\frac{8}{3}gR}\Delta t$

5) $x=R\cos\frac{C\cdot t^3}{3R}$ , $y=R\sin\left(\frac{C\cdot t^3}{3R}\right)$

6) א. $\omega=\dot{\theta}=8t+5$ ב. $\alpha=\dot{\omega}=8\frac{rad}{sec^2}$ ג. $R=2.5c.m$

ד. $1.18\cdot10^{-3}m$

7) א. $t\approx 0.39sec$ ב. $t\approx 0.27sec$

8) א. $t_1\approx 25.1sec$ ב. $a_\theta\approx 0.08\frac{m}{sec^2}$ ג. $\alpha=87.73°$ ד. $t_2=5sec$

ה. $S=1m$

9) א. $a_r\approx 150\frac{m}{sec^2}$ ב. $a_\theta\approx 0.95\frac{m}{sec^2}$ ג. $|a|\approx 150\frac{m}{sec^2}$

10) א. $v_x=v_0\cos\varphi$ , $v_y=\frac{kt_0^{\,3}R}{3}$ , $v_z=v_0\sin\varphi$

ב. $d=\left(\left(v_0\cos\varphi\right)^2+\left(\frac{kt_0^{\,3}R}{3}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}\left(t_0+\frac{2v_0\sin\varphi}{g}\right)$

11) א. $v_{min}=\sqrt{gl^5}$ . ב. $\theta\approx 110°$ . ג. $v\approx 10\frac{m}{sec}$ . ד. $t\approx 0.3sec$

.

# תרגילים מסכמים למתקדמים:

## שאלות:

**1) נקודה על גלגל**

מיקומו של גוף כתלות הזמן נתון ע"י: $x(t)=R\omega t-R\sin(\omega t)$ , $y(t)=R-R\cos(\omega t)$

כאשר R ו-$\omega$ קבועים.

א. מצאו את וקטורי המהירות והתאוצה של הגוף.

ב. מצאו את גודל התאוצה המשיקית והנורמאלית.

ג. ציירו את מסלול הגוף.

**2) חבל עם מסה מסתובב***

נתון חבל אחיד בעל מסה m ואורך l.

החבל קשור בקצה אחד ומסתובב במישור אופקי במהירות זוויתית $\omega$.

מצא את גודל המתיחות לאורך החבל (כתלות במרחק מהקצה הקשור).

רמז: יש לחלק את החבל לחתיכות קטנות ולעשות משוואת תנועה על כל חתיכה.

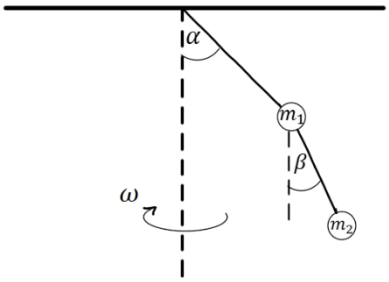
**3) מטוטלת כפולה מסתובבת אופקית***

גוף בעל מסה $m_1$ מחובר באמצעות חוט באורך $l_1$ לתקרה.

גוף בעל מסה $m_2$ מחובר באמצעות חוט באורך $l_2$ לגוף הראשון.

שני הגופים מסתובבים יחדיו בתדירות זוויתית קבועה $\omega$ סביב ציר האנך לתקרה.

הזוויות בין החוטים לאנכים הן: $\alpha$ , $\beta$ (ראה איור).




א. רשום את משוואת התנועה לכל גוף.

ב. מצא מהי הזווית $\alpha$ עבור המקרה בו $m_2=0$ ו-$m_1\neq 0$.

מהי תדירות הסיבוב המינימלית האפשרית?

ג. דני ויוסי ניסו למצא את $\omega$ במקרה הכללי.

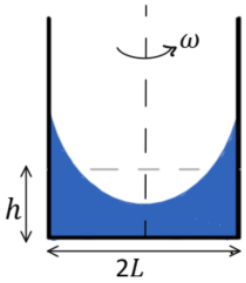
דני הציב את גדלי המתיחויות של החוטים במשוואת התנועה של גוף 2

וקיבל: $\omega^2=\frac{g\tan\beta}{l_1\sin\alpha+l_2\sin\beta}$.

יוסי הציב את המתיחויות במשוואת התנועה של גוף 1 וקיבל: $\omega^2=\frac{g}{l_1}\cdot\frac{\frac{m_1+m_2}{m_1}\tan\alpha-\frac{m_2}{m_1}\tan\beta}{\sin\alpha}$.

ישב את הסתירה.

**4) מים בכלי מסתובב****




תיבה באורך 2L ורוחב $\omega$ כך ש- $\omega << L$ מכילה מים.
גובה המים בתיבה הוא h.
מסובבים את התיבה במהירות זוויתית $\omega$ סביב ציר העובר במרכזה.
הנח כי המים לא נשפכים מהתיבה.

א. מצאו את הפונקציה המתארת את פני המים במרחב
(רמז: חשבו את השיפוע של המשיק לפני המים בנקודה כלשהיא, שיפוע זה הוא הנגזרת של הפונקציה).

ב. מהו הפרש הגבהים בין המים במרכז התיבה למים במרחק אופקי d מהמרכז?

ג. מה יהיה הפרש הגבהים אם נגדיל את מהירות הסיבוב פי 2?

ד. מהו התנאי שתחתית התיבה תתייבש בנקודה כלשהיא?

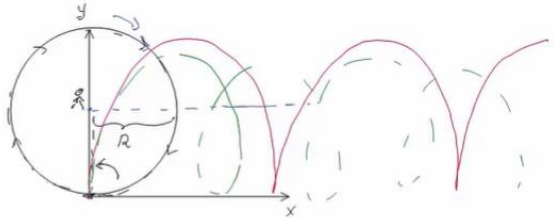
## תשובות סופיות:

**1)** א. $\vec{v}=\left(R\omega-R\cos(\omega t)\cdot\omega\right)\hat{x}+R\sin(\omega t)\cdot\omega\hat{y}$ ,

$$\vec{a}=R\omega^2\sin(\omega t)\hat{x}+R\omega^2\cos(\omega t)\hat{y}$$

ב. $|\vec{a}_n|=\frac{R\omega^2\left(\cos(\omega t)-\cos(2\omega t)\right)}{\sqrt{2\left(1-\cos(\omega t)\right)}}$ , $|\vec{a}_t|=\frac{R\omega^2\left(\sin\omega t\right)}{\sqrt{2\left(1-\cos\omega t\right)}}$

ג.




**2)** $T(x)=\frac{m\omega^2}{2l}\left(l^2-x^2\right)$

**3)** גוף 1: $\sum F_x=m_1\omega^2 l_1\sin\alpha$ , $\sum F_y=0$

גוף 2: $\sum F_x=m_2\omega^2\left(l_1\sin\alpha+l_2\sin\beta\right)$ , $\sum F_y=m_2 g$

**4)** א. $y=\frac{\omega^2x^2}{2g}+h-\frac{\omega^2L^2}{6g}$ ב. $\Delta y=\frac{\omega^2d^2}{2g}$ ג. $\Delta y=\frac{2\omega^2d^2}{g}$

ד. $h=\frac{\omega^2L^2}{6g}$