פיזיקה 1 מכניקה

תוכן העניינים

1. מבוא מתמטי 1
2. וקטורים 20
3. קינמטיקה 43
4. דינמיקה 63
5. תנועה מעגלית 83
6. קואורדינטות פולריות 100
7. כוח גרר וכוח ציפה 109
8. תנועה הרמונית 115
9. עבודה ואנרגיה 132
10. מתקף ותנע 154
11. מרכז מסה 174
12. מסה משתנה 183
13. מומנט התמד 193
14. מומנט כוח 201
15. תנע זוויתי 211
16. גוף קשיח 219
17. כבידה וכוח מרכזי 238
18. יחסות פרטית 251
19. הידרו-סטטיקה והידרו-דינמיקה ..... (ללא ספר)
20. תרגילים ברמת מבחן 270
21. חום והחוק הראשון של התרמודינמיקה 285
22. החוק השני של התרמודינמיקה 307

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 1 - מבוא מתמטי

תוכן העניינים

1. מעברי יחידות 1
2. סינוס קוסינוס ומה שביניהם 3
3. נגזרות ואינטגרלים בסיסיים 7
4. אינטגרל כפול ומשולש 13
5. קואורדינטות ואלמנטים דיפרנציאלים 15
6. צפיפות 18
7. אלמנט מסה אינפיטיסימלי 19

מעברי יחידות:

שאלות:

1) דוגמה 1

נתון: $A=2km\ ,\ B=10gr$.

מצא את $C=A\cdot B$ ביחידות של m.k.s.

2) דוגמה 2

נתון: $A=2m^2\ ,\ B=3gr\ ,\ C=5c.m\cdot s$

חשב את הגדלים הבאים ביחידות של m.k.s:

א. $D=2\cdot A$

ב. $E=\frac{5\cdot B\cdot C}{A}$

3) מעבר יחידות בחזקות

מצא את הגדלים הבאים ביחידות של ס"מ:

א. $A=1m^2$

ב. $B=1m^3$

4) סנטימטר בשלישית

הבע את הערכים הנ"ל ביחידות של $c.m^3$:

א. $5.2m^3$

ב. $320mm^3$

ג. $0.0054km^3$

5) ליטר, דוגמה

הבע את הגדלים הבאים ב- Liter :

א. $5m^3$

ב. $5mm^3$

תשובות סופיות:

1) $20\text{m}\cdot\text{kg}$

2) א. 4m^2 ב. $37.5\cdot10^{-5}\frac{\text{sec}\cdot\text{kg}}{\text{m}}$

3) א. 10^4cm^2 ב. 10^6cm^3

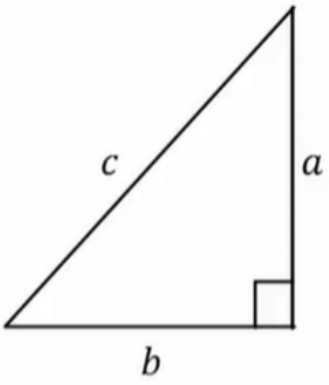
4) א. $5.2\cdot10^6\text{cm}^3$ ב. 0.32cm^3 ג. $5.4\cdot10^{12}\text{cm}^3$

5) א. $5\cdot10^3\text{Liter}$ ב. $5\cdot10^{-6}\text{Liter}$

סינוס קוסינוס ומה שביניהם:

רקע

במשולש ישר זווית:



$$\sin\alpha = \frac{a}{c} = \frac{\text{ניצב שמול}}{\text{יתר}}$$

$$\cos\alpha = \frac{b}{c} = \frac{\text{ניצב ליד}}{\text{יתר}}$$

$$\tan\alpha = \frac{a}{b} = \frac{\text{ניצב שמול}}{\text{ליד ניצב}}$$

$$\tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$$

$$\cot\alpha = \frac{b}{a} = \frac{\text{ניצב ליד}}{\text{ניצב שמול}} = \frac{1}{\tan\alpha}$$

משפט פיתגורס:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

זהויות:

$\sin(90^\circ-\alpha)=\cos\alpha$ $\cos(90^\circ-\alpha)=\sin\alpha$ $\tan(90^\circ-\alpha)=\cot\alpha$ $\cot(90^\circ-\alpha)=\tan\alpha$	$90^\circ-\alpha$
$\sin(90^\circ+\alpha)=\cos\alpha$ $\cos(90^\circ+\alpha)=-\sin\alpha$ $\tan(90^\circ+\alpha)=-\cot\alpha$ $\cot(90^\circ+\alpha)=-\tan\alpha$	$90^\circ+\alpha$
$\sin(180^\circ-\alpha)=\sin\alpha$ $\cos(180^\circ-\alpha)=-\cos\alpha$ $\tan(180^\circ-\alpha)=-\tan\alpha$ $\cot(180^\circ-\alpha)=-\cot\alpha$	$180^\circ-\alpha$
$\sin(-\alpha)=-\sin\alpha$ $\cos(-\alpha)=\cos\alpha$ $\tan(-\alpha)=-\tan\alpha$ $\cot(-\alpha)=-\cot\alpha$	$-\alpha$
$\sin 2\alpha=2\sin\alpha\cos\alpha$ $\cos 2\alpha=\cos^2\alpha-\sin^2\alpha==1-2\sin^2\alpha=2\cos^2\alpha-1$	2α
$\sin(\alpha\pm\beta)=\sin\alpha\cos\beta\pm\sin\beta\cos\alpha$ $\cos(\alpha\pm\beta)=\cos\alpha\cos\beta\mp\sin\alpha\sin\beta$	$\alpha\pm\beta$

סכום והפרש של פונקציות:

$$\sin\alpha\pm\sin\beta=2\sin\left(\frac{\alpha\pm\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\alpha\mp\beta}{2}\right)$$

$$\cos\alpha+\cos\beta=2\cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)$$

$$\cos\alpha-\cos\beta=2\sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)\sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)$$

ערכים ששווה לזכור:

הזווית \הפונקציה	$0°$	$30°$	$45°$	$60°$	$90°$
$\sin\alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}=\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
$\cos\alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}=\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\tan\alpha$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	לא מוגדר

פתרונות עבור:

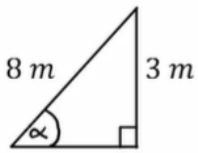
$x_1=\alpha+2\pi k$ $x_2=\pi-\alpha+2\pi k$	$\sin x=\sin\alpha$
$x_1=\alpha+2\pi k$ $x_2=-\alpha+2\pi k$	$\cos x=\cos\alpha$
$x=\alpha+\pi k$	$\tan x=\tan\alpha$

שאלות:

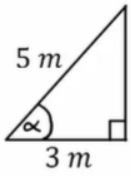
1) דוגמה 1-חישוב אלפא

חשב את הזווית אלפא במקרים הבאים:

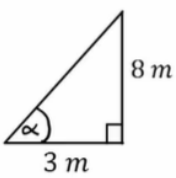
א.



ב.



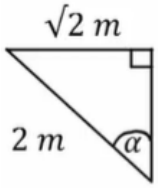
ג.



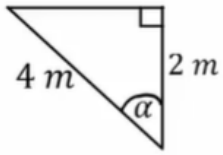
2) דוגמה 2-משולשים שמסורטטים אחרת

חשב את הזווית אלפא במקרים הבאים:

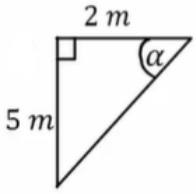
א.



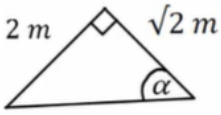
ב.



ג.

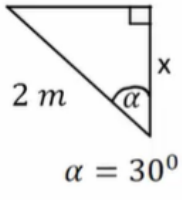


ד.

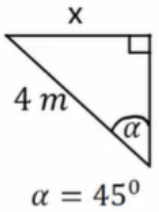


3) דוגמה-2-מציאת ניצבים

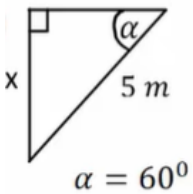
א.



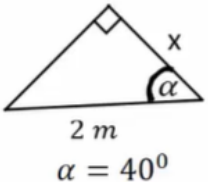
ב.



ג.



ד.



תשובות סופיות:

1) א. $\alpha = 22°$ ב. $\alpha = 53°$ ג. $\alpha = 69°$

2) א. $\alpha = 45°$ ב. $\alpha = 60°$ ג. $\alpha = 68.2°$ ד. $\alpha = 55°$

3) א. $\sqrt{3m}$ ב. $2\sqrt{2m}$ ג. $\frac{5\sqrt{3m}}{2}$ ד. $1.53m$

נגזרות ואינטגרלים בסיסיים:

רקע

נגזרות:

הנגזרת נותנת את שיפוע המשיק לפונקציה בנקודה כלשהיא.

אם y היא פונקציה של x אז הסימון של הנגזרת של y לפי x הוא $\frac{dy}{dx}$ או y'.

נגזרת של פולינום:

$$y(x) = x^n \quad \rightarrow \quad y'(x) = nx^{n-1}$$

כפל בקבוע אפשר להוציא מהנגזרת:

$$\left(Ay(x)\right)' = Ay'(x)$$

נגזרת של מכפלה:

$$y(x) = f(x)g(x) \quad \rightarrow \quad y'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x)$$

כלל שרשרת:

אם y היא פונקציה של x ו- x הוא פונקציה של t אז:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$$

נגזרות של פונקציות נוספות:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{x^2} \quad ; \quad \frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x \quad ; \quad \frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x$$

$$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x \quad ; \quad \frac{d}{dx}(\ln(x)) = \frac{1}{x}$$

אינטגרל:

פעולה הפוכה לנגזרת.

אינטגרל של פולינום

$$\int Ax^n \,\mathrm{d}x = A\frac{x^{n+1}}{n+1}$$

אינטגרל לא מסוים, מוסיפים קבוע לתוצאת האינטגרל.

אינטגרל מסוים, מציבים גבולות בתוצאה של האינטגרל.

$$\int_a^b x^n \,\mathrm{d}x = \frac{x^{n+1}}{n+1}\Big|_a^b = \frac{b^{n+1}}{n+1} - \frac{a^{n+1}}{n+1}$$

מה עושה האינטגרל?

האינטגרל מבצע סכימה על ערכי הפונקציה.

האינטגרל נותן את השטח מתחת לגרף הפונקציה.

שאלות:

1) דוגמה 1

חשב את הנגזרות הבאות:

א. $y=5x^4$, $\frac{dy}{dx}=?$

ב. $y=ax^5$, $\frac{dy}{dx}=?$

ג. $y=5x+2x^{18}$, $\frac{dy}{dx}=?$

ד. $f\left(x\right)=8x^2+2$, $\frac{df}{dx}=?$

ה. $y=6t^2$, $\frac{dy}{dt}=?$

ו. $x=5t^3$, $\frac{dx}{dt}=?$

ז. $x=5t^4+t^3+4$, $\frac{dx}{dt}=?$

ח. $f\left(t\right)=\mathrm{A}t^6+\mathrm{B}t+\mathrm{C}$, $\frac{df}{dt}=?$

2) דוגמא 2

חשב את הנגזרות הבאות:

א. $y=\left(5x^4+2\right)\left(5x+2x^{18}\right)$, $\frac{dy}{dx}=?$

ב. $y=\mathrm{A}x^5\left(\mathrm{B}+\mathrm{C}x^3\right)$, $\frac{dy}{dx}=?$

ג. $y=5x+2x^2\left(4x+5x^5\right)$, $\frac{dy}{dx}=?$

ד. $y=\left(5t^2+1\right)\left(2t+27+5t^3\right)$, $\frac{dy}{dt}=?$

ה. $x=\left(2t^3+7\right)\left(4t+3+6t^2\right)$, $\frac{dy}{dt}=?$

3) דוגמא 3-נגזרת פנימית

חשב את הנגזרות הבאות:

א. $y=(x+2)^4$, $\frac{dy}{dx}=?$

ב. $y=5(8x^2+x)^5$, $\frac{dy}{dx}=?$

ג. $y=5t+2(5t^4+4)^{14}$, $\frac{dy}{dx}=?$

ד. $f(t)=8(5t^4+t^3+4)^2+2$, $\frac{df}{dt}=?$

4) דוגמה 4-כלל שרשרת

חשב את הנגזרות הבאות:

א. $y=(x+2)^4$, $x=2t$, $\frac{dy}{dt}=?$

ב. $y=5(8x^2+x)^5$, $x=5t^4+4$, $\frac{dy}{dt}=?$

ג. $y=5x+2(5x^4+4)^{14}$, $x=3t^2+t$, $\frac{dy}{dt}=?$

ד. $y=x^2$, $x=t^2$, $\frac{dy}{dt}=?$

5) דוגמה 5-נגזרות של פונקציות נוספות

מצאו את הנגזרות של הפונקציות הבאות:

א. $y=\sin(ax)$ כאשר a קבוע.

ב. $y=e^{-x^2}$

6) דוגמה 1-אינטגרלים בסיסיים

חשב את האינטגרלים הבאים:

א. $\int x^7 dx$

ב. $\int x dx$

ג. $\int dx$

ד. $\int 3dx$

ה. $\int 7x^4 dx$

ו. $\int (5x^2+3)dx$

ז. $\int\left(8x^7+5x\right)dx$

ח. $\int \mathrm{A}x^7dx$

ט. $\int\left(\mathrm{A}x^7+\mathrm{B}x\right)dx$

7) דוגמה 2-אינטגרל מסוים

חשב את האינטגרלים הבאים:

א. $\int_0^2 x^5dx$

ב. $\int_1^5 4dx$

ג. $\int_{-1}^3 7x^4dx$

ד. $\int_0^4\left(2x^2+4\right)dx$

ה. $\int_{-1}^2\left(\mathrm{A}x^7+\mathrm{B}x\right)dx$

8) דוגמה 3-אינטגרל של פונקציות נוספות

חשב את האינטגרלים הבאים:

א. $\int_0^\pi \sin x dx$

ב. $\int_0^\pi \cos\left(2x\right)dx$

ג. $\int e^{3x}dx$

ד. $\int_0^5 2e^{-3x}dx$

ה. $\int_3^5 \frac{1}{x}dx$

ו. $\int \frac{1}{x^2}dx$

ז. $\int e^{ax}dx$

תשובות סופיות:

1) א. $20x^3$ ב. $5a\cdot x^4$ ג. $5+36x^{17}$ ד. $16x$ ה. $12\cdot t$

ו. $15t^2$ ז. $20t^3+3t^2$ ח. $6At^5+B$

2) א. $20x^3\cdot\left(5x+2x^{18}\right)+\left(5x^4+2\right)\left(5+36x^{17}\right)$ ב. $5Ax^4\left(B+Cx^3\right)+3ACx^7$

ג. $5+4x\cdot\left(4x+5x^5\right)+2x^2\left(4+25x^4\right)$

ד. $(10t)\left(2t+27+5t^3\right)+\left(5t^2+1\right)\left(2+0+15t^2\right)$

ה. $\left(6t^2+0\right)\left(4t+3+6t^2\right)+\left(2t^3+7\right)\left(4+0+12t\right)$

3) א. $4(x+2)^3\cdot 1$ ב. $25\left(8x^2+x\right)^4(16x+1)$ ג. $5+560t^3(5t^4+4)^{13}$

ד. $16\left(5t^4+t^3+4\right)\left(20t^3+3t^2\right)$

4) א. $8(2t+2)^3$ ב. $500t^3\left(8\left(5t^4+4\right)^2+5t^4+4\right)\cdot\left(16\left(5t^4+4\right)+1\right)$

ג. $\left(5+2\cdot 14\left(5x^4+4\right)^{13}\cdot\left(5\cdot 4x^3+0\right)\right)\cdot(3+2t+1)$ ד. $4t^3$

5) א. $\cos(ax)\cdot a$ ב. $e^{-x^2}\cdot(-2x)$

6) א. $\frac{x^8}{8}+C$ ב. $\frac{x^2}{2}+C$ ג. $x+C$ ד. $3x$ ה. $\frac{7x^5}{5}+C$

ו. ז. $x^8+\frac{5}{2}x^2+C$ ח. $A\cdot\frac{x^8}{8}+C$ ט. $A\frac{x^8}{8}+B\frac{x^2}{2}+C$

7) א. 10.67 ב. 16 ג. 341.6 ד. 58.67 ה. $31.875A+1.5B$

8) א. 2 ב. 0 ג. $\frac{e^{3x}}{3}+C$ ד. $\frac{2}{3}$ ה. $\ln\left(\frac{5}{3}\right)$

ו. $-\frac{1}{x}+C$ ז. $\frac{e^{ax}}{a}$

אינטגרל כפול ומשולש:

שאלות:

פתרו את האינטגרלים הבאים:

1) **דוגמה 1**
$$\int_0^3\int_0^2 3\cdot x^3y^2dxdy$$

2) **דוגמה 2**
$$\int_1^2\int_0^3\left(x^2+2y\right)dxdy$$

3) **דוגמה 3**
$$\int_0^2\int_1^3\left(x^2+y\right)dydx$$

4) **דוגמה 4**
$$\int_0^1\int_0^2 x\cdot z^2dxdz$$

5) **דוגמה 5**
$$\int_1^5\int_0^4 2\cdot y^3dydz$$

6) **דוגמה 6**
$$\int_0^{2\pi}\int_0^3 r^2drd\theta$$

7) **דוגמה 7**
$$\int_a^b\int_0^c 4\cdot x^2ydxdy$$

8) **דוגמה 8**
$$\int_a^b\int_0^c\left(4z+r^2\right)drdz$$

9) **דוגמה 9**
$$\int_0^{2\pi}\int_0^R 4\mathrm{a}\cdot r^2drd\theta$$

10) **דוגמה 10**
$$\int_0^{2\pi}\int_0^R 4yr^2drd\theta$$

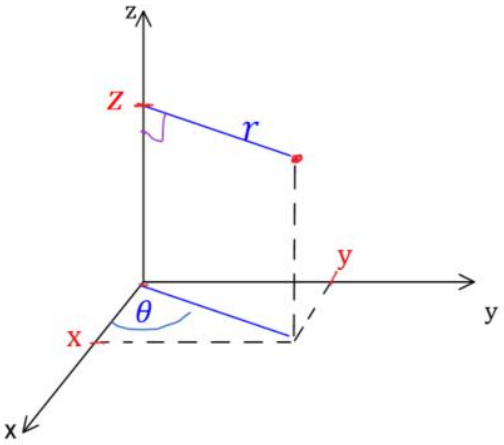
11) **דוגמה 11**
$$\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} r^2\sin\varphi d\theta d\varphi$$

12) **דוגמה – אינטגרל משולש**
$$\int_1^2\int_0^2\int_0^3\left(zx^2+3y\right)dydxdz$$

תשובות סופיות:

1) 108
2) 18
3) 13.33
4) $\frac{2}{3}$
5) 512
6) 56.55
7) $\frac{4c^3}{3}\left(\frac{b^2}{2}-\frac{a^2}{2}\right)$
8) $2cb^2+\frac{c^3}{3}b-2ca^2-\frac{a^3}{3}$
9) $\frac{4aR^3}{3}2\pi$
10) $\frac{8\pi yR^3}{3}$
11) $4\pi r^2$
12) 39

קואורדינטות ואלמנטים דיפרנציאלים:



רקע:

קואורדינטות גליליות: (r,θ,z)

$$x = r\cos\theta$$

$$y = r\sin\theta$$

$$z = z$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\tan\theta = \frac{y}{x}$$

טבעת

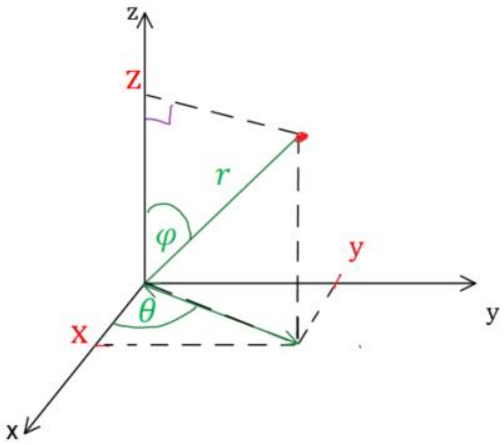
$$dl = r\,d\theta/d\,r/d\,z$$

דיסקה — מעטפת גלילית

$$dS = rd\theta\,d\,r/r\,d\theta\,d\,z/d\,r\,dz$$

גליל מלא

$$dV = rd\theta\,dr\,dz$$



קואורדינטות כדוריות: (r,θ,φ)

$$z = r\cos\varphi$$

$$x = r\sin\varphi\cos\theta$$

$$y = r\sin\varphi\sin\theta$$

$$r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

$$\tan\theta = \frac{y}{x}$$

$$\cos\varphi = \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}$$

$$dl = d\,r/r\sin\varphi d\theta/r\,\mathrm{d}\varphi$$

מעטפת כדור

$$dS = r^2\sin\varphi d\theta\,\mathrm{d}\varphi$$

כדור מלא

$$dV = r^2\sin\varphi dr d\theta\,\mathrm{d}\varphi$$

שאלות:

1) שטח מעגל

חשבו שטח דיסקה בעלת רדיוס R (שטח מעגל) באמצעות אינטגרל על אלמנט שטח בקואורדינטות פולריות.

2) חישוב נפח גליל

חשבו נפח גליל באמצעות אינטגרל על אלמנט נפח בקואורדינטות גליליות.

תשובות סופיות:

1) $S = \pi R^2$

2) $V = \pi R^2 h$

צפיפות:

שאלות:

1) דיסקה עם חור

א. מצא את הצפיפות של דיסקה בעלת רדיוס R ומסה M?

ב. בדיסקה קדחו חור ברדיוס r .
מצא את המסה שהוצאה מהדיסקה.

תשובות סופיות:

1) א. $\frac{M}{\pi R^2}$ ב. $M\left(\frac{r}{R}\right)^2$

צפיפות אינפיטיסימלית:

שאלות:

1) מוט עם צפיפות לא אחידה

חשב את המסה הכוללת של מוט בעל אורך L וצפיפות מסה $\lambda(x)=\lambda_0\frac{x}{L}$

כאשר x הוא המרחק מהקצה השמאלי של המוט והפרמטרים: L , λ_0 הם קבועים.

תשובות סופיות:

1) $\frac{\lambda_0 L}{2}$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 2 - וקטורים

תוכן העניינים

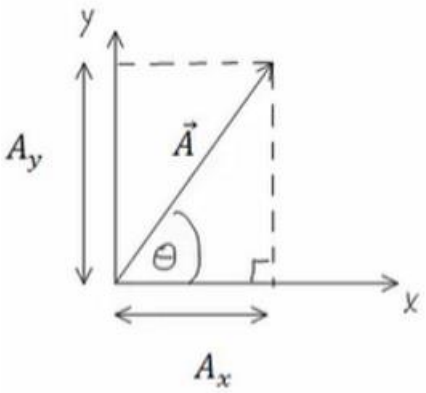
1. הגדרות ופעולות בסיסיות 20
2. מכפלה סקלרית 24
3. וקטור יחידה 30
4. ----- 32
5. וקטור בשלושה מימדים 34
6. מכפלה וקטורית בשלושה מימדים 37
7. גרדיאנט ורוטור 41

הגדרות ופעולות בסיסיות:

רקע:

הצגת וקטור באמצעות גודל וכיוון נקראת הצגה פולרית.
הצגת וקטור באמצעות רכיבי ה- x וה- y נקראת הצגה קרטזית.

פירוק וקטור לרכיבים:



היטל על ציר ה- x או רכיב ה- x של A:

$A_x = \left|\vec{A}\right|\cos\theta$.

היטל על ציר ה- y או רכיב ה- y של A:

$A_y = \left|\vec{A}\right|\sin\theta$.

המעבר ההפוך: $\tan\theta = \frac{A_y}{A_x}$, $\left|\vec{A}\right| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$.

כפל בסקלר:

$$\vec{B} = \alpha\vec{A} = \alpha\left(A_x, A_y\right) = \left(\alpha A_x, \alpha A_y\right)$$

שאלות:

1) חיבור וחיסור בקרטזי

נתונים שלושה וקטורים: $\vec{C}(3,5)$, $\vec{B}(4,2)$, $\vec{A}(1,3)$.

א. חשבו את: $\vec{A}+\vec{B}+\vec{C}$.

ב. חשבו את: $\vec{A}-\vec{B}-\vec{C}$.

ג. חשבו את: $2\vec{A}+3\vec{B}-4\vec{C}$.

2) חיבור וקטורים בפולרי

נתונים שני וקטורים בהצגה הפולרית:

הוקטור $\vec{A}$ שגודלו 10 והזווית שלו עם ציר ה-x היא $30°$.

הוקטור $\vec{B}$ שגודלו 8 והזווית שלו עם ציר ה-x היא $60°$.

מצאו את $\vec{A}+\vec{B}$.

3) עוד חיבור בפולרי

נתונים שני וקטורים:

הוקטור $\vec{A}$ שגודלו 10 וכיוונו $30°$,

הוקטור $\vec{B}$ שגודלו לא ידוע וכיוונו $350°$.

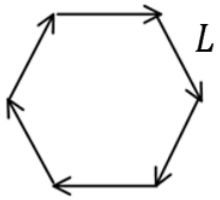
מהו גודלו של הוקטור $\vec{B}$ אם נתון שסכום הוקטורים ייתן וקטור ללא רכיב בציר ה-y?

4) משושה של וקטורים

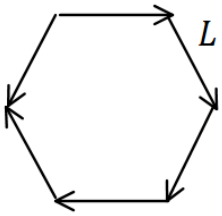
שישה וקטורים בגודל L כל אחד יוצרים משושה שווה צלעות.

מצאו את הוקטור השקול (גודל וכיוון) בכל אחד מהמקרים הבאים:

א.



ב.



5) וקטור בין שתי נקודות

הוקטור $\vec{A}$ הוא וקטור מהנקודה (x_1, y_1, z_1) אל הנקודה (x_2, y_2, z_2).
רשום ביטוי לרכיבים של הוקטור ומצא את גודלו.

6) חיבור באמצעות מקבילית

נתונים הוקטורים $\vec{A}$ ו-$\vec{B}$.
גודלו של A הוא 8 והזווית שלו עם ציר ה-x החיובי היא: $\theta_A = 130^\circ$.
גודלו של הוקטור B הוא 4 והזווית שלו עם ציר ה-x החיובי היא: $\theta_B = 60^\circ$.
שרטט את הוקטורים על מערכת צירים ומצא את $\vec{A}+\vec{B}$ באמצעות שיטת המקבילית.

7) חיסור באמצעות מקבילית

נתונים הוקטורים $\vec{A}$ ו-$\vec{B}$.
גודלו של A הוא 8 והזווית שלו עם ציר ה-x החיובי היא $\theta_A = 130^\circ$.
גודלו של הוקטור B הוא 4 והזווית שלו עם ציר ה-x החיובי היא $\theta_B = 60^\circ$.
שרטט את הוקטורים על מערכת צירים ומצא את $\vec{A}-\vec{B}$ באמצעות שיטת המקבילית.

8) מציאת אורך של שקול

אורכם של שני וקטורים הוא 5 ו-10 ס"מ.
הזווית ביניהם היא 30 מעלות.
מהו אורכו של הוקטור השקול שלהם (סכום הוקטורים)?

9) מציאת זווית בין שני וקטורים

נתונים שני וקטורים שאורכם 10 ו-13 מטר.
אורך השקול שלהם הוא 20 מטר.
מצא את הזווית בין הוקטורים.

תשובות סופיות:

1) א. $(8,10)$ ב. $(-6,-4)$ ג. $(2,-8)$

2) $(12.7,11.9)$

3) 28.8

4) $L\cdot 4\cos(30)$

5) $\left|\vec{A}\right|=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}$, $\vec{A}=(x_2-x_1\ ,\ y_2-y_1\ ,\ z_2-z_1)$

6) $C=10.1$, $\theta_c=108.1°$

7) $C=7.62$, $\theta_c=159.5°$

8) $\left|\vec{a}\right|=14.6c.m$

9) $\theta=60°$

מכפלה סקלרית:

רקע:

שתי דרכים לביצוע המכפלה:

$$\vec{A}\cdot\vec{B}=A_x\cdot B_x+A_y\cdot B_y=\left|\vec{A}\right|\cdot\left|\vec{B}\right|\cdot cos\,\alpha$$

α - זווית בין הוקטורים.

<u>תכונות המכפלה</u>:

- תוצאת המכפלה היא תמיד סקלר (ולא וקטור).
- מכפלה בין וקטורים מאונכים מתאפסת (זו דרך לבדוק האם וקטורים מאונכים)
- מכפלה סקלרית של וקטור בעצמו נותנת את גודל הוקטור בריבוע $\vec{A}\cdot\vec{A}=\left|\vec{A}\right|^2$
- פתיחת סוגרים והעלאה בריבוע:

$$\vec{A}\cdot\left(\vec{B}+\vec{C}\right)=\vec{A}\cdot\vec{B}+\vec{A}\cdot\vec{C}$$

$$\left(\vec{A}+\vec{B}\right)^2=\left|\vec{A}\right|^2+2\vec{A}\cdot\vec{B}+\left|\vec{B}\right|^2$$

נוסחה למציאת זווית בין שני וקטורים: $\cos\alpha=\frac{A_xB_x+A_yB_y}{\left|\vec{A}\right|\cdot\left|\vec{B}\right|}=\frac{\vec{A}\cdot\vec{B}}{\left|\vec{A}\right|\cdot\left|\vec{B}\right|}$.

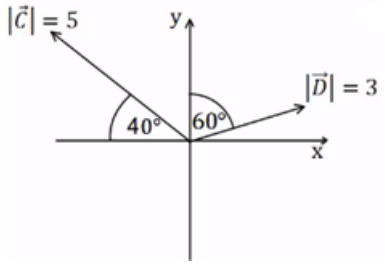
שאלות:

1) דוגמה 1

מצא את תוצאת המכפלה הסקלרית בין הוקטורים הנתונים בכל המקרים הבאים:

א. $\vec{A}=(-1,2)$, $\vec{B}(2,2)$

ב.



2) דוגמה 2

בדוק עבור זוגות הוקטורים הבאים האם הם מאונכים:

א. $\vec{A}=(1,4)\ ,\ \vec{B}=(-2,5)$

ב. $\vec{A}=(1,4)\ ,\ \vec{B}=(8,-2)$

ג. $\vec{A}=(-1,-2)\ ,\ \vec{B}=(-2,1)$

ד. שרטט כל זוג וקטורים מאונכים על מערכת צירים, חשב את זוויות הוקטורים עם הצירים והראה שהזווית בין הוקטורים היא אכן $90°$.

3) דוגמה 3

נתונים הוקטורים הבאים: $\vec{A}=(-3,1)\ ,\ \vec{B}=(2,-4)$.

א. מצא את תוצאת המכפלה הסקלרית באמצעות ההצגות הקרטזיות הנתונות.

ב. מצא את הגודל והזווית של כל וקטור.

ג. מצא את המכפלה הסקלרית שוב, הפעם באמצעות הנוסחה של מכפלת הגדלים בקוסינוס הזווית. בדוק כי התוצאה זהה לסעיף א'.

4) דוגמה 4

נתונים הוקטורים הבאים: $\vec{A}=(-3,1)\ ,\ \vec{B}=(2,-4)$.

א. הראה כי החישוב של $\vec{A}\cdot\vec{B}$ זהה לחישוב $\vec{B}\cdot\vec{A}$.

ב. הוכח בצורה כללית כי המכפלה הסקלרית היא פעולה קומוטטיבית.
(הדרכה: רשום את הוקטורים בצורה כללית עם נעלמים).

5) דוגמה 5

נתונים הוקטורים הבאים: $\vec{A}=(2,1)\ ,\ \vec{B}(-3,2)\ ,\ \vec{C}=(1,-3)$.

חשב את:

א. $\vec{A}\cdot\vec{C}$

ב. $\left(\vec{A}+\vec{B}\right)\cdot\vec{C}$

ג. $\vec{A}\cdot\vec{C}+\vec{B}\cdot\vec{C}$

ד. $\left(\vec{A}\cdot\vec{B}\right)\cdot\vec{C}$

ה. $\vec{A}\cdot\left(\vec{B}\cdot\vec{C}\right)$

ו. $\left(\vec{A}\cdot\vec{B}\right)\cdot\vec{B}$

ז. $\left(\vec{A}\cdot\vec{B}\right)\cdot\left(\vec{B}\cdot\vec{C}\right)$

6) דוגמה 6

נתונים הוקטורים הבאים: $\vec{C}=(1,5)$, $\vec{B}(1,-3)$, $\vec{A}=(-2,2)$.

חשב את:

א. $\frac{(\vec{A}\cdot\vec{B})\vec{B}}{|\vec{B}|^2}$

ב. $\frac{(\vec{B}\cdot\vec{C})\vec{C}}{|\vec{C}|^2}$

7) דוגמה 7

נתונים הוקטורים הבאים: $\vec{C}=(1,5)$, $\vec{B}(1,-3)$, $\vec{A}=(-2,2)$.

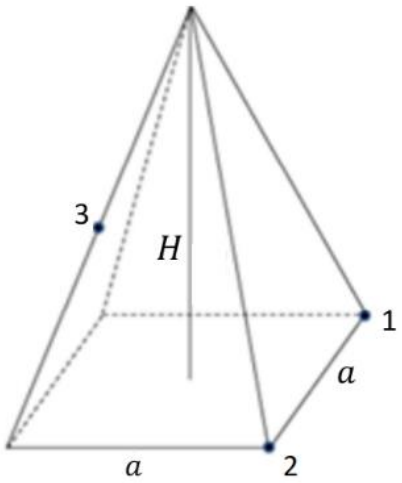
מצא את הזווית בין $\vec{A}$ ל- $\vec{B}$ לבין $\vec{B}$ ל- $\vec{C}$.

8) פירמידה משוכללת*

באיור מתוארת פירמידה משוכללת שבסיסה ריבוע בעל אורך צלע a
וגובהה $H=2a$. נקודה 3 באיור נמצאת באמצע הצלע שבין הפינה לקודקוד.
נגדיר שני ווקטורים:

הווקטור $\vec{A}$ יוצא מנקודה 1 לנקודה 2.

הווקטור $\vec{B}$ יוצא מנקודה 1 לנקודה 3.
מהי הזווית בין שני הווקטורים?



9) הוכיחו את הזהויות

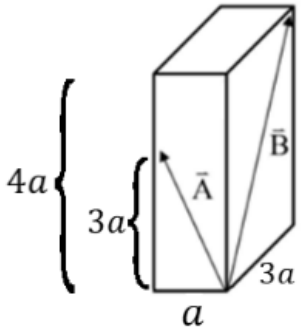
הוכיחו כי: $\vec{A}\cdot\left(\vec{B}+\vec{C}\right)=\vec{A}\cdot\vec{B}+\vec{A}\cdot\vec{C}$

10) היטלים של וקטורים בתוך תיבה

נתונה תיבה בעלת אורך צלעות: a, $3a$ ו- $4a$. נגדיר שני וקטורים: $\vec{A}$ ו- $\vec{B}$ כמתואר באיור.

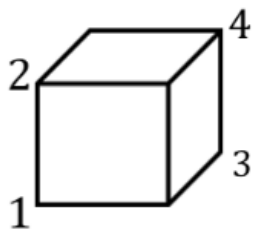
א. מהו היחס בין ההיטל של $\vec{A}$ על הכיוון של $\vec{B}$ (נסמנו - A_B) להיטל של $\vec{B}$ על הכיוון של $\vec{A}$ (נסמנו - B_A), $\frac{A_B}{B_A}$?

ב. חשבו את הזווית בין $\vec{A}$ ל- $\vec{B}$.



11) היטל של אלכסון על אלכסון בקובייה

נתונה קובייה בעלת אורך צלע a, ראו איור.
מהו ההיטל של הווקטור המצביע מפינה 1 לפינה 4 על הציר המוגדר על ידי הכיוון מפינה 3 לפינה 2.

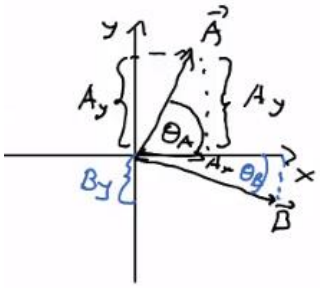


תשובות סופיות:

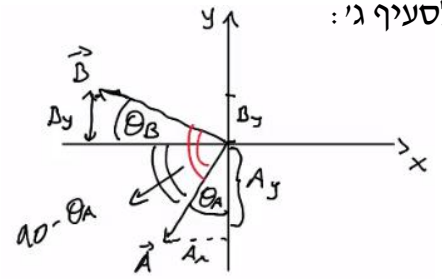
1) א. $\vec{A}\cdot\vec{B}=2$ ב. $\vec{C}\cdot\vec{D}=-5.13$

2) א. $\vec{A}$ לא מאונך ל- $\vec{B}$. ב. הוקטורים מאונכים. ג. הוקטורים מאונכים.

ד. לסעיף ב':



לסעיף ג':



הזויות: $\theta_B=14.04°$, $\theta_A=75.96°$.

הזוויות: $\theta_B=26.57°$, $\theta_A=26.57°$.

3) א. $\vec{A}\cdot\vec{B}=-10$ ב. $\theta_A=161.57°$, $\left|\vec{A}\right|=\sqrt{10}$, $\theta_B=-63.43°$, $\left|\vec{B}\right|=\sqrt{20}$

ג. $\vec{A}\cdot\vec{B}=-10$

4) א. שאלת הוכחה. ב. שאלת הוכחה.

5) א. $\vec{A}\cdot\vec{C}=-1$ ב. $\left(\vec{A}+\vec{B}\right)\cdot\vec{C}=-10$ ג. $\vec{A}\cdot\vec{C}+\vec{B}\cdot\vec{C}=-10$

ד. $\left(\vec{A}\cdot\vec{B}\right)\cdot\vec{C}=(-4,12)$ ה. $\vec{A}\cdot\left(\vec{B}\cdot\vec{C}\right)=(-18,-9)$ ו. $\left(\vec{A}\cdot\vec{B}\right)\cdot\vec{B}=(12,-8)$

ז. $\left(\vec{A}\cdot\vec{B}\right)\cdot\left(\vec{B}\cdot\vec{C}\right)=36$

6) א. $\dfrac{\left(\vec{A}\cdot\vec{B}\right)\vec{B}}{\left|\vec{B}\right|^2}=\left(\dfrac{-8}{10},\dfrac{24}{10}\right)$ ב. $\dfrac{\left(\vec{B}\cdot\vec{C}\right)\vec{C}}{\left|\vec{C}\right|^2}=(-0.54,-2.69)$

7) $\alpha_{\vec{A}\vec{B}}=153.43°$, $\alpha_{\vec{B}\vec{C}}=150.26°$

8) $59°$

9) הוכחה בסרטון

10) א. $\dfrac{\sqrt{10}}{5}$ ב. $40.6°$

11) $-\dfrac{a}{\sqrt{3}}$

וקטור יחידה:

רקע:

$$\hat{A}=\frac{\vec{A}}{\left|\vec{A}\right|}$$

שאלות:

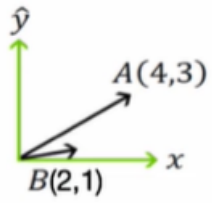
1) דוגמה וקטור יחידה

מצא וקטורי יחידה בכיוון של הוקטורים הבאים:

א. $\vec{A}=(-2,-3)$

ב. $\vec{B}=(3,4)$

2) הטלת וקטור יחידה על וקטור יחידה



נתון הוקטור $\vec{A}$ שבשרטוט.

א. מהו היטל הוקטור על ציר ה- x (וקטור יחידה)?

ב. מהו היטל הוקטור על ציר ה- y (וקטור יחידה)?

ג. הסבר כיצד מחשבים היטל הוקטור על הוקטור $\vec{B}(2,1)$.

ד. הסבר במילים את משמעות ההטלה של וקטור על וקטור.

3) וקטור בזמן

נתון הוקטור $\vec{A}(t)$ במישור דו מימדי כך ש- $\left|\vec{A}(t)\right|=A_0\sin(t)$

ו- $\theta(t)=t$ כאשר $t\in[0,\pi]$ ו- A_0 קבוע.

א. מצא את הרכיבים הקרטזים של $\vec{A}(t)$ כתלות בזמן.

ב. מצא את $\frac{d\vec{A}}{dt}$.

ג. מצא את $\frac{d\hat{A}}{dt}$.

תשובות סופיות:

1) א. $\hat{A}=(-0.55,-0.83)$ ב. $\hat{B}=(0.6,\ 0.8)$

2) א. $\vec{A}_{\hat{x}}=(4,0)$ ב. $\vec{A}_{\hat{y}}=(0,3)$ ג. ראה סרטון

3) א. $A_x(t)=\frac{1}{2}A_0\sin 2t$, $A_y(t)=A_0\sin^2 t$ ב. $A_0\left(\cos 2t\hat{x}+\sin 2t\hat{y}\right)$

ג. $-\sin t\hat{x}+\cos t\hat{y}$

מכפלה וקטורית בדו מימד:

רקע:

$$\vec{A}\times\vec{B}=\left(A_xB_y-A_yB_x\right)\hat{z}$$

<u>הערות</u>:
התוצאה של המכפלה הוקטורית היא תמיד וקטור (בניגוד לסקלרית).

נוסחה נוספת לגודל של המכפלה הוקטורית:
$\vec{A}\times\vec{B}=\left|\vec{A}\right|\cdot\left|\vec{B}\right|\sin\alpha$.

α - זווית הקטנה בין $\vec{A}$ ל- $\vec{B}$.

שאלות:

1) דוגמה-מכפלה וקטורית

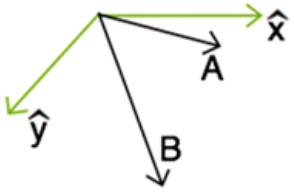
נתונים הוקטורים הבאים: $\vec{B}(2,-3)$, $\vec{A}=(-4,1)$.

א. חשב את $\vec{A}\times\vec{B}$ באמצעות ההצגות הקרטזיות הנתונות.
מהו גודל המכפלה?

ב. מצא את הגודל והזווית של כל וקטור.

ג. חשב את $\left|\vec{A}\times\vec{B}\right|$ שוב, הפעם באמצעות הנוסחה של מכפלת הגדלים בסינוס הזווית. (בדוק כי התוצאה זהה לסעיף א).

2) מכפלה סקלרית וקטורית בפולרי



נתונה מערכת צירים כבשרטוט.
נתונים שני וקטורים:
גודל 10, זווית $\vec{A}-20$.
גודל 15, זווית $\vec{B}-60$.

א. חשב $A\cdot B$ (מכפלה סקלארית).

ב. חשב $A\times B$ (מכפלה וקטורית).

ג. הסבר מדוע המכפלה הוקטורית נותנת את שטח המקבילית שיוצרים הווקטורים.

תשובות סופיות:

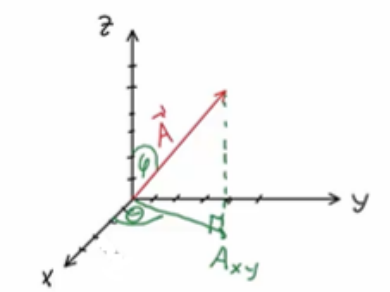
1) א. $\vec{A}\times\vec{B}=10\hat{z}$ וכן $\left|\vec{A}\times\vec{B}\right|=10$.

ב. $\left|\vec{B}\right|=\sqrt{13}\ ,\ \theta_B=-56.31°$ $\left|\vec{A}\right|=\sqrt{17}\ ,\ \theta_A=165.96°\ ,$ ג. $\left|\vec{A}\times\vec{B}\right|=10$

2) א. $\vec{A}\cdot\vec{B}=150\cdot\cos(40)$ ב. $\vec{A}\times\vec{B}=-150\cdot\sin(40)\cdot\hat{z}$ ג. ראה סרטון.

וקטור בשלושה מימדים:

רקע:



$0 \le \varphi \le \pi$

$0 \le \theta \le 2\pi$

מציאת גודל הוקטור: $\left|\vec{A}\right| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$.

פירוק לרכיבים:

$A_z = \left|\vec{A}\right| \cos\varphi$.

$A_{xy} = \left|\vec{A}\right| \sin\varphi$.

$A_x = \left|\vec{A}\right| \sin\varphi \cos\theta$.

$A_y = \left|\vec{A}\right| \sin\varphi \sin\theta$.

שאלות:

1) חישוב וקטור יחידה

נתון הוקטור: $\vec{A}(2,3,4)$.

א. מהו גודלו של הוקטור?

ב. מהו וקטור היחידה של הוקטור $\vec{A}$?

2) חישוב גודל זווית בקרטזי

נתונים שני וקטורים: $\vec{B}(3,4,5)$, $\vec{A}(1,5,10)$.

א. מהו גודלו של כל וקטור?

ב. מהי הזווית בין שני הוקטורים?

3) מציאת שקול וזווית עם הצירים

שני כוחות נתונים פועלים על גוף: $\vec{B}(3,6,7)$, $\vec{A}(1,4,5)$.

א. מהו הכוח השקול?

ב. מהו גודלו של הכוח השקול?

ג. מהי הזווית בין הכוח השקול ובין כל אחד מהצירים?

4) וקטור בזווית 30 עם ציר Y - ספיר אפיק מעבר

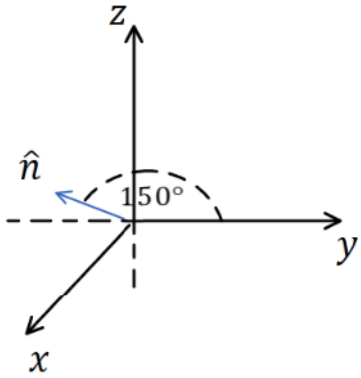
אילו מהווקטורים הבאים נמצא בזווית של $30°$ מציר y?

$$\vec{A}=\left(\frac{1}{3},\frac{1}{\sqrt{2}},\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \qquad \vec{B}=\left(\frac{1}{\sqrt{2}},\frac{1}{2},1\right) \qquad \vec{C}=\left(\frac{1}{\sqrt{2}},\sqrt{3},\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$$

5) היטל של A על 150 מעלות מציר y

נתון הווקטור: $\vec{A}=\hat{x}+\sqrt{3}\hat{y}+6\hat{z}$.

מהו ההיטל של הווקטור $\vec{A}$ על ציר $\hat{n}$ הנמצא במישור y-z וכיוונו החיובי מסובב בזווית של $150°$ מציר y נגד כיוון השעון?



6) שהסכום מאונך להפרש

הוכח- אם סכום של שני וקטורים מאונך להפרשם אזי אורכם שווה.

7) מציאת וקטור מאונך

נתונים 2 וקטורים: $\vec{A}(1,4,8)$, $\vec{B}(B_x,B_y,0)$.

מצא את מרכיבי וקטור B אם נתון כי הוא ניצב לוקטור A וגודלו 10.

תשובות סופיות:

1) א. $|A|=\sqrt{29}$ ב. $\hat{A}=\left(\frac{2}{\sqrt{29}},\frac{3}{\sqrt{29}},\frac{4}{\sqrt{29}}\right)$

2) א. $|\vec{B}|=\sqrt{50}$, $|\vec{A}|=\sqrt{126}$ ב. $\alpha=23°$

3) א. $\vec{C}=(4,10,12)$ ב. $|C|=\sqrt{260}$ ג. $\alpha=75.63$, $\beta=51.67$, $\gamma=41.90$

4) הווקטור C.

5) 1.5

6) שאלת הוכחה.

7) $\vec{B}=\left(-4\sqrt{\frac{100}{17}},\sqrt{\frac{100}{17}},0\right)$

מכפלה וקטורית בשלושה מימדים:

רקע:

שתי דרכים לביצוע המכפלה:

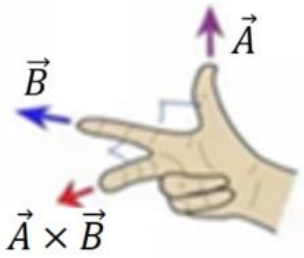
דרך 1 – דטרמיננטה:

$$\vec{A}\times\vec{B}=\begin{vmatrix}\hat{x} & \hat{y} & \hat{z}\\ A_x & A_y & A_z\\ B_x & B_y & B_z\end{vmatrix}$$

דרך 2 – לפי גודל וכיוון בנפרד:

גודל המכפלה - $|\vec{A}\times\vec{B}|=|\vec{A}||\vec{B}||\sin\alpha|$

כיוון לפי כלל יד ימין -



יש כמה דרכים לבצע את הכלל, אם מחליפים אצבעות לכל שלושת הוקטורים הכלל נשאר נכון (אם מחליפים מקום רק לשני וקטורים – טעות).

דרך נוספת לכלל יד ימין נקראת כלל הבורג

מסובבים את האצבעות מ- $\vec{A}$ ל- $\vec{B}$ והתוצאה בכיוון האגודל.

שאלות:

1) דוגמה - דטרמיננטה

נתונים הוקטורים הבאים:

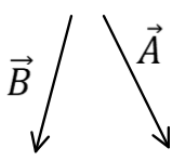
$\vec{A}(-1,2,-2)$, $\vec{B}(2,0,1)$

חשבו את $\vec{A}\times\vec{B}$.

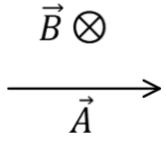
2) דוגמה - כלל יד ימין

מצאו את $\vec{A}\times\vec{B}$ במקרים הבאים:

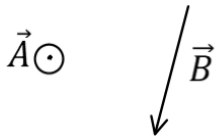
א.



ב.



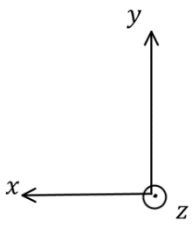
ג.



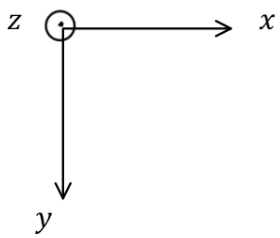
3) דוגמה - מערכות צירים

בדקו האם המערכות הבאות הן ימניות או שמאליות:

א.



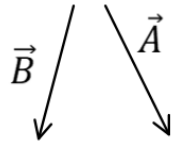
ב.



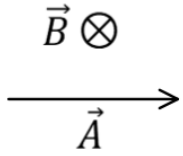
4) דוגמה - כלל הבורג

מצאו את $\vec{A}\times\vec{B}$ באמצעות כלל הבורג:

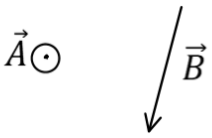
א. ג



ב. ע



ג.



5) מקבילון

נתונים הוקטורים הבאים: $\vec{a}=2\hat{x}-3\hat{y}+\hat{z}$, $\vec{b}=\hat{x}+2\hat{y}-\hat{z}$, $\vec{c}=2\hat{x}-\hat{y}$

מרכיבים מהוקטורים $\vec{a}$ ו- $\vec{b}$ מקבילית ובוחרים את ראשית הצירים בקודקוד המקבילית (הנח כל היחידות בס"מ).

א. מצאו את מיקומו של הקודקוד שמול הקודקוד שבראשית הצירים.

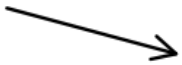
ב. מצאו את אורכי האלכסונים של המקבילית.

ג. מצאו את שטח המקבילית.

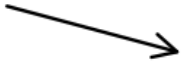
ד. יוצרים מקבילון על ידי הוספת הוקטור $\vec{c}$ למקבילית.
חשבו את גובה המקבילון המאונך למקבילית.
רמז: השתמש ב- $\left(\vec{a}\times\vec{b}\right)\cdot\vec{c}$.

תשובות סופיות:

1) $2\hat{x}-3\hat{y}-4\hat{z}$

2) א. לתוך הדף ב. למעלה ג. 

3) א. שמאלית ב. שמאלית

4) א. לתוך הדף ב. למעלה ג. 

5) א. $\vec{r}_1=(3,-1,0)$ ב. $|\vec{r}_1|=\sqrt{10}$, $|\vec{r}_2|=\sqrt{30}$ ג. $|\vec{a}\times\vec{b}|=\sqrt{59}\text{c.m}^2$

ד. $\tilde{h}=0.13\text{c.m}$

גרדיאנט ורוטור:

רקע:

גרדיאנט בקואורדינטות השונות:

גרדיאנט בקואורדינטות קרטזיות: $\vec{\nabla}f=\frac{\partial f}{\partial x}\hat{x}+\frac{\partial f}{\partial y}\hat{y}+\frac{\partial f}{\partial z}\hat{z}$.

גרדיאנט בקואורדינטות גליליות: $\vec{\nabla}f=\frac{\partial f}{\partial r}\hat{r}+\frac{1}{r}\frac{\partial f}{\partial \theta}\hat{\theta}+\frac{\partial f}{\partial z}\hat{z}$.

גרדיאנט בקואורדינטות כדוריות (*): $\vec{\nabla}f=\frac{\partial f}{\partial r}\hat{r}+\frac{1}{r\sin\varphi}\cdot\frac{\partial f}{\partial \theta}\hat{\theta}+\frac{1}{r}\frac{\partial f}{\partial \varphi}\hat{\varphi}$.

(*) שימו לב שהזווית φ היא עם ציר ה- z והזווית θ עם ציר x.

רוטור (Rot/Curl) בקואורדינטות השונות:

בקרטזיות:

$$\vec{\nabla}\times\vec{F}=\begin{vmatrix}\hat{x} & \hat{y} & \hat{z}\\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z}\\ F_x & F_y & F_z\end{vmatrix}=\left(\frac{\partial F_z}{\partial y}-\frac{\partial F_y}{\partial z}\right)\hat{x}-\left(\frac{\partial F_z}{\partial x}-\frac{\partial F_x}{\partial z}\right)\hat{y}+\left(\frac{\partial F_y}{\partial x}-\frac{\partial F_x}{\partial y}\right)\hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla}\times\vec{\mathrm{F}}=\left(\frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial \mathrm{F_z}}{\partial\theta}-\frac{\partial \mathrm{F_\theta}}{\partial \mathrm{z}}\right)\hat{\mathrm{r}}+\left(\frac{\partial \mathrm{F_r}}{\partial \mathrm{z}}-\frac{\partial \mathrm{F_z}}{\partial \mathrm{r}}\right)\hat{\theta}+\frac{1}{\mathrm{r}}\left(\frac{\partial(\mathrm{rF_\theta})}{\partial \mathrm{r}}-\frac{\partial \mathrm{F_r}}{\partial\theta}\right)\hat{\mathrm{z}}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla}\times\vec{\mathrm{F}}=\frac{1}{\mathrm{r}\sin\varphi}\left(\frac{\partial}{\partial\varphi}(\mathrm{F_\theta}\sin\varphi)-\frac{\partial \mathrm{F_\varphi}}{\partial\theta}\right)\hat{\mathrm{r}}+\frac{1}{\mathrm{r}}\left(\frac{\partial}{\partial \mathrm{r}}(\mathrm{rF_\varphi})-\frac{\partial \mathrm{F_r}}{\partial\varphi}\right)\hat{\theta}+\frac{1}{\mathrm{r}}\left(\frac{1}{\sin\varphi}\frac{\partial \mathrm{F_r}}{\partial\theta}-\frac{\partial}{\partial \mathrm{r}}(\mathrm{r}\cdot\mathrm{F_\theta})\right)\hat{\varphi}$$

(*) שימו לב שהזווית φ היא עם ציר ה- z והזווית θ עם ציר x.

שאלות:

1) חישוב גרדיאנט

נתונה פונקציית המיקום f : $f\left(\vec{r}\right)=f\left(x,y,z\right)=\dfrac{z}{\left(x^2+y^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}}$

חשב את הגרדיאנט של הפונקציה f.

2) חישוב השיפוע בכיוון השונה

חשב את גודל השיפוע של הפונקציה: $f\left(x,y\right)=2x^2y$ בנקודה $\left(1,2\right)$

בכיוון: $\hat{n}=\left(\dfrac{1}{\sqrt{2}},-\dfrac{1}{\sqrt{2}}\right)$.

תשובות סופיות:

1) $\vec{D}f=\dfrac{-xz\hat{x}-yz\hat{y}+\left(x^2+y^2\right)\hat{z}}{\left(x^2+y^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$

2) $\vec{\nabla}f\cdot\hat{n}=\dfrac{8}{\sqrt{2}}+-\dfrac{2}{\sqrt{2}}$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 3 - קינמטיקה

תוכן העניינים

1. תנועה בקו ישר (מימד אחד) 43
2. תנועה במישור וזריקה משופעת (בליסטיקה) 54
3. משוואת מסלול 58
4. תרגילים נוספים 59

תנועה בקו ישר (מימד אחד):

רקע:

הגדרות:

מהירות רגעית - $v_{(t)} = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$.

מהירות ממוצעת - $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}$

תאוצה רגעית - $a = \frac{dv}{dt} = \dot{v} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$

תאוצה ממוצעת - $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$

קשרים הפוכים:

$$x(t) = \int v(t)\,\mathrm{d}t$$

$$v(t) = \int a(t)\,\mathrm{d}t$$

את האינטגרל אפשר לעשות לא מסוים (בלי גבולות) ואז צריך להוסיף קבוע או מסוים (עם גבולות)

מיקום ומהירות כתלות בזמן בתאוצה קבועה:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2}at^2$$
$$v(t) = v_0 + at$$

שטח מתחת לגרף הפונקציה:
- השטח מתחת לגרף הפונקציה של המהירות (כתלות בזמן) שווה להעתק (כאשר שטח מתח לציר הזמן מחושב כשלילי, אם מחשבים אותו כחיובי אז מקבלים את הדרך)
- השטח מתחת לגרף של התאוצה (כתלות בזמן) הוא שינוי המהירות (שטח מתחת לציר הזמן מחושב כשלילי)

שאלות:

1) דני ודנה רצים זה לקראת זו

דני ודנה רצים זה לקראת זו.
שניהם מתחילים לרוץ ממנוחה.
דני רץ בתאוצה של 0.5 מטר לשנייה בריבוע ודנה בתאוצה של 1 מטר לשנייה בריבוע.
המרחק ההתחלתי ביניהם הוא 50 מטר.

א. מתי והיכן יפגשו דני ודנה?

ב. מה מהירות כל אחד מהם ברגע המפגש?

2) דני שכח את הפלאפון

דני רץ בקו ישר במהירות קבועה שגודלה 14 מטר לשנייה.
ברגע מסוים מבחין יוסי כי דני שכח את הפלאפון שלו.
באותו הרגע נמצא דני כבר במרחק של 64 מטר מיוסי.
יוסי מתחיל לרוץ אחר דני ממנוחה בתאוצה קבועה של 8 מטר לשנייה בריבוע.

א. מצא ביטוי למהירות כתלות בזמן עבור דני ויוסי.
שרטט גרפים עבור שני הביטויים שמצאת על אותה מערכת צירים.

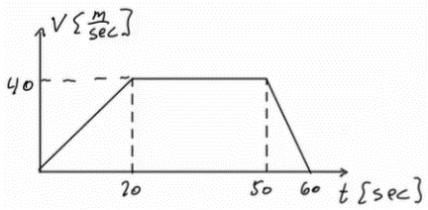
ב. מתי מהירותו של יוסי שווה לזו של דני? האם הוא משיג את דני ברגע זה?

ג. מצא ביטוי למיקום כתלות בזמן עבור דני ויוסי.
שרטט גרפים עבור שני הביטויים שמצאת על אותה מערכת צירים.

ד. מתי ישיג יוסי את דני? כמה מרחק עבר יוסי עד אז?

3) גרף של מהירות אופנוע בזמן

בגרף הבא נתונה מהירותו של אופנוע כתלות בזמן. האופנוע נע על קו ישר.
קבע את ראשית הצירים במיקום ההתחלתי של האופנוע.



א. תאר את סוג התנועה של האופנוע בכל אחד מקטעי התנועה.

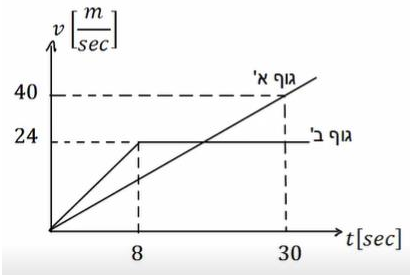
ב. מצא את תאוצת האופנוע כתלות בזמן.

ג. מהי מהירות האופנוע ברגעים: $t=15\ ,\ 40\ ,\ 55$?

ד. מצא את מיקום האופנוע באותם רגעים של סעיף ג'.

4) גרף מהירויות של שני גופים

בגרף הבא מתוארות המהירויות של שני גופים כתלות בזמן.
הנח ששני הגופים נעים לאורך קו ישר ויוצאים מהראשית.



א. תאר את תנועתו של כל גוף.

ב. רשום נוסחת מקום זמן לכל גוף.

ג. מצא את המרחק בין הגופים ברגעים: $t=3s\ ,\ 24s$ וציין מי מקדים את מי.

ד. מתי מהירויות שני הגופים שוות?

ה. מתי מיקום שני הגופים זהה?

5) תרגיל עם הכל

הגרף הבא מתאר את מהירותו של גוף הנע בקו ישר.
הנח שהגוף מתחיל את תנועתו מהראשית. הגוף נע במשך 10 שניות ונעצר.

א. תאר את התנועה של הגוף במילים.

ב. שרטט גרף של התאוצה כתלות בזמן של הגוף.

ג. מתי נמצא הגוף במרחק הגדול ביותר (בכיוון החיובי) מהראשית?
מהו מרחק זה?

ד. מהו המרחק הכולל שעבר הגוף?

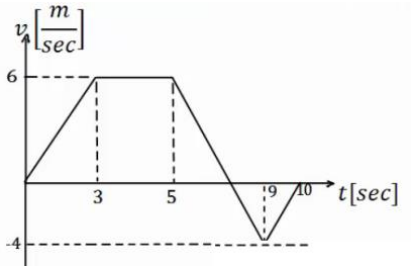
ה. מהו ההעתק הכולל שעשה הגוף?

ו. מהי המהירות הממוצעת של הגוף בתנועה?

ז. מהו מרחק הגוף מהראשית ב- $t=6\sec$?

ח. מתי נמצא הגוף במרחק 12 מטרים מהראשית?

ט. שרטט גרף של מיקומו של הגוף כתלות בזמן, אין צורך לסמן ערכים בציר האנכי של הגרף.



6) תפוח עץ

תפוח נופל מעץ בגובה 15 מטרים.
(הנח שהתפוח נופל ממנוחה והזנח את התנגדות האוויר).

א. מצא את המהירות בה יפגע התפוח בקרקע.

ב. מצא את המהירות בה יפגע התפוח בראשו של ניטון היושב מתחת לעץ.
הנח שגובה הראש של ניטון בישיבה הוא אחד מטר.

7) חסידה מביאה חבילה

חסידה מרחפת במנוחה באוויר ומפילה חבילה מגובה של 320 מטרים.

א. מצא את ההעתק שמבצעת החבילה בשנייה הרביעית של תנועתה.

ב. מצא את ההעתק שמבצעת החבילה בשנייה האחרונה של תנועתה.

8) דני זורק כדור מחלון גבוה

דני זורק כדור כלפי מעלה מחלון בביתו הנמצא בגובה 105 מטרים מעל הקרקע (בניין גבוה). מהירות הכדור ישר אחרי הזריקה היא 20 מטר לשנייה.
סמן את כיוון הציר החיובי כלפי מעלה ואת ראשית הצירים בנקודת הזריקה.

א. רשום נוסחאות מקום זמן ומהירות זמן עבור הכדור.

ב. הכן טבלה ורשום בטבלה את הערכים של המיקום והמהירות ב-6 השניות הראשונות.

ג. צייר את מיקום הכדור בכל שנייה ב-6 השניות.

ד. מתי יפגע הכדור בקרקע?

ה. חזור על סעיפים א' ו-ד' במקרה שבו ראשית הצירים בקרקע.

9) גוף נזרק אנכית מגג בניין

גוף נזרק אנכית כלפי מעלה מגג בניין שגובהו 40 מטר.
מהירותו ההתחלתית של הגוף היא 30 מטר לשנייה.
בחר ציר y שראשיתו בקרקע וכיוונו החיובי כלפי מעלה.

א. רשום את פונקציית המקום-זמן, מהירות-זמן ותאוצה-זמן של הגוף.

ב. ערוך טבלה של מהירותו ומיקומו בזמנים: $t=0\ ,\ 1\ ,\ 2\ ,\ 3\ ,\ 4\ ,\ 5\text{sec}$.

ג. שרטט גרפים עבור שלושת הפונקציות שחישבת בסעיף א'.

10) כדור נזרק מלמעלה וגוף נזרק מלמטה

כדור נזרק כלפי מטה מראש בניין שגובהו 80 מטר.
מהירותו ההתחלתית של הכדור היא 15 מטר לשנייה.
באותו הרגע נזרק גוף שני מתחתית הבניין כלפי מעלה.
מהירותו ההתחלתית של הגוף השני היא 40 מטר לשנייה.

א. רשום נוסחת מקום-זמן עבור כל גוף.

ב. האם הגוף השני יעבור את גובה הבניין?

ג. היכן ביחס לרצפת הבניין יחלפו הגופים אחד ליד השני?

ד. רשום נוסחת מהירות-זמן לכל גוף.

ה. מה תהיה מהירות כל גוף ברגע המפגש?

ו. מהי מהירות הפגיעה בקרקע של כל גוף?

ז. שרטט גרף מהירות-זמן וגרף מיקום זמן לכל גוף.

11) מהירות כנגזרת של פולינום

גוף נע בקו ישר ומיקומו כתלות בזמן נתון לפי: $x(t)=2t^3-12t+30$
כאשר הזמן בשניות והמיקום במטרים.

א. מצאו את המהירות כתלות בזמן.

ב. מתי הגוף נעצר?

12) תנועה בקו ישר, מהירות כנגזרת

מיקומו של גוף הנע בקו ישר נתון לפי: $x(t)=32te^{-t}$.

א. מצא את הזמן בו הגוף נעצר.

ב. מצא את מרחק הגוף ברגע זה מהראשית.

13) תנועה בקו ישר, מהירות כנגזרת ותאוצה

גוף נע בקו ישר ומיקומו כתלות בזמן נתון לפי: $x(t)=-2t^3+6t+3$
כאשר הזמן בשניות והמיקום במטרים.

א. מצאו את המהירות כתלות בזמן ואת הרגע בו הגוף נעצר.

ב. מהו המרחק המקסימאלי אליו הגיע הגוף?

ג. מהי תאוצת הגוף?

14) תאוצה מפוצלת

גוף נקודתי מתחיל לנוע ממנוחה ונע בקו ישר.

תאוצת הגוף תלויה בזמן ונתונה לפי: $a(t)=\begin{cases} t\left[\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}\right] & ,\ 0\le t\le 3[\text{sec}] \\ 5-t\left[\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}\right] & ,\ 3<t[\text{sec}] \end{cases}$.

תנועת הגוף נמשכת עד לרגע בו הוא עוצר.

א. מהי מהירות הגוף בזמן?

ב. מהי המהירות המרבית של הגוף במהלך התנועה?

ג. מתי עוצר הגוף?

ד. איזה מרחק (העתק) הוא עובר עד לעצירה?

15) מהירות מינימלית

גוף נע בקו ישר ומיקומו כתלות בזמן נתון לפי: $x(t)=\alpha t^3-\beta t^2+\gamma t$.

כל היחידות סטנדרטיות (מיקום במטר וזמן בשניות).

א. מהן היחידות של α , β , γ?

ב. מהו מיקום הגוף ב- $t=0$?

ג. מצאו את המהירות ההתחלתית של הגוף.

ד. מצאו מהי התאוצה ההתחלתית של הגוף.

ה. חשבו את המהירות המינימלית של הגוף כפונקציה של הקבועים בבעיה ומצאו מה התנאי שצריכים למלא הקבועים על מנת שאכן תהיה מהירות מינימלית.

16) ילד זורק כדור בקפיצה*

ילד מנסה לזרוק כדור לתקרה של הכיתה אך אינו מצליח להגיע עד לתקרה.
המורה לפיזיקה שהבחין בניסיונותיו של הילד הציע לו שיזרוק את הכדור תוך כדי קפיצה בכיוון מעלה.

א. האם המורה צודק? לאיזה גובה יגיע הכדור אם הילד קופץ ומיד זורק את הכדור כלפי מעלה? הניחו שמהירות הקפיצה של הילד היא v_1 ומהירות הזריקה של הכדור v_2 ביחס לילד היא אותו הדבר.
הניחו שזריקת הכדור לא משפיעה על הילד.

ב. בטאו את ההעתק של הילד ושל הכדור כפונקציה של הזמן בו הילד זורק את הכדור.

17) זמן מינימלי לסיים מסלול*

מכונית יכולה להאיץ מאפס ל-100 קמ״ש תוך 10 שניות, כאשר ניתן להניח שקצב ההאצה קבוע. אותה מכונית יכולה לבלום בקצב של 0.5g.
מהו הזמן המינימלי לעבור מסלול של 3 ק״מ אם המכונית מתחילה ממנוחה ומסיימת בעצירה מוחלטת? (רמז: השתמש בגרף מהירות זמן).

18) כמה זמן הרכבת נסעה במהירות קבועה*

רכבת יוצאת מיישוב א׳ אל יישוב ב׳.
בשליש הראשון של הדרך הרכבת מאיצה בתאוצה קבועה.
בשליש השני של הדרך הרכבת נוסעת במהירות קבועה.
בשליש האחרון של הדרך הרכבת מאטה בקצב קבוע עד לעצירתה ביישוב ב׳.
זמן הנסיעה הכולל הוא T.
כמה זמן נסעה הרכבת במהירות קבועה?

19) אדם משחרר כדור מתוך מעלית*

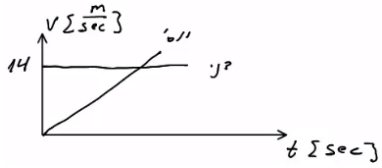
מעלית עולה מגובה הקרקע במהירות קבועה.
בזמן T_1, אדם הנמצא במעלית משחרר כדור מתוך המעלית דרך חור שברצפת המעלית.
הכדור מגיע לקרקע כעבור T_2 שניות.
מצאו את גובה המעלית h בזמן T_1.
נתונים T_1 ו- T_2.

תשובות סופיות:

1) א. הזמן: $t=8.16\sec$, המיקום: 16.65m.

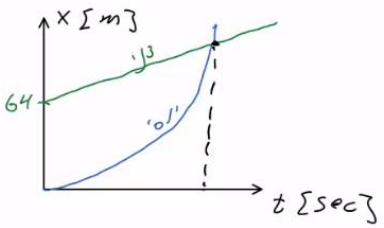
ב. $V_{Dani}\left(t=8.16\right)=4.08\frac{\text{m}}{\sec}$, $V_{Dana}\left(t=8.16\right)=-8.16\frac{\text{m}}{\sec}$

2) א. דני - $V\left(t\right)=14\frac{\text{m}}{\sec}$, יוסי - $V\left(t\right)=8t$. גרף:



ב. $t=1.75\sec$, לא.

ג. דני - $x\left(t\right)=64+14t$, יוסי - $x\left(t\right)=4t^2$. גרף:



ד. ב- $t=6.12$, המרחק: 149.82m.

3) א. כאשר $0\le t\le 20$ (חלק I), התאוצה חיובית וקבועה, והמיקום הולך וגדל.
כאשר $20\le t\le 50$ (חלק II), המהירות קבועה (אין תאוצה) והמיקום גדל.
כאשר $50\le t\le 60$ (חלק III), התאוצה קבועה ושלילית והמיקום הולך וגדל.

ב. $$a=\begin{cases}2\frac{\text{m}}{\sec^2} & 0<t<20\\ 0 & 20<t<50\\ -4\frac{\text{m}}{\sec^2} & 50<t<60\end{cases}$$

ג. $V\left(t=55\right)=20\frac{\text{m}}{\sec}$, $V\left(t=40\right)=40\frac{\text{m}}{\sec}$, $V\left(t=15\right)=30\frac{\text{m}}{\sec}$

ד. $x\left(t=55\right)=1,750\text{m}$, $x\left(t=40\right)=1,200\text{m}$, $x\left(t=15\right)=225\text{m}$

4) א. גוף א': תנועה בתאוצה קבועה, האצה. ההתקדמות בכיוון חיובי.
גוף ב': כאשר $0<t<8$, כמו גוף א'. כאשר $8\le t$,
תנועה במהירות קבועה בכיוון חיובי.

ב. גוף א': $\frac{2}{3}t^2$, גוף ב': כאשר $0\le t\le 8$, כמו גוף א'.

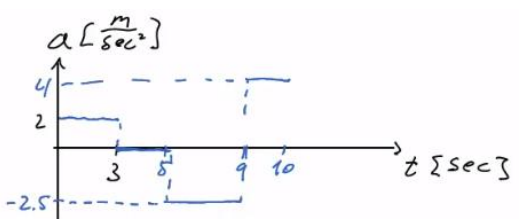
כאשר $8\le t\le\infty$, $x\left(t\right)=96+24\left(t-8\right)$.

ג. כש- $\Delta x\left(t=3\right)=7.5\text{m}$, וכש- $\Delta x\left(t=24\right)=96\text{m}$. גוף ב' מקדים את א'.

ד. $t=18\sec$ ה. כש- $t=31.42\sec$.

5) א. כאשר $0 \le t \le 3$ (חלק I), תאוצה קבועה, האצה והתקדמות בכיוון החיובי.
כאשר $3 \le t \le 5$ (חלק II), תנועה במהירות קבועה, התקדמות בכיוון החיובי.
כאשר $5 \le t \le 9$ (חלק III), תאוצה קבועה שלילית.
תאוצה עד אשר המהירות מתאפסת, ואז מתחילה האצה בכיוון הנגדי.
התקדמות בכיוון החיובי עד שהמהירות מתאפסת ואז מתחילים לחזור בכיוון הנגדי.
כאשר $9 \le t \le 10$, תאוצה קבועה חיובית, תאוטה. התקדמות בכיוון הנגדי.

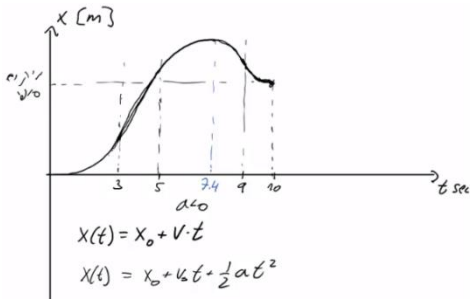
ב. $a=\begin{cases} 2\frac{\text{m}}{\text{sec}^2} & 0<t<3 \\ 0 & 3<t<5 \\ -2.5\frac{\text{m}}{\text{sec}^2} & 5<t<9 \\ 4\frac{\text{m}}{\text{sec}^2} & 9<t<10 \end{cases}$ גרף:



ג. בזמן 7.4sec, המרחק: 28.2m. ד. $S=33.4\text{m}$ ה. $\Delta x=23\text{m}$

ו. $\bar{V}=2.3\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ז. $\Delta x=x(t=6)25.75\text{m}$ ח. $t=3.5\text{sec}$

ט.



6) א. $17.32\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ב. $V_F \approx 16.73$

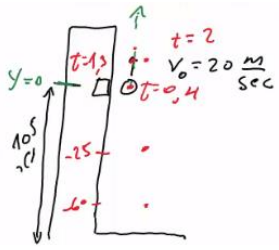
7) א. 80m ב. $40\frac{\text{m}}{\text{sec}}$

8) א. מקום-זמן: $y(t)=20t-5t^2$, $V(t)=20-10t$

ב.

זמן (שניות)	מיקום (מטר)	מהירות (מטר לשנייה)
1	15	10
2	20	0
3	15	-10
4	0	-20
5	-25	-30
6	-60	-40

ג. ד. 7sec



ה. (א) מקום-זמן: $y(t)=105+20t-5t^2$. מהירות-זמן: $V(t)=20-10t$.
(ד) 7sec

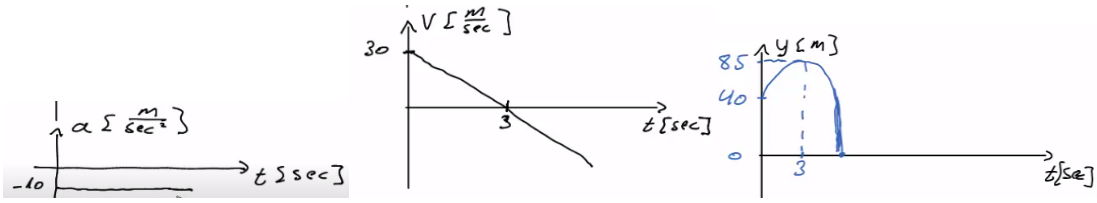
9) א. מקום-זמן: $y(t)=40+30t-5t^2$, מהירות-זמן: $v(t)=30-10t$,

תאוצה-זמן: $a=-10$

ב.

זמן (שניות)	מקום (מטר)	מהירות (מטר לשנייה)
0	40	30
1	65	20
2	80	10
3	85	0
4	80	-10
5	65	-20

ג. מקום-זמן: מהירות-זמן: תאוצה-זמן:



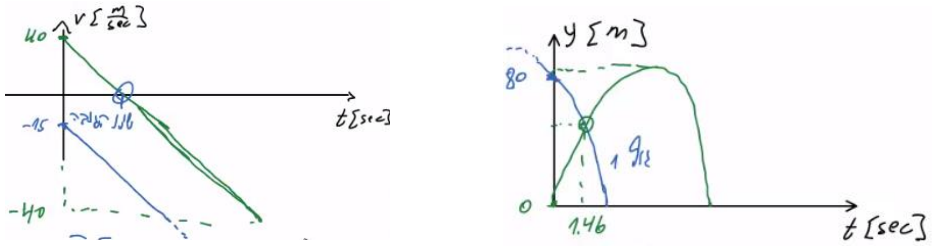
10) א. גוף 1 - כדור: $y_1(t)80+(-15)t-5t^2$, גוף 2 - ריבוע: $y_2(t)=40t-5t^2$.

ב. יגיע בדיוק לגובהו. ג. $47.74m$ ד. גוף 1: $v_1(t)-15-10t$,

גוף 2: $v_2(t)=40-10t$ ה. גוף 1: $-29.6\frac{m}{sec}$, גוף 2: $25.4\frac{m}{sec}$

ו. גוף 1: $-42.72\frac{m}{sec}$, גוף 2: $-40\frac{m}{sec}$.

ז. מיקום-זמן: (גוף 1 בכחול, גוף 2 בירוק) מהירות-זמן:



11) א. $v=6t^2-12$ ב. $t=\sqrt{2}\,sec$

12) א. $t=1sec$ ב. $x(t=1)=\frac{32}{e}$

13) א. $t=1sec$, $v(t)=-6t^2+6$ ב. $X\max=7m$ ג. $a=-12t$

14) א. $V(t)=\begin{cases}\frac{t^2}{2}\left(\frac{m}{sec}\right) & 0\le t\le 3\\ \left(5t-\frac{t^2}{2}-6\right)\left(\frac{m}{sec}\right) & 3\le t\end{cases}$ ב. $V_{max}=6.5\frac{m}{sec}$

ג. $t_2\approx 8.61$ ד. $\Delta x\approx 31.79m$

15) א. $[\gamma]=\frac{m}{sec}$, $[\beta]=\frac{m}{sec^2}$, $[\alpha]=\frac{m}{sec^3}$ ב. 0 ג. γ

ד. -2β ה. $\alpha>0$, $-\frac{\beta^2}{3\alpha}+\gamma$

16) א. $\frac{(v_1+v_2)^2}{2g}$ המורה צודק ב. ילד: $\frac{v_1^2}{2g}$, כדור: $\frac{(v_1+v_2)^2}{2g}-v_2t_0$

17) $T\approx 58sec$

18) $t_2=\frac{T}{5}$

19) $h=\frac{gT_2^2}{2\left(1+\frac{T_2}{T_1}\right)}$

תנועה במישור וזריקה משופעת:

רקע:

וקטור המיקום - $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$.

וקטור ההעתק - $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.

וקטור המהירות הממוצעת (velocity) - $\bar{\vec{v}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$.

וקטור המהירות הרגעית (velocity) - $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$.

וקטור התאוצה הממוצעת - $\bar{\vec{a}} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$.

וקטור התאוצה הרגעית - $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}$.

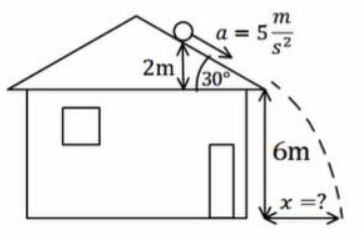
גודל המהירות (Speed) - $|\vec{v}| = \frac{dS}{dt}$, כאשר S זה הדרך.

שאלות:

1) דוגמה - דן יורה חץ על עץ

דן יורה חץ מגובה של 2 מטרים לעבר עץ הנמצא במרחק של 8 מטרים.
מהירות היציאה של החץ מהקשת היא 30 מטר לשנייה.
מצא באיזה גובה יפגע החץ בעץ אם הזווית שבה יורה דן את החץ היא 15 מעלות?

2) כדור מתגלגל מגג משופע



כדור מתגלגל מגג בניין משופע.
הכדור מתחיל תנועתו ממנוחה מגובה של 2 מטרים מקצה הגג.
שיפוע הגג הוא 30 מעלות מתחת לאופק.
נתון כי תאוצת הכדור בכיוון תנועתו על הגג היא 5 מטרים לשנייה בריבוע.
גובה קצה הגג מעל הקרקע הוא 6 מטרים.
מצא את המרחק האופקי מקצה הגג בו יפגע הכדור בקרקע.

3) תנועת כדור עם רוח נגדית

כדור נבעט מהקרקע במהירות של 20 מטרים לשנייה ובזווית של 45 מעלות מהקרקע.
רוח נגדית גורמת לכדור תאוצה בכיוון האופקי של 2 מטרים לשנייה בריבוע (בנוסף לתאוצת הכובד).

א. מצא את מיקום הכדור ומהירותו ב- $t = 2\sec$.
ב. מהו המרחק בו פוגע הכדור בקרקע?
ג. מהו הגובה המקסימאלי אליו הגיע הכדור?
ד. מהו המרחק האופקי המקסימאלי אליו הגיע הכדור?

4) מסירה בפוטבול

במשחק הפוטבול הרכז האחורי זורק כדור בזווית של 45 מעלות ביחס לקרקע ובמהירות של 30 מטרים לשנייה. שחקן הקבוצה הנמצא 15 מטרים קדימה מהרכז האחורי רץ במהירות של 5 מטרים לשנייה. השחקן רואה את הכדור ומתחיל להאיץ בתאוצה קבועה.
מהי התאוצה הדרושה לשחקן כך שיוכל לתפוס את הכדור בדיוק בגובה בו הוא נזרק?
האם סימן התאוצה יכול להיות שלילי?
מה המשמעות של תאוצה זו?

5) דוגמה מהירות ממוצעת

מיקומו של גוף כתלות בזמן הוא: $\vec{r}(t)=3t^2x+(2t+1)y$.

מצא את המהירות הממוצעת ב-5 השניות הראשונות של התנועה.

6) דוגמה - מהירות רגעית

מיקומו של גוף כתלות בזמן הוא: $\vec{r}(t)=3t^3x+(4t-5)y$.

א. מצא את מהירות הגוף כתלות בזמן.

ב. מהי מהירות הגוף ב-$t=2$?

7) דוגמה - תאוצה

מהירותו של גוף כתלות בזמן היא: $\vec{v}(t)=2t^3x+(6t-5)y$.

א. מצא את תאוצת הגוף כתלות בזמן.

ב. מהי התאוצה הממוצעת בחמש השניות הראשונות של התנועה?

8) דרך והעתק

מיקומו של גוף לפי הזמן נתון לפי: $\vec{r}(t)=2t^3x+(t^3-2)y$.

א. מצא את המהירות הרגעית (velocity) והתאוצה הרגעית כפונקציה של הזמן.

ב. מצא את גודל המהירות (speed) כתלות בזמן.

ג. מצא את הדרך שעשה הגוף בחמש השניות הראשונות.

ד. מצא את המהירות הממוצעת (average velocity) ב-5 השניות הראשונות של התנועה.

ה. מצא את ה-speed הממוצע של הגוף בחמש השניות הראשונות.

תשובות סופיות:

1) 3.78m

2) 4.49m

3) א. $x=24.28\text{m}\ ,\ y=8.28\text{m}\ ,\ \mathrm{V}_x=10.14\frac{\text{m}}{\text{sec}}\ ,\ \mathrm{V}_y=-5.86\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ב. 32.01m

ג. 10m ד. $x_{\max}=32.01$

4) $a=5.99\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$, יכול לצאת שלילי, המשמעות שהשחקן צריך להאט בשביל להגיע לנקודה הזאת בדיוק יחד עם הכדור.

5) $\vec{\mathrm{V}}=(15,2)$

6) א. $\vec{\mathrm{V}}=9t^2\hat{x}+4\hat{y}$ ב. $\vec{\mathrm{V}}(t=2)=(36,4)$

7) א. $\vec{a}(t)=6t^2\hat{x}+6\hat{y}$ ב. $\vec{a}=50\hat{x}+6\hat{y}$

8) א. $\vec{\mathrm{V}}_{(t)}=6t^2\hat{x}+3t^2\hat{y}$ ב. $\left|\vec{\mathrm{V}}\right|=\sqrt{45}t^2$ ג. $S\approx 279.5\text{m}$

ד. $\vec{\mathrm{V}}=50\hat{x}+25\hat{y}$ ה. $\left|\vec{\mathrm{V}}\right|\approx 55.9\frac{\text{m}}{\text{sec}}$

משוואת מסלול:

רקע:

משוואת מסלול היא פונקציה מהצורה $y(x)$, סרטוט של הפונקציה הוא המסלול של הגוף במישור. ניתן למצא את המשוואה באמצעות בידוד משתנה הזמן מהפונקציה x(t) והצבה ב y(t).

שאלות:

1) דוגמה-משוואת מסלול

מצא את משוואת המסלול ושרטט את המסלול על מערכת צירים עבור המסלול הבא: $y(t)=\sqrt{7-t^2}$, $x(t)=\sqrt{3+t^2}$.

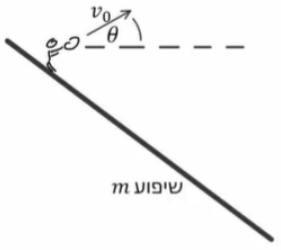
הנח ש- x ו- y תמיד חיוביים.

2) זריקה משופעת על מישור משופע

איתי עומד על מישור משופע בעל שיפוע m , איתי זורק כדור לכיוון מורד המישור במהירות התחלתית v_0 ובזווית θ ביחס לאופק.

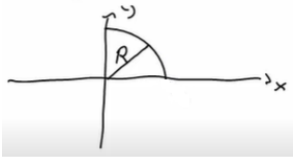
א. מצא מה המרחק מאיתי שבו יפגע הכדור? (התעלם מהגובה של איתי).

ב. מהי הזווית θ עבורה מרחק זה יהיה מקסימאלי?



תשובות סופיות:

1) $y(x)=\sqrt{10-x^2}$



א. $x=\frac{2v_0^2\cos^2\theta(\tan\theta+m)}{g}$ ב. $\tan 2\theta=\frac{1}{m}$

תרגילים נוספים:

שאלות:

1) גודל מהירות מינימלי

וקטור המיקום של גוף מסוים כתלות בזמן נתון על ידי: $\vec{r}(t)=2t^2\hat{i}-6j+(t-5)^2k$.

א. מהו וקטור המהירות של הגוף כתלות בזמן?

ב. מהו וקטור התאוצה של הגוף כתלות בזמן?

ג. מתי גודל מהירות הגוף מינימלי?

ד. מהו וקטור המיקום כאשר גודל מהירותו הוא: $\sqrt{160}\,\frac{\text{m}}{\text{sec}}$?

2) וקטורים בזריקה משופעת

גוף נזרק מראשית הצירים במהירות התחלתית v_0 ובזווית θ ביחס לציר ה-x.

א. מצאו את וקטור המיקום של הגוף כתלות בזמן.

ב. מצאו את וקטור המהירות והתאוצה של הגוף כתלות בזמן.

ג. חשבו את הזווית בין וקטור המהירות לוקטור התאוצה כתלות בזמן.

3) וקטור מיקום ומסלול

וקטור המיקום של גוף הנע במישור xy נתון לפי: $\hat{r}(t)=A\sin(\omega t)\hat{x}+B\cos(\omega t)\hat{y}$.

א. מצאו את וקטור המהירות והתאוצה של הגוף.

ב. חשבו את הזווית בין וקטור המהירות לוקטור התאוצה ב-$t=0$.

ג. הראו שוקטור התאוצה ווקטור המיקום הפוכים בכיוון.

ד. מצאו את מסלול התנועה של הגוף, כלומר את $y(x)$.

4) וקטור מיקום ומסלול עם זמן בריבוע

וקטור המיקום של גוף הנע במישור $x-y$ נתון לפי: $\vec{r}(t)=A\sin(\alpha t^2)\hat{x}+B\cos(\alpha t^2)\hat{y}$.

א. מצאו את וקטור המהירות והתאוצה של הגוף.

ב. מצאו את מסלול התנועה של הגוף, כלומר את $y(x)$.

ג. מה ההבדל בין המסלול בתרגיל זה לבין המסלול בתרגיל הקודם?

5) רובין הוד יורה ותופס חץ

רובין הוד יורה חץ במהירות v_0 וזווית θ ביחס לקרקע.

ברגע שחרור החץ מתחיל רובין הוד לרוץ בקו ישר ובתאוצה $a(t)=Ae^{-kt}$.

רובין הוד רוצה לתפוס את החץ ברגע פגיעתו בקרקע.

מצאו משוואה עם הפרמטרים A , θ , v_0 והמשתנה k ממנה ניתן לחלץ את k כך שרובין יצליח לתפוס את החץ. אין צורך לפתור את המשוואה.

6) תנועה במעגל*

גוף נקודתי נע במישור אופקי xy.

בזמן $t=0$ מהירות הגוף הייתה: $\vec{v}(0)=15\pi\hat{i}\ \frac{m}{sec}$ יחד עם וקטור המצב: $\vec{r}(0)=5\hat{J}m$.

תאוצת הגוף כפונקציית זמן החל מרגע זה היא:

$\vec{a}(t)=-45\pi^2\sin(3\pi t)\hat{i}-45\pi^2\cos(3\pi t)\hat{J}\ \frac{m}{sec^2}$.

א. מצא את וקטור המהירות של הגוף בזמן.

ב. מצא את וקטור המצב של הגוף בזמן.

ג. מצא את הזווית בין וקטור המצב לוקטור התאוצה בזמן.

ד. מצא את משוואת המסלול של הגוף.

7) תנועה על אליפסה*

מיקום של גוף נקודתי נתון במשוואה: $\vec{r}=4\sin(\pi t)\hat{i}+3\cos(\pi t)\hat{J}$.

(המיקום במטרים, הזמן בשניות).

א. מצא את משוואת המסלול של הגוף.

ב. מצא את רגעי הזמן שבהם המהירות ורדיוס הוקטור מאונכים.

ג. מצא את תאוצת התנועה והראה שהיא מכוונת כלי ראשית הצירים.

ד. מצא באיזה רגעי זמן גודל התאוצה הוא: $\frac{v^2}{r}$.

ה. חשבו את המרחק המינימלי של הגוף מראשית הצירים.

כמה פעמים, במשך מחזור תנועה אחד, מגיע הגוף למרחק מינימלי מהראשית?

8) מהירות לפי גזירה תרגיל פשוט

נתון וקטור r של חלקיק מסוים: $\vec{r}=\left(8t,-5t^2\right)$.

א. מהו רכיב ה-x של הווקטור בזמן?

ב. מהו רכיב ה-y של הווקטור בזמן?

ג. מהי מהירותו בציר x?

ד. מהי מהירותו בציר y?

ה. האם מהירויות אלו קבועות בזמן?

ו. מהו מרחק החלקיק מהראשית לאחר שעברו 3 שניות?

9) גזירת מיקום למציאת מהירות

מיקומו של חלקיק נתון ע"י הווקטור r: $\vec{r}=5\sin\left(\pi t\right)\ ,\ 4t^3+t^2\ ,\ 8e^t$.

א. מצאו את ווקטור המהירות כפונקציה של הזמן.

ב. מהי מהירות החלקיק ב-$t=2$?

10) העתק לפי גזירה

וקטור r מתאר מיקומו של חלקיק בזמן: $\vec{r}=\left(5t,10+t^2\right)$.

א. מהו מיקום החלקיק בזמן $t=0$?

ב. מהו מיקום החלקיק בזמן $t=5$?

ג. מהו ההעתק בחמש השניות הראשונות?

ד. מהי מהירות החלקיק בזמן $t=5$ (בהצגת גודל וכיוון)?

תשובות סופיות:

1) א. $\vec{v}=\dot{\vec{r}}=4t\hat{i}+2(t-5)\hat{k}$ ב. $\vec{a}=\dot{\vec{v}}=4\hat{i}+2\hat{k}$ ג. $t_{\min}=1\sec$

ד. $\vec{r}(t_1)=18\hat{i}-6\hat{J}+4\hat{k}$

2) א. $\vec{r}(t)=v_0\cos\theta\cdot t\hat{x}+(v_0\sin\theta\cdot t-5t^2)\hat{y}$ ב. $\vec{v}=v_0\cos\theta\hat{x}+(v_0\sin\theta-10t)\hat{y}$

ג. $\cos\alpha=\dfrac{10t-v_0\sin\theta}{\sqrt{(v_0\cos\theta)^2+(v_0\sin\theta-10t)^2}}$

3) א. $\vec{v}=\omega A\cos(\omega t)\hat{x}-\omega B\sin(\omega t)\hat{y}$, $\vec{a}=-\omega^2 A\sin(\omega t)\hat{x}-\omega^2 B\cos(\omega t)\hat{y}$

ב. $90°$ ג. הוכחה. ד. $\left(\dfrac{y}{B}\right)^2+\left(\dfrac{x}{A}\right)^2=1$

4) א. $\vec{v}=A\cos(\alpha t^2)2\alpha t\cdot\hat{x}-B\sin(\alpha t^2)(2\alpha t)\hat{y}$,

$$\vec{a}=\left[-A\sin(\alpha t^2)(2\alpha t)^2+2\alpha A\cos(\alpha t^2)\right]\hat{x}-\left[B\cos(\alpha t^2)(2\alpha t)^2+2\alpha B\sin(\alpha t^2)\right]\hat{y}$$

ב. $\left(\dfrac{y}{B}\right)^2+\left(\dfrac{x}{A}\right)^2=1$ ג. אין הבדל

5) $\dfrac{v_0^2\sin 2\theta}{g}=\dfrac{A}{k}\dfrac{2v_0\sin\theta}{g}+\dfrac{A}{k^2}\left(e^{-k\frac{2v_0\sin\theta}{g}}-1\right)$

6) א. $\vec{v}(t=0)=15\pi\cos(3\pi t)\hat{i}-15\pi\sin(3\pi t)\hat{J}$ ב. $\vec{r}(t)=5\sin(3\pi t)\hat{i}+5\cos(3\pi t)\hat{J}$

ג. $\alpha=180°$ ד. $x^2+y^2=25$

7) א. $\left(\dfrac{x}{4}\right)^2+\left(\dfrac{y}{3}\right)^2=1$ ב. $t_1=0$, $t_2=1$, $t_3=\dfrac{1}{2}$, $t_4=\dfrac{3}{2}$

ג. $\vec{a}=\dot{\vec{v}}=-4\pi^2\sin(\pi t)\hat{i}-3\pi^2\cos(\pi t)\hat{J}$

ד. $t_1=\dfrac{1}{4}\sec$, $t_2=\dfrac{5}{4}\sec$, $t_3=\dfrac{3}{4}\sec$, $t_4=\dfrac{7}{4}\sec$ ה. $|\vec{r}|(t=1)=3$, פעמיים.

8) א. $r_x=8t$ ב. $r_y=-5t^2$ ג. $v_x=\dot{r}_x=8$ ד. $v_y=\dot{r}_y=-10t$

ה. המהירות על x קבועה בזמן, המהירות על y לא קבועה בזמן.

ו. $|r_{t=3}|=\sqrt{2601}$

9) א. $\vec{v}=\dot{\vec{r}}5\pi\cos(\pi t)$, $12t^2+2t$, $8e^t$

ב. $\vec{v}_{t=2}=5\pi\cos(2\pi)$, 4.2^3+2^2 , $8e^2=5\pi$, 36 , $8e^2$

10) א. $\vec{r}_{t=0}=(0,10)$ ב. $\vec{r}_{t=5}=(25,35)$ ג. $|\vec{r}_{t=5}-\vec{r}_{t=0}|=\sqrt{1250}$

ד. $|v_{(t=5)}|=\sqrt{125}$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 4 - דינמיקה

תוכן העניינים

1. חוקי ניוטון 63
2. גלגלות נעות ומכפלי כוח 73
3. תרגילים נוספים 74

חוקי ניוטון:

רקע:

כוחות נפוצים:

כוח הכובד

סימון : W (קיצור של Weight).
מופעל ע"י כדור הארץ.
כיוון : למרכז כדור הארץ (או לכיוון האדמה).
גודל : mg.

נורמל

סימון : N.
מופעל ע"י משטח.
כיוון : תמיד מאונך למשטח ודוחף (מהמשטח כלפי חוץ).
גודל : לא ידוע, תלוי בבעיה (לא שווה ל-mg).

מתיחות

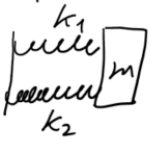
מופעל על ידי חוט או חבל.
סימון : T (קיצור של Tension).
כיוון : תמיד מושך את הגוף לכיוון החוט.
הערה, חוט תמיד מושך משני צדדיו.
חוט אידיאלי – חוט חסר מסה שאינו משנה את אורכו (לא אלסטי).
בחוט אידיאלי המתיחות אחידה לאורך החוט.

החיכוך:

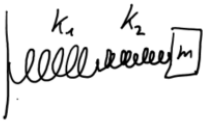
חיכוך סטטי

סימון - f_s

חיבור במקביל



חיבור בטור



פועל כאשר אין תנועה יחסית בין המשטחים.
מופעל ע"י המשטח.
כיוון : משיק למשטח (נגד כיוון השאיפה לתנועה).

$f_s \le \mu_s N$ או $f_{s\max} = \mu_s N$

μ_s - מקדם חיכוך סטטי (תלוי בחומר וקבוע).

N - הנורמל שמפעיל המשטח.

שימו לב ש $f_s = \mu_s N$ רק אם הגוף על סף החלקה! (בכל מקרה אחר החיכוך אינו ידוע , בדר"כ אפשר למצוא אותו ממשוואת הכוחות)

חיכוך קינטי:

סימון- f_k
פועל כאשר יש תנועה יחסית בין המשטחים.
מופעל ע"י משטח.
כיוון: משיק למשטח (נגד כיוון התנועה היחסית).
גודל: $f_k = \mu_k N$.

μ_k - מקדם החיכוך הקינטי – תלוי בסוגי החומרים. בד"כ קבוע.
N - הנורמל שמפעיל המשטח.

חוק ראשון של ניוטון – התמדה:

אם גוף נע בקו ישר ובמהירות קבועה (בהתמדה) סכום הכוחות עליו שווה לאפס.
מקרה פרטי של תנועה במהירות קבועה הוא מנוחה. לכן, אם גוף נמצא במנוחה סכום הכוחות עליו הוא אפס.

חוק שלישי – עקרון פעולה תגובה:

לכל כוח שגוף A מפעיל על גוף B יש כוח תגובה שגוף B מפעיל חזרה על גוף A.
כוח התגובה שווה בגודלו והפוך בכיוונו.
שימו לב: הכוחות פועלים על גופים שונים ולכן אף פעם לא יופיעו באותו תרשים כוחות.

חוק שני של ניוטון:

$\sum \vec{F} = m\vec{a}$.

בפועל רושמים את הנוסחה לכל ציר בנפרד.

חוק הוק – הכוח של קפיץ:

חיבור במקביל חיבור בטור

$F = -k\Delta x$.

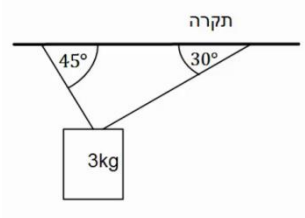
$\Delta x = x - x_0$

x - מיקום הגוף.
x_0 - מיקום שבו הקפיץ רפוי.

חיבור קפיצים במקביל (שני הקפיצים מחוברים לגוף ולקיר) - $k_{eff} = k_1 + k_2$.
חיבור קפיצים בטור (גוף מחובר לקפיץ אחד שמחובר לקפיץ שני שמחובר לקיר) - $\frac{1}{k_{eff}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$.

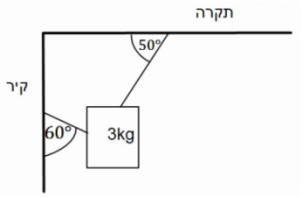
שאלות:

1) דוגמה-גוף תלוי מהתקרה



גוף תלוי במנוחה מהתקרה באמצעות שני חוטים, לפי האיור הבא.
מהי המתיחות בכל חוט אם מסת הגוף היא 3 ק"ג?

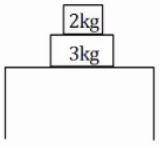
2) דוגמה-גוף תלוי מהתקרה ומהקיר



גוף תלוי במנוחה מהתקרה באמצעות חוט ומחובר לקיר המאונך לתקרה באמצעות חוט נוסף (הסתכל באיור).
מהי המתיחות בכל חוט אם מסת הגוף היא 3 ק"ג?

3) דוגמה-מסה על מסה

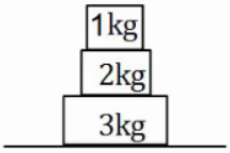
במערכת הבאה ישנה מסה של 3 ק"ג הנמצאת במנוחה על שולחן.
על המסה מונחת מסה נוספת של 2 ק"ג.



א. שרטט תרשים כוחות לכל אחת מהמסות.
ב. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על המסה העליונה.
ג. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על המסה התחתונה.
ד. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על השולחן.

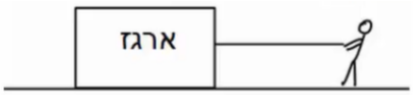
4) דוגמה-מסה על מסה על מסה

שלוש מסות מונחות אחת על גבי השנייה ועל הקרקע במנוחה, כפי שנראה בציור.



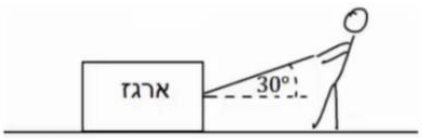
א. מהו גודלו וכיוונו של הכוח שמפעילה המסה הכי תחתונה על המסה מעליה?
ב. מהו גודלו וכיוונו של הכוח שמפעילה הרצפה על המסה הכי תחתונה?

5) דוגמה-דני מושך במקביל לקרקע



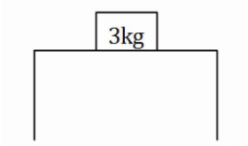
דני מושך ארגז במקביל לקרקע. ידוע כי מסת הארגז היא 20 ק"ג ומקדם החיכוך הקינטי בין הארגז לקרקע הוא: $\mu_k = 0.2$.
מצא מהו גודלו של הכוח שמפעיל דני, אם הארגז נע במהירות קבועה?

6) ירון מושך בזווית



ירון מושך ארגז באמצעות חבל הנמתח בזווית של 30 מעלות ביחס לקרקע.
ידוע כי מסת הארגז היא 20 ק"ג, ומקדם החיכוך הקינטי בין הארגז לקרקע הוא: $\mu_k = 0.2$.
מצא מהו גודלו של הכוח שמפעיל ירון, אם הארגז נע במהירות קבועה?

7) גוף על שולחן



גוף בעל מסה של 3 ק"ג נמצא במנוחה על שולחן.
מקדם החיכוך הסטטי הוא: $\mu_s = 0.4$.

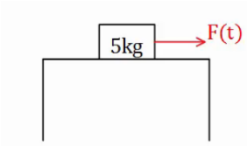
א. מהו הכוח המקסימלי הניתן להפעיל על הגוף, כך שישאר במנוחה?

כוח אופקי בגודל 10 ניוטון פועל על הגוף ימינה.

ב. מצא את גודלו וכיוונו של החיכוך הסטטי.

8) כוח תלוי בזמן

גוף בעל מסה של 5 ק"ג נמצא במנוחה על שולחן.
כוח אופקי התלוי בזמן $F(t) = 2 \cdot t^2$ פועל על הגוף ימינה.
מקדם החיכוך הסטטי הוא: $\mu_s = 0.3$.

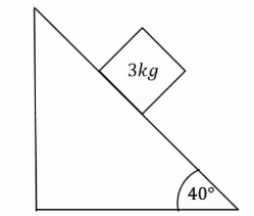


א. מהו הכוח המקסימלי הניתן להפעיל על הגוף, כך שישאר במנוחה?

ב. מתי יתחיל הגוף בתנועה?

ג. שרטט גרף של החיכוך הסטטי כתלות בזמן.

9) מסה בשיפוע

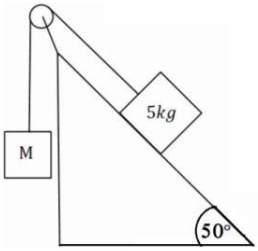


מסה של 3 ק"ג נמצאת במנוחה על מישור משופע בעל זווית של 40 מעלות.
בין המסה למדרון קיים חיכוך,
ומקדם החיכוך הסטטי הוא: $\mu_s = 0.9$.

א. שרטט תרשים כוחות לבעיה.

ב. מצא את גודלם של הכוח הנורמלי והחיכוך.

10) מסה בשיפוע ומסה באוויר

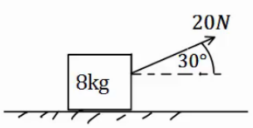


מסה של 5 ק"ג מונחת על מישור משופע בעל זווית של 50 מעלות. המסה מחוברת באמצעות חוט אידיאלי ודרך גלגלת אידיאלית למסה נוספת M התלויה באוויר מצידו השני של המישור.

א. מצא את גודלה של המסה M, על מנת שהמערכת תשאר במנוחה כאשר אין חיכוך בבעיה.
כעת נתון שבין המסה למדרון קיים חיכוך, ומקדם החיכוך הסטטי הוא: $\mu_s = 0.3$.

ב. מצא מה הוא גודלה המקסימלי והמינימלי האפשרי של M, על מנת שהמערכת תשאר במנוחה.

11) דוגמה-כוח בזווית 30 מעלות



כוח של 20 ניוטון פועל בזווית של 30 מעלות מעל האופק.
הכוח מופעל על ארגז בעל מסה של 8 ק"ג.
הארגז נמצא במנוחה ונתון כי בין הארגז לרצפה קיים חיכוך.
מקדמי החיכוך הסטטי והקינטי הם: $\mu_k = 0.1$, $\mu_s = 0.2$.

א. בדוק האם הארגז נשאר במנוחה או מתחיל נוע?

ב. כמה זמן ייקח להזיז את הארגז למרחק של 30 מטרים באמצעות כוח זה?

ג. חזור על הסעיפים אם הכוח היה בזווית של 70 מעלות.

12) דוגמה-מרחק עצירה

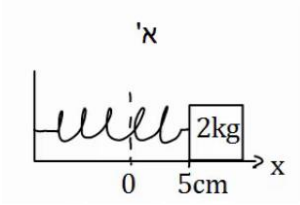
דני נוסע במכוניתו במהירות של 54 קמ"ש, ולפתע הוא מבחין כי רמזור הנמצא 50 מטרים לפניו הופך לאדום. דני לוחץ על הבלמים ומתחיל בעצירה.
מקדם החיכוך הקינטי בין הגלגלים לרצפה הוא: $\mu_k = 0.3$.
הנח שהגלגלים ננעלים ואין למכונית מערכת ABS.

א. האם דני יספיק לעצור לפני הרמזור?

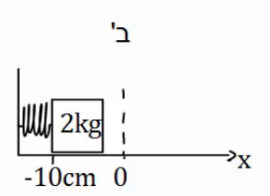
ב. בדוק שוב האם דני יספיק לעצור, אך הפעם הוסף זמן תגובה של שנייה אחת (הזמן מהרגע שבו דני מבחין באור עד אשר הוא לוחץ על הבלמים).

13) דוגמה 1-קפיץ

גוף בעל מסה של 2 ק"ג מחובר לקפיץ בעל קבוע קפיץ $k = 50\frac{N}{m}$. בין הגוף למשטח אין חיכוך.



א. מושכים את הגוף למרחק 5 ס"מ מהנקודה בה הקפיץ רפוי ומשחררים אותו.
מהי תאוצת הגוף (גודל וכיוון)?

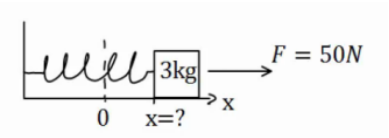


ב. דוחפים את הגוף למרחק 10 ס"מ מהנקודה בה הקפיץ רפוי ומשחררים אותו.
מהי תאוצת הגוף (גודל וכיוון)?
כעת נתון כי בין הגוף למשטח קיים חיכוך, ומקדם החיכוך הסטטי הוא: $\mu_s = 0.2$.

ג. מהו המרחק המקסימלי בו ניתן להניח את הגוף קשור לקפיץ כך שיישאר במנוחה?

14) דוגמה 2-קפיץ

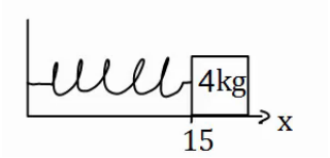
גוף בעל מסה של 3 ק"ג מחובר לקפיץ בעל קבוע קפיץ $k = 100\frac{N}{m}$. בין הגוף למשטח אין חיכוך.



על הגוף פועל כוח ימינה שגודלו 50 ניוטון.
קבע את ראשית הצירים בנקודת הרפיון של הקפיץ.
היכן נמצאת נקודת שיווי המשקל (הנקודה בה סכום הכוחות שווה לאפס)?

15) דוגמה 3-קפיץ

גוף בעל מסה של 4 ק"ג מחובר לקיר באמצעות קפיץ בעל קבוע קפיץ $k = 50\frac{N}{m}$. בין הגוף למשטח אין חיכוך.



אורכו הרפוי של הקפיץ הוא 10 ס"מ.

א. חשב את הכוח שמפעיל הקפיץ על הגוף כאשר הגוף במרחק 15 ס"מ מהקיר.

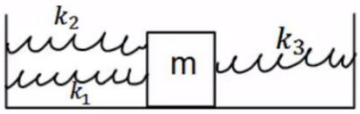
ב. חשב את הכוח שמפעיל הקפיץ על הגוף כאשר הגוף במרחק 6 ס"מ מהקיר.

ג. חשב את תאוצת הגוף בכל נקודה אם על הגוף פועל כוח שגודלו 10 ניוטון שמאלה.

16) מסה עם שלושה קפיצים

שלושה קפיצים מחוברים למסה $m=2kg$, כפי שנראה באיור.

אין חיכוך בין המסה לרצפה.



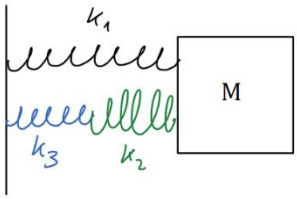
נתון כי: $k_1=3\frac{N}{m}$, $k_2=5\frac{N}{m}$, $k_3=12\frac{N}{m}$.

הנח כי כל הקפיצים רפויים באותה הנקודה.

מהי תאוצת המסה כאשר היא נמצאת במרחק 20 ס"מ מנקודת שיווי המשקל?

17) שלושה קפיצים שוב

באיור הבא, המסה $m=4kg$ מחוברת לשלושה קפיצים בעלי קבועי קפיץ שונים. הנח שכל הקפיצים רפויים כאשר המסה נמצאת ב- $x=0$.



מהי תאוצת המסה, כאשר מיקומה הוא: $x=0.2m$,

אם קבועי הקפיצים הם: $k_1=3\frac{N}{m}$, $k_2=5\frac{N}{m}$, $k_3=12\frac{N}{m}$?

18) כוח אופקי תלוי בזמן

כוח אופקי שגודלו $F=2t$ פועל על גוף, כאשר הזמן t נתון בשניות והכוח F בניוטונים.

מסת הגוף $2kg$ והוא נמצא במנוחה על משטח אופקי.

מקדמי החיכוך בין הגוף למשטח: $\mu_k=0.15$, $\mu_s=0.2$. מצא\י את:

א. זמן תחילת התנועה.

ב. כוח החיכוך בזמן $t=0.5\sec$.

ג. תאוצת הגוף כפונקציה של זמן.

ד. מהירות הגוף לאחר 4 שניות.

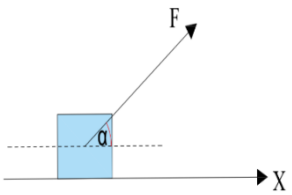
ה. מיקום הגוף לאחר 4 שניות.

19) כוח בזווית תלוי בזמן

הגוף שבציור מונח על הרצפה, בזמן $t=0$ מתחיל לפעול על הגוף כוח שגודלו $F=2t$ הזמן בשניות והכוח בניוטונים.

הכוח פועל בזווית $\alpha=37°$ יחסית לציר התנועה.

מסת הגוף היא $2kg$.



נתון כי מקדם החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף והרצפה הוא: $\mu=0.2$.

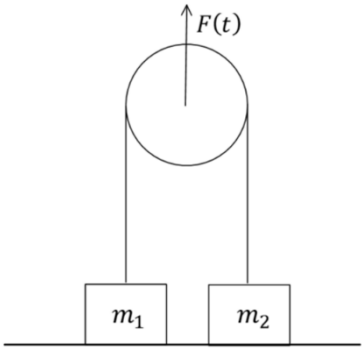
לפשטות החישוב קחו: $\sin\alpha=0.6$, $cos\alpha=0.8$, $g=10\frac{m}{sec^2}$.

א. מתי יתחיל הגוף לנוע?

ב. מהי מהירות הגוף לאחר 4 שניות?

ג. מה המרחק שהתקדם הגוף עד לניתוקו מהקרקע?

20) מכונת אטווד נמשכת בכוח תלוי בזמן



מכונת אטווד מורכבת מגלגלת וחוטים אידיאליים ושתי מסות המחוברות משני צידי הגלגלת(ראו איור) . ב $t = 0$ שתי המסות מונחות על הקרקע ומתחיל לפעול כוח התלוי בזמן $F(t) = 8t^2$ ניוטון על הגלגלת כלפי מעלה.

נתון: $m_1 = 1.6\ \text{kg},\ m_2 = 3.6\ \text{kg}$

א. באיזה זמן כל אחת מהמסות תתנתק מהרצפה?

ב. מהי מהירות המסה m_1 ב $t = 5s$?(הניחו שהחוטים ארוכים מאוד).

21) זריקה משופעת עם כוחות תלויים בזמן

גוף שמסתו 2 ק"ג נזרק מהקרקע במהירות 30 מטר לשניה ובזווית 20 מעלות מעל האופק. במהלך תנועתו פועלים על הגוף כוחות שונים עד אשר הוא פוגע בקרקע. שקול הכוחות (כולל כוח הכובד) נתון לפי

$\vec{F}(t) = 10t^2\hat{x} + (0.4t - 10)\hat{y}$ בניוטון.

א. מהו וקטור המיקום של הגוף כתלות בזמן?

ב. מתי יפגע הגוף בקרקע ובאיזה מרחק תהיה הפגיעה מנקודת המוצא?

22) גוף על מישור עם כוח סינוס

גוף שמסתו m נמצא במנוחה על מישור אופקי. ברגע $t = 0$ מתחיל לפעול על הגוף כוח אופקי $F(t) = A\sin(\omega t)$ כאשר $\omega = 1\frac{rad}{sec}$ ו- A הינו פרמטר נתון.

מקדם החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף והמישור הוא $\mu = \frac{A}{2mg}$.

א. מתי הגוף יתחיל לנוע?

ב. מהי מהירות הגוף כתלות בזמן?

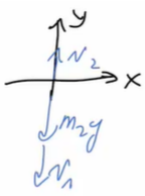
ג. מהו מיקום הגוף כתלות בזמן ביחס לנקודת המוצא?

תשובות סופיות:

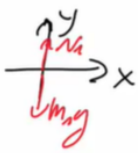
1) $T_1 \approx 22.0\text{N}\ ,\ T_2 \approx 26.9\text{N}$

2) $T_2 \approx 19.6\text{N}\ ,\ T_1 \approx 26.4N$

3) א. מסה 3 ק"ג:



מסה 2 ק"ג:



ב. 20N ג. 20N ד. 50N

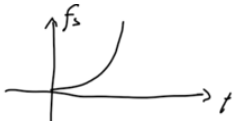
4) א. 30N למעלה ב. 60N למעלה

5) 40N

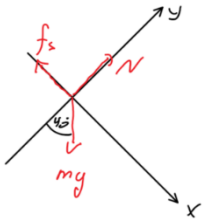
6) $T \approx 41.3N$

7) א. 12N ב. 10N

8) א. 20N ב. $\sqrt{10}\,\sec$ ג.



9) א.



ב. $f_s \approx 19.3N$, $N \approx 23.0N$

10) א. $M = 3.83kg$ ב. $M_{min} = 2.87kg$, $M_{max} = 4.79kg$

11) א. הגוף לא יכול להיות במנוחה. ב. $t \approx 6.82\sec$

ג. סעיף א': נשאר במנוחה, סעיף ב': אין משמעות.

12) א. כן, כי $\Delta x \approx 37.5m < 50m$ ב. לא, כי $\Delta x = 52.5m > 50m$

13) א. גודל: $-1.25\frac{m}{sec^2}$, הכיוון חיובי. ב. גודל: $2.5\frac{m}{sec^2}$, הכיוון חיובי.

ג. $x = 8cm$

14) $x = \frac{1}{2}m$

15) א. $F = -2.5N$ ב. $F = 2N$ ג. סעיף א': $a = -3.13\frac{m}{sec^2}$,

סעיף ב': $a = -2\frac{m}{sec^2}$

16) $a = -2\frac{m}{sec^2}$

17) $a \approx 0.326\frac{m}{sec^2}$

18) א. $t = 2\sec$ ב. $f_s = 1N$ ג. $a = \begin{cases} 0 & 0 < t < 2 \\ t - \frac{3}{2} & 2 < t \end{cases}$

ד. $v(t=4) = 3\frac{m}{sec}$ ה. $x(t=4) = 2.3m$

19) א. $t \approx 2.17\sec$ ב. $v(t=4) = 1.53\frac{m}{sec}$ ג. $x = 467m$

20) א. $t_1 = 2\sec,\quad t_2 = 3\sec$ ב. $67.5\,{}^{m}/_{s}$

21) א. $\vec{r}(t) = \left(\frac{5}{12}t^4 + 28.2t\right)\hat{x} + \left(\frac{t^3}{30} - \frac{5}{2}t^2 + 10.3t\right)\hat{y}$

ב. זמן פגיעה 4.36sec ובמרחק 274m

22) א. $t \approx 0.524s$

ב. $v = 0$ כאשר $t < 0.524s$

ו- $v(t) = \frac{A}{m}\left[-\frac{1}{\omega}\cos(\omega t) - \frac{1}{2}t + 1.32\right]$ כאשר $t > 0.524s$

ג. $x = 0$ כאשר $t < 0.524s$

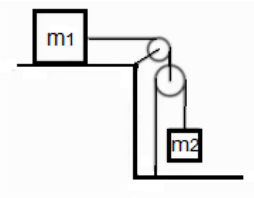
ו- $x(t) = \frac{A}{m}\left[-\frac{1}{\omega^2}\sin(\omega t) - \frac{\Sigma^2}{4} + 1.32t - 0.0724\right]$ כאשר $t > 0.524s$

גלגלות נעות ומכפלי כוח:

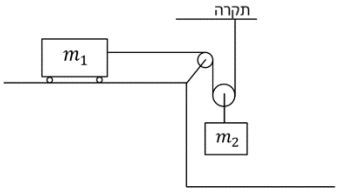
רקע:

נבטא את אורך החוט באמצעות מיקום הגופים וקבועים ונגזור.

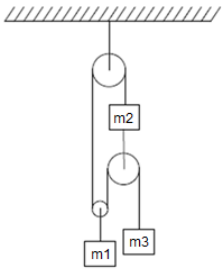
שאלות:



1) גלגלות וגזירה בזמן של אורך החוט
במערכת הבאה מסות הגופים ידועות.
אין חיכוך בין המסות למשטח.
מצא את תאוצות הגופים ואת המתיחויות בחוטים.



2) אחת תלויה מהתקרה ואחת על שולחן
במערכת הבאה המסה m_1 נמצאת על שולחן חסר חיכוך ומחוברת באמצעות חוט אידיאלי כפי שמתואר באיור.
הגלגלות אידיאליות ו- m_2 נתונה.
מצא את התאוצה של כל מסה כל עוד הן לא נופלות מהשולחן או פוגעות ברצפה.



3) מערכת גלגלות מסובכת
מצאו את תאוצת הגופים במערכת הבאה.
מה התנאי לכך שהמסה m_3 תנוע כלפי מעלה
אם נתון שהמערכת מתחילה ממנוחה?

תשובות סופיות:

1) $a_1 = \dfrac{2m_2 g}{4m_2 + m_1}$

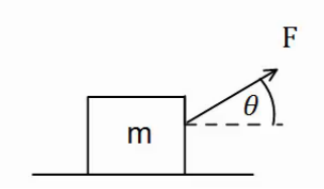
2) $a_1 = \dfrac{m_2 g}{2m_1 + \frac{m_2}{2}}$, $a_2 = \dfrac{m_2 g}{4m_1 + m_2}$

3) $a_3 < 0$, $a_3 = \left((m_2 + m_3)(4m_2 + m_1) + 4m_2^{\,2}\right)$

תרגילים נוספים:

שאלות:

1) זווית אופטימלית למשיכה



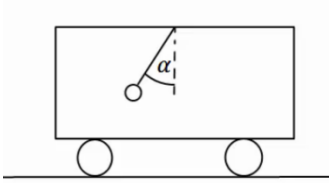
כוח F מושך ארגז בעל מסה m בזווית θ מעל האופק.
מקדם החיכוך בין הארגז לקרקע הוא μ_k.

א. מצא את תאוצת הכוח כתלות בפרמטרים הרשומים בשאלה.

ב. הנח כי מקדם החיכוך הקינטי הוא 0.3.
בדוק באילו מהערכים הבאים של הזווית יש את התאוצה הגבוהה ביותר: $\theta = -10°, 0°, 10°, 20°, 30°, 45°$.

ג. מצא את הזווית המדויקת בה התאוצה תהיה מקסימלית.
השתמש בנגזרת.

2) מטוטלת במכונית

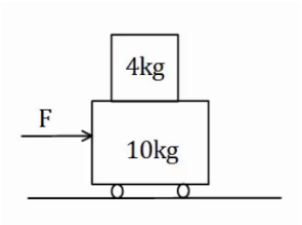


מטוטלת קשורה לתקרת מכונית.
המטוטלת נמצאת בזווית קבועה ונתונה α,
ביחס לאנך מתקרת המכונית.

א. מצא מהי תאוצת המכונית (גודל וכיוון)?

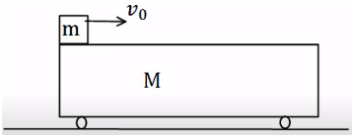
ב. האם ניתן לדעת מה כיוון תנועת המכונית?

3) מסה של 4 על עגלה של 10



מסה של 4 ק"ג מונחת מעל עגלה בעלת מסה של 10 ק"ג.
החיכוך בין העגלה למשטח זניח.
מקדם החיכוך הסטטי בין המסה לעגלה הוא $\mu_s = 0.2$.
כוח אופקי F מופעל על המסה התחתונה ימינה.
מהו הכוח המקסימלי הניתן להפעיל כך שהמסה העליונה לא תחליק על העגלה.

4) מסה מחליקה על עגלה



מסה m מונחת על עגלה בעלת מסה M,
הנמצאת במנוחה.
המסה מונחת בקצה השמאלי של העגלה.
נותנים למסה העליונה (בלבד) מהירות התחלתית v_0.
בין המסה לגג העגלה קיים חיכוך, והחיכוך בין העגלה למשטח זניח.

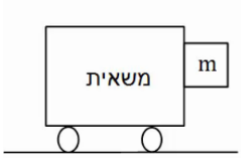
נתון: $M=12kg\ ,m=3kg\ ,\ v_0=20\frac{m}{sec}\ ,\ \mu_k=0.2$.

א. מצא את הביטוי למיקום ולמהירות המסה, כתלות בזמן.

ב. מצא את הביטוי למיקום ולמהירות העגלה, כתלות בזמן.

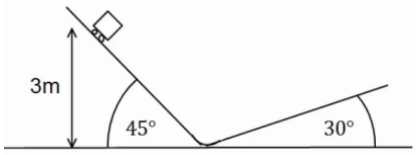
ג. מהי המהירות הסופית של שני הגופים, בהנחה שהמסה לא נופלת מהעגלה.

5) מסה צמודה למשאית



מסה m מונחת בצמוד לחלקה הקדמי של משאית.
בין המסה למשטח קיים חיכוך. נתון: $m\ ,\mu_s$.
מהי התאוצה המינימלית הדרושה למשאית על מנת שהמסה לא תיפול?

6) קופסה בין מדרונות



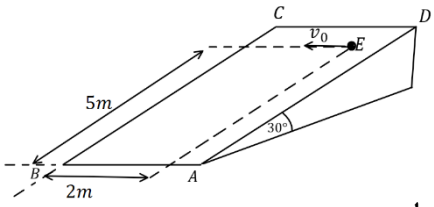
קופסה קטנה עם גלגלים מונחת על מישור משופע בעל זווית של 45 מעלות.
הקופסה משוחררת ממנוחה מגובה של 3 מטרים ומתחילה בתנועה.
בתחתית המדרון הקופסה עוברת למדרון משופע אחר בעל זווית של 30 מעלות.
הזנח אפקטים המתרחשים בעת המעבר והנח כי גודל מהירות הקופסה במעבר בין המדרונות נשאר זהה.

א. מהו הגובה המקסימלי אליו תגיע הקופסה במדרון השני?
נחש מה יקרה לאחר מכן.

ב. חזור על סעיף א' אם נהג הקופסה שכח לשחרר את מעצור היד של הגלגלים וקיים חיכוך קינטי בין הקופסה למשטח.
מקדם החיכוך הוא: $\mu_k=0.2$.

7) זריקה אופקית על מישור משופע

מישור משופע חלק ABCD יוצר זווית של 30 מעלות עם הקרקע.
הנקודה E נמצאת במרחק 5m מהצלע AB ובמרחק 2m מהצלע BC.
מן הנקודה E נזרק כדור קטן על הלוח, במהירות התחלתית v_0 שכיוונה מקביל לצלע AB.



א. צייר מערכת צירים, ורשום את הכוחות הפועלים על הכדור בעת תנועתו על הלוח בכל ציר.

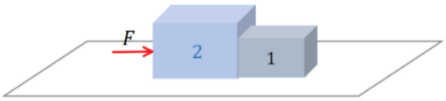
ב. מהי צורת המסלול של הכדור על הלוח?

ג. מצא את v_0, עבורה הכדור יגיע בדיוק לנקודה B.

ד. מהי מהירות הכדור בנקודה B עבור ה-v_0 שמצאת בסעיף ג'?

8) כוח דוחף שתי קופסאות צמודות

שתי תיבות נמצאות צמודות זו לזו על משטח אופקי חסר חיכוך.
מסות התיבות הן: $m_1 = 3\,kg$ ו- $m_2 = 5\,kg$.



כוח אופקי דוחף את תיבה 2 שדוחפת את תיבה 1, כפי שמתואר בתרשים.
גודל הכוח הוא $F = 16N$.
חשב את:

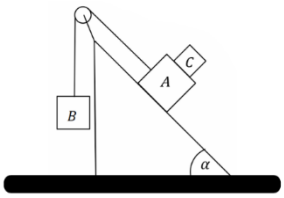
א. התאוצה של כל תיבה.

ב. הכוח הנורמלי $N_{1\to2}$, שבו התיבה הראשונה דוחפת את השנייה.

ג. הכוח הנורמלי $N_{2\to1}$, שבו התיבה השנייה דוחפת את הראשונה.

9) גוף על גוף במישור משופע

גוף A בעל מסה m_A, גוף B בעל מסה m_B מחוברים באמצעות חוט וגלגלת, כמתואר באיור.
גוף A מונח על מישור משופע חלק בעל זווית α.
גוף C בעל מסה m_C מונח על גוף A.



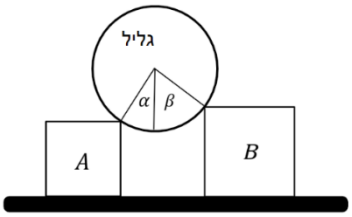
מקדם החיכוך הסטטי בין הגופים A ל-C הוא μ_S.

א. מהי המסה המרבית של גוף B, כך שהגופים C ו-A ינועו יחדיו במעלה המישור?

ב. מהי תאוצת הגופים והמתיחות בחוט, אם המסה של גוף B היא זאת שמצאת בסעיף א' (או טיפה קטנה ממנה)?

ג. מהן תאוצות הגופים אם המסה של גוף B גדולה מזו שמצאת בסעיף א' ומקדם החיכוך הקינטי הוא μ_k?

10) גליל על שני ארגזים

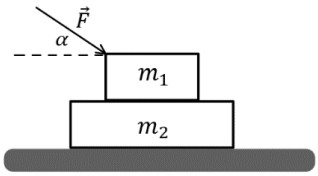


גליל אחיד, שמסתו m מונח על שני ארגזים
שמסותיהם: $m_A = m\ ,\ m_B = 2m$.
לארגזים גבהים שונים והם מונחים על משטח אופקי.
בין הגליל לארגזים אין חיכוך.
כשהמערכת נמצאת בשיווי משקל יוצרים הרדיוסים
של הגליל, הנוגעים בפינות הארגזים זוויות של: $\alpha = 30°,\ \beta = 45°$
עם האנך לקרקע, ראה איור. נתונים: $m\ ,\ g$.

א. מה הכוח שמפעיל כל ארגז על הגליל?

ב. בהנחה שקיים אותו מקדם חיכוך בין הארגזים והמשטח,
מהו גודלו המינימלי של מקדם החיכוך, כך שהמערכת תישאר בשיווי משקל?

11) כוח דוחף גוף על גוף



שני גופים זהים שמסותיהם: $m_1 = m_2 = m$, מונחים
זה על גבי זה, על גבי שולחן אופקי חלק (ראה איור).
בין הגופים קיים חיכוך, ומקדמי החיכוך הקינטי
והסטטי הם: $\mu_s\ ,\ \mu_k$.
כוח חיצוני $\vec{F}$ מופעל על הגוף העליון בזווית α מתחת לאופק.
הביעו את תשובתכם באמצעות הפרמטרים: $\mu_k\ ,\ \mu_s\ ,\ g\ ,m\ ,\alpha\ ,F$.

א. בהנחה שהגופים נעים יחדיו, מהי התאוצה המשותפת?

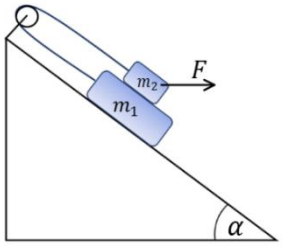
ב. בהנחה שהגופים נעים יחדיו, מהו גודלו של כוח החיכוך בין הגופים?

ג. מהו גודלו המקסימלי של $\vec{F}$, כך שהגופים ינועו יחדיו?

ד. נתון כי: $\mu_s = 0.2\ ,\ \mu_k = 0.15\ ,\ \alpha = 30°$.
מצא את תאוצת כל גוף, כאשר הכוח הדוחף הוא: $F = \frac{1}{2}mg$.

ה. חזור על סעיף ד׳ כאשר $F = 3mg$.

12) מסה על מסה מחוברות בגלגלת



נתונה מערכת הכוללת שני גופים: $m_1 = 4kg\ ,\ m_2 = 3kg$.
הגופים קשורים על ידי חוט וגלגלת אידיאלית,
ומונחים על מישור משופע בעל זווית $\alpha = 30°$.
מקדמי החיכוך בין הגופים הם: $\mu_k = \mu_s = 0.4$,
ומקדמי החיכוך עם המישור הם: $\mu_k = \mu_s = 0.3$.
כוח אופקי F פועל על m_2.

א. מהו ה-F המקסימלי, כך שהגופים יישארו במנוחה?

ב. אם $F = 40N$, מהי תאוצת הגופים?

13) זמן לעלות ולרדת מדרון עם חיכוך

גוף נזרק במעלה מדרון משופע במהירות התחלתית v_0.

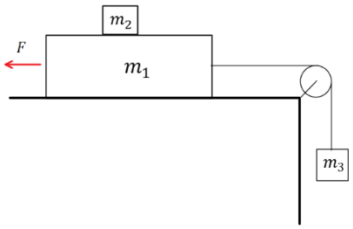
זווית השיפוע של המדרון היא θ ומקדם החיכוך בין המדרון לגוף הוא μ_k.

א. מצאו כמה זמן ייקח לגוף לחזור לנקודת ההתחלה (בהנחה שהוא לא נשאר במנוחה בשיא הגובה)?

ב. מה היחס בין המהירות הסופית והמהירות ההתחלתית של הגוף?

14) גוף על גוף וכוח מושך

במערכת שבאיור המסות נתונות.



נתונים גם מקדמי החיכוך בין m_1 למשטח μ_{s_1} , μ_{k_1}

ומקדמי החיכוך בין m_1 ל-m_2 , μ_{s_2} , μ_{k_2}.

הכוח F באיור מתייחס רק לסעיף ב.

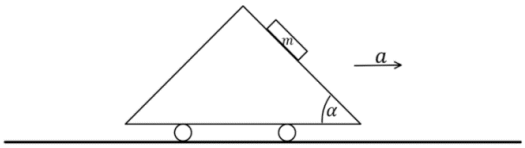
א. מהן תאוצות הגופים והמתיחות בחוט בהנחה ש-m_2 נעה בתאוצה יחסית ל-m_1?

ב. מהו הכוח המינימאלי F שיש להפעיל בכדי שהמסות ינועו יחדיו?

15) תיבה על מכונית משולשת

מכונית עם זווית בסיס α נוסעת בתאוצה קבועה.

מניחים תיבה בעלת מסה m על דופן המכונית.



א. מצאו את גודלו של כוח החיכוך בין המכונית לתיבה אם ידוע שתאוצת המכונית היא a ימינה והתיבה לא מחליקה על הדופן.

ב. מהו μ_s המינימלי המאפשר מצב זה?

16) כדור בתא מטען משופע

למשאית באיור תא מטען משופע בזווית α ובסופו דופן אנכית.

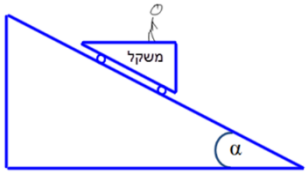
בתוך תא המטען יש כדור בעל מסה M.

המשאית נוסעת בתאוצה קבועה a שמאלה.

מצאו את הכוחות הנורמלים שפועלים על הכדור בהנחה שאין חיכוך.

17) אדם על קרונית על מישור משופע*

אדם בעל מסה m עומד על משקל המחובר בצורה אופקית לקרונית.
מסת הקרונית היא M ונתון כי היא מחליקה ללא חיכוך על פני מישור משופע בזווית α.



א. מה מורים המאזניים?
הניחו שהחיכוך בין רגלי האדם לקרונית מספיק גדול, כך שאינו נע ביחס אליה.

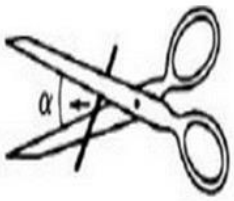
ב. מצא את מקדם החיכוך המינימלי בין רגלי האדם והקרונית על מנת שהאדם לא יחליק ביחס לקרונית.

ג. כעת הנח כי אין חיכוך בכלל בין האדם לקרונית.
מה תהיה תאוצת הקרונית במצב זה? (כל עוד האדם נמצא על הקרונית).

ד. מה יורה המשקל במצב המתואר בסעיף ג'?

18) מספריים חותכות חוט**

אדם מנסה לחתוך חוט מתכת בעזרת מספריים.
החוט חופשי לנוע והוא מחליק על המספרים עד שזווית המפתח של המספריים היא α, בזווית זו המספריים מתחילות לחתוך את החוט.



א. צייר את הכוחות שפועלים על החוט.

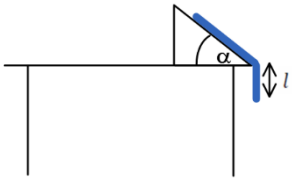
ב. מצא את מקדם החיכוך בין המספרים לחוט.

ג. הראה שהזווית α אינה תלויה בכוח הכובד כאשר המספריים במצב אופקי.

ד. כעת, מסובבים את המספרים בזווית β סביב ציר העובר בבורג המספרים.
כיוון הסיבוב הוא נגד השעון, כך שהחוט עולה כלפי מעלה.
הראה כעת שהשינוי בזווית α הוא לפי: $\mu = \mu_0 + V\mu$ כאשר μ_0 הוא המקדם שמצאת בסעיף ב' ו- $V\mu = -\frac{mg\sin\beta}{F\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}F$.
האם המספריים יחתכו יותר מוקדם או יותר מאוחר?

19) חבל מחליק משולחן משופע**

חבל בעל מסה M ואורך L נמצא על מישור משופע בזווית α שנמצא על שולחן כך שחלק משתלשל מהשולחן מטה.
בין החבל לשולחן יש מקדם חיכוך קינטי וסטטי μ.
בזמן $t=0$ יש חבל באורך l המשתלשל מקצה השולחן, ונמצא במנוחה.
מהו הגובה של קצה החבל $y(t)$ מתחת לשולחן
כתלות בזמן? הניחו כי החבל בעל עובי אפס ויש חיכוך רק עם החלק העליון של המישור.



תשובות סופיות:

1) א. $a=\frac{F}{m}\left(\cos\theta+\mu_k\sin\theta\right)-\theta_k g$ ב. $\theta=20°$ ג. $\theta_0\approx 16.6992°$

2) א. גודל: $a_x=g\tan\alpha$, כיוון: חיובי ב. לא

3) $F=\mu_s\left(m_1+m_2\right)g=28N$

4) א. מיקום-זמן: $x_1(t)=0_20t-\frac{2}{2}t^2$, מהירות-זמן: $v_1(t)=20-2t$

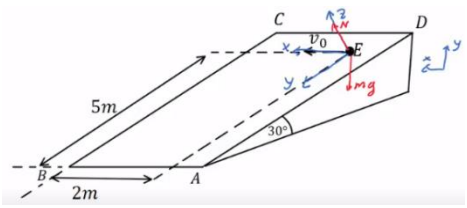
ב. מיקום-זמן: $x_2(t)=\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{2}t^2$, מהירות-זמן: $v_2(t)=0+\frac{1}{2}t$

ג. $v_2(t=8)=4\frac{m}{sec}$

5) $a_{min}=\frac{g}{\mu_s}$

6) א. $h_{max}=3m$ ב. $h_{max}=1.78m$

7) א. $\sum F_x=0$, $\sum F_y=mg\sin 30°$, $\sum F_z=0$



ב. פרבולה כמו בזריקה אופקית. ג. $v_0=\sqrt{2}\,\frac{m}{sec}$

ד. $v_{x(t_B)}=\sqrt{2}\,\frac{m}{sec}\ ,\quad v_{y(t_B)}=7.07\,\frac{m}{sec}$

8) א. $a_1=a_2=2\,\frac{m}{sec^2}$ ב. $N_{1\to2}=6N$ ג. $N_{2\to1}=6N$

9) א. $m_{B_{max}}=\frac{(m_A+m_C)\mu_s\cos\alpha}{1+\sin\alpha-\mu_s\cos\alpha}$

ב. $a=g[\mu_s\cos\alpha-]\sin\alpha,\quad T=g(m_A+m_C)\mu_s\cos\alpha$

ג. $a_c=(\mu_k\cos\alpha-\sin\alpha)g,\ a_A=a_B=\frac{g(m_B-\mu_k m_c\cos\alpha-m_A\sin\alpha)}{m_A+m_B}$

10) א. $N_A=0.732mg,\quad N_B=0.518mg$ ב. $\mu_{s_{min}}=0.464$

11) א. $a=\frac{F\cos\alpha}{2m}$ ב. $f_s=\frac{F\cos\alpha}{2}$

ג. $F_{max}=\frac{2\mu_s mg}{\cos\alpha-2\mu_s\sin\alpha}$ ד. $a=2.17\,\frac{m}{sec^2}$

ה. $a_1=22.2\,\frac{m}{sec^2}\ ,\ a_2=3.75\,\frac{m}{sec^2}$

12) א. $F_{max}=31.05N$ ב. $a=1.81\,\frac{m}{sec^2}$

13) א. $t=\frac{v_0}{g(\sin\theta+\mu_1\cos\theta)}+\frac{v_0}{g\sqrt{(\sin^2\theta-\mu_k{}^2\cos^2\theta)}}$

ב. $\frac{v_f}{v_0}=\sqrt{\frac{\sin\theta-\mu_k\cos\theta}{\sin\theta+\mu_k\cos\theta}}$

14) א. $a_1=a_3=\frac{m_3g-\mu_{k_2}m_2g-\mu_{k_1}(m_1+m_2)g}{m_1+m_3}\ ,\ a_2=\mu_{k_2}g$

ב. $F_{min}=m_3g-\mu_{s_2}g(m_3+m_2)-\mu_{s_1}(m_1+m_2)g$

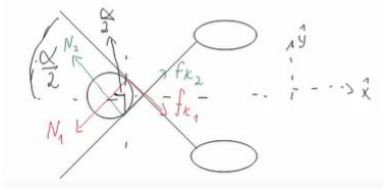
15) א. $f_s=mg\sin\alpha-ma\cos\alpha$ ב. $\mu_{s_{min}}=\frac{g\sin\alpha-a\cos\alpha}{g\cos\alpha+a\sin\alpha}$

16) $N_1=\frac{Mg}{\cos\alpha}\ ,\ N_2=M(a+g\tan\alpha)$

17) א. $N_2=mg\cos^2\alpha$ ב. $\mu_{s\,min}=\tan\alpha$ ג. $a_x=\frac{(M+m)g\sin\alpha}{M+m\sin^2\alpha}$

ד. $N_2=m\left(g-\left(\frac{(M+m)g\sin\alpha}{M+m\sin^2\alpha}\right)\sin\alpha\right)$

18) א.



ב. $\mu_k = \tan\frac{\alpha}{2}$ ג. הוכחה.

ד. הוכחה. החוט יחתך יותר מאוחר.

19) $$y(t)=\frac{1}{2}\left(1+\frac{\beta}{k}\right)\left(e^{\sqrt{\frac{k}{M}}t}+e^{-\sqrt{\frac{k}{M}}t}\right)-\frac{\beta}{k}$$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 5 - תנועה מעגלית

תוכן העניינים

1. נוסחאות בסיסיות בתנועה מעגלית 83
2. הכוח הצנטרפוגלי 89
3. וקטורים בתנועה מעגלית 91
4. תרגילים מסכמים 94
5. תרגילים מסכמים למתקדמים 98

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 T - זמן המחזור התדירות וזמן המחזור מוגדרים רק בתנועה מעגלית קצובה
קשר בין המהירות הקווית לזוויתית	$v = \omega R$	קשר רק בין הגדלים
תאוצה רדיאלית 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- θ 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).

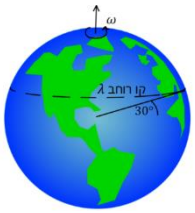
ב. מתי ישלים הנהג את הסיבוב הראשון?

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

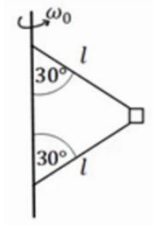
יובל קושרת אבן שמסתה 200 גרם לחוט באורך 0.7 מטר.

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



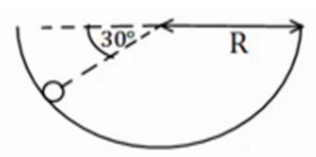
במערכת הבאה מסה m קשורה דרך שני חוטים למוט המסתובב במהירות זוויתית ω_0. אורך החוטים זהה ושווה ל-l.

הזווית של החוטים עם המוט היא 30 מעלות.

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

נתונים: m, l, ω_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.

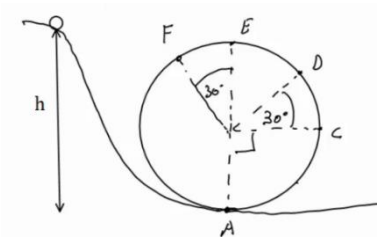
10) תאוצה משיקית רדיאלית וכוללת

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: $R=2m$.

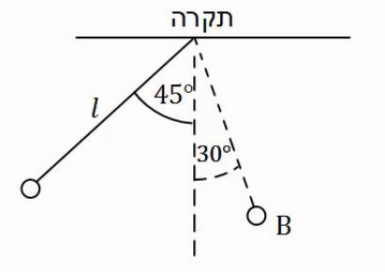
א. מצא את מהירות הכדור בכל הנקודות באיור.
(רמז: שימור אנרגיה).

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.

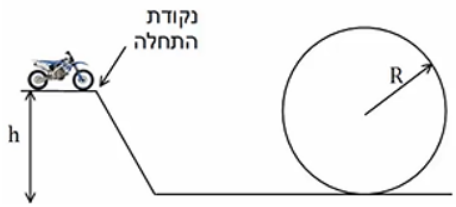
א. מהי מהירות המסה בתחתית המסלול?

ב. מהי המתיחות בחוט ברגע זה?

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

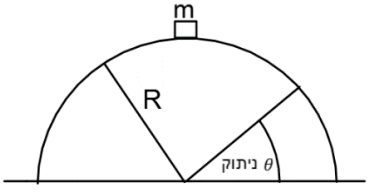
ד. מהי המתיחות בחוט בשיא הגובה וברגע השחרור?

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. 12.5sec

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

5) $\text{T}_1 = \frac{\text{mg}}{\sqrt{3}} + \frac{\text{m}\omega_0^{\,2}\text{l}}{2}$, $\text{T}_2 = \frac{-\text{mg}}{\sqrt{3}} + \frac{\text{m}\omega_0^{\,2}\text{l}}{2}$

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

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. $a_r = \frac{(a_t \cdot t)^2}{\text{R}}$ 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) $|\text{F}| = \sqrt{(80t)^2 + 4000^2}$, הכביש מפעיל כוח זה.

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

13) א. $\text{v}_\text{F} \approx 6.73\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\text{v}_\text{E} \approx 6.32\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\text{v}_\text{D} \approx 7.975\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\text{v}_\text{C} \approx 8.94\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\text{v}_\text{A} \approx 10.95\frac{\text{m}}{\text{sec}}$

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

ג. $a_{\theta_\text{F}} = 5\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$, $a_{\theta_\text{E}} = 0$, $a_{\theta_\text{D}} = -10\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$, $a_{\theta_\text{C}} = -g$, $a_{\theta_\text{A}} = 0$

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

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

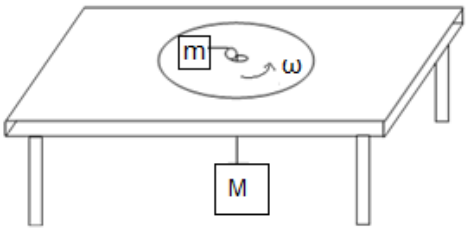
בכיוון החוצה מהמעגל

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 ω.
המסה מחוברת לחוט העובר דרך מרכז השולחן ומחובר למסה m.
בין המסה m לדיסק יש חיכוך ומקדם החיכוך הסטטי הוא μ_s.
נתון: ω , μ , m , μ_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:

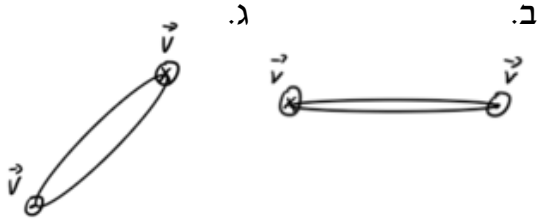
$$\hat{r} = \cos\theta\,\hat{x} + \sin\theta\hat{y} \;\; ; \;\; \hat{\theta} = -\sin\theta\,\hat{x} + \cos\theta\hat{y}$$

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:

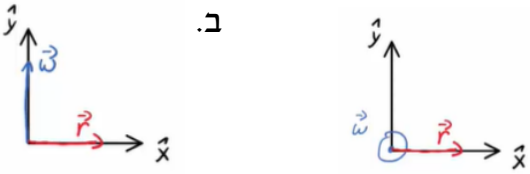
א. ב. ג.



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.

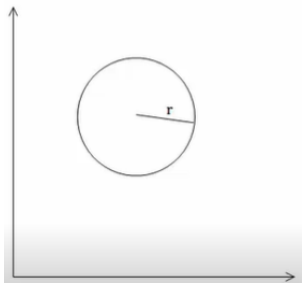
ב. מצא את וקטור המהירות של הגוף כפונקציה של הזמן.

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

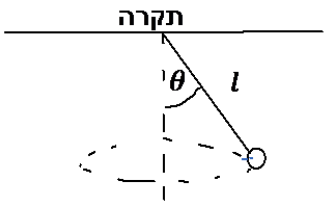
ג. $\vec{a} = \dot{\vec{v}} = -\omega^2\vec{r}$ ' ד. $\vec{v} = \left(\frac{-3}{5}, \frac{3}{5}\right)$

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

תרגילים מסכמים:

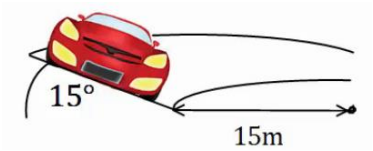
שאלות:

1) מטוטלת מסתובבת אופקית



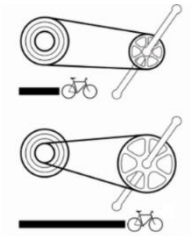
מטוטלת בעלת אורך l מסתובבת סביב ציר האנך לתקרה בזווית מפתח קבועה θ. נתון: l , θ.
מצא את התדירות וזמן המחזור של הסיבוב.

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

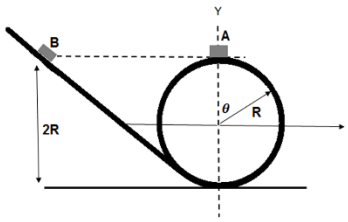


הילוכים של אופניים מורכבים משני גלגלי שיניים ברדיוסים שונים ושרשרת המקיפה את שני הגלגלים. כאשר השרשרת מתוחה האורך שלה קבוע. מצאו את הקשר בין מהירות הסיבוב של גלגלי השיניים אם הרדיוסים שבהם מקיפה השרשרת כל אחד מהגלגלים ידועים.

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 θ_1 עם ציר ה- y , יתנתק גוף A מהמסילה?



ב. באיזו זווית θ_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 Δt (הניחו שהגופים עדיין באוויר).

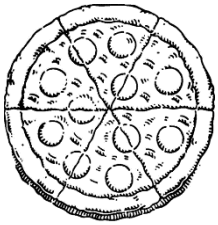
5) מציאת מיקום כפונקציה של הזמן

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 θ 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.

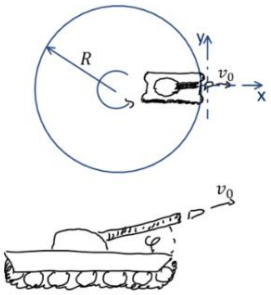
מצא את:

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.

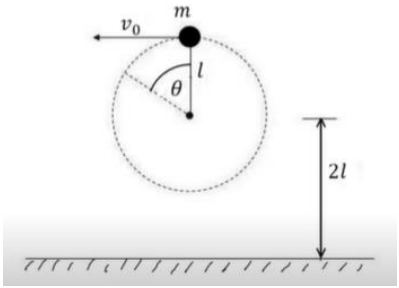
מהירות הלוע של הפגז היא v_0.

התותח מכוון בכיוון הרדיאלי כלפי חוץ, ובזווית φ 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 θ 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-ω 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 ω.

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

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

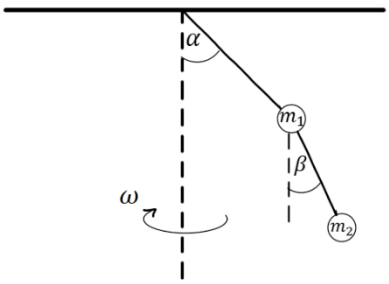
3) מטוטלת כפולה מסתובבת אופקית*

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 ω סביב ציר האנך לתקרה.

הזוויות בין החוטים לאנכים הן: α , β (ראה איור).



א. רשום את משוואת התנועה לכל גוף.

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

מהי תדירות הסיבוב המינימלית האפשרית?

ג. דני ויוסי ניסו למצא את ω במקרה הכללי.

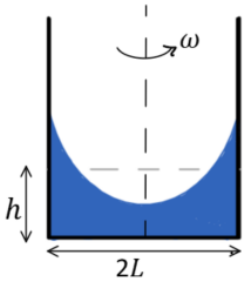
דני הציב את גדלי המתיחויות של החוטים במשוואת התנועה של גוף 2

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 ω כך ש- $\omega << L$ מכילה מים.
גובה המים בתיבה הוא h.
מסובבים את התיבה במהירות זוויתית ω 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?

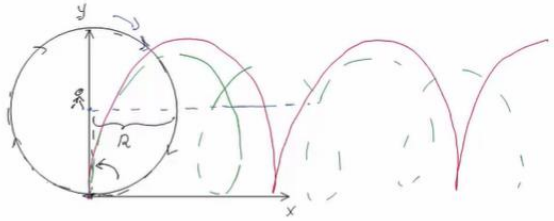
תשובות סופיות:

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. $h=\frac{\omega^2L^2}{6g}$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 6 - קואורדינטות פולריות

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים 100

הרצאות ותרגילים

רקע

$$x = r\cos\theta$$
$$y = r\sin\theta$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$\tan\theta = \frac{y}{x}$$

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

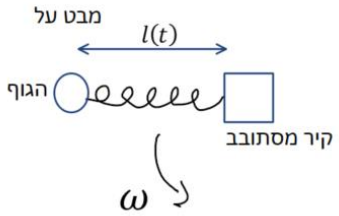
$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} = r\hat{r}$$

$$\vec{v} = \dot{r}\hat{r} + r\dot{\theta}\hat{\theta}$$

$$\vec{a} = \left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2\right)\hat{r} + \left(2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}\right)\hat{\theta}$$

שאלות

1) מסה קשורה עם קפיץ לקיר מסתובב



גוף נקודתי מחובר ע"י קפיץ לקיר שמסתובב במהירות זוויתית קבועה ω במישור האופקי. אורך הקפיץ משתנה בזמן ונתון לפי: $l(t) = l_0 + A\sin(\Omega t)$ כאשר A , Ω ו-l_0 הם קבועים חיוביים ומתקיים $A < l_0$.

א. מהי תאוצת הגוף בקואורדינטות פולריות?

ב. נניח ש-A , Ω ו-ω ידועים, מהו התנאי על l_0 כך שבנקודות זמן מסוימות כיוון התאוצה יהיה רק בכיוון $\hat{\theta}$?

ג. מהי התשובה המספרית לסעיף ב' אם: $A = 0.2\text{m}$, $\Omega = 3\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$, $\omega = 1\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$?

2) דני מסתובב במעגלים

דני בן השלוש מתחיל לרוץ במעגלים ממנוחה.

דני מתרחק מהנקודה בה התחיל לרוץ לפי: $r = At^2$ והוא מסתובב במהירות זוויתית הולכת וגדלה: $\omega = Bt$. $\left(A = 0.4167\frac{m}{sec^2}, B = 1\frac{rad}{sec^2}\right)$.

א. מצא את המהירות של דני כתלות בזמן בקואורדינטות פולריות.

ב. מצא את התאוצה של דני כתלות בזמן בקואורדינטות פולריות.

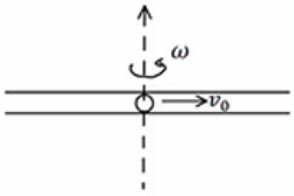
ג. כאשר דני מגיע לתאוצה השווה ל- g הוא מקבל סחרחורת ונופל (על הטוסיק כמובן), מתי ייפול דני?

3) כוח מסתורי בצינור

צינור מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω סביב מרכזו.

כדור קטן בעל מסה m נמצא ב- $t = 0$ במרכז הצינור.

לכדור מהירות התחלתית v_0 בכיוון הרדיאלי.

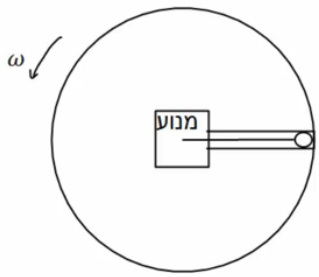


כוח מסתורי F (לא בהכרח קבוע) פועל על הכדור ושומר על מהירות הכדור ביחס לצינור להיות קבועה ושווה ל- v_0. בין הצינור לכדור אין חיכוך.

א. מה מיקום הכדור כתלות בזמן?

ב. מהו הכוח F כתלות בזמן הפועל על הכדור?

4) מנוע מושך כדור בתוך דיסקה מסתובבת



דיסקה ברדיוס R מונחת על שולחן ומקובעת במרכזה אך מסתובבת סביב מרכזה במהירות זוויתית קבועה ω.

בתוך הדיסקה ישנה תעלה, כדור בעל מסה m מונח בקצה של התעלה ויכול לזוז רק בתוך התעלה.

במרכז הדיסקה נמצא מנוע המחובר בחוט לכדור.

המנוע מושך את הכדור למרכז הדיסקה כך שתאוצת הכדור ביחס לדיסקה היא a_0.

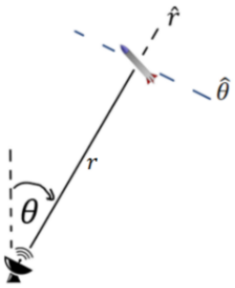
א. מצא את מיקום המסה כתלות בזמן ביחס לדיסקה וביחס למעבדה, בקואורדינטות פולריות.

ב. מה הכוח שמפעיל המנוע על הכדור כתלות בזמן?

ג. מה הכוח שמפעילים הקירות על הכדור?

5) מכ"מ מזהה טיל

מכ"מ מזהה טיל הנמצא מעט מעל האטמוספירה עם מנוע כבוי.
הבעיה דו מימדית.



נתון כי: $r=70\text{km}$, $\theta=30^{o}$, $\dot{r}=1100\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\dot{\theta}=1.5\cdot10^{-2}\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$.
החיכוך עם האוויר זניח בגובה רב והתאוצה היחידה היא
תאוצת הכובד השווה ל- $\frac{9.6^{\text{m}}}{\text{sec}^2}$ (התאוצה קטנה מעט בגלל המרחק ממרכז כדור הארץ).

א. מהו גודלה של מהירות הטיל?

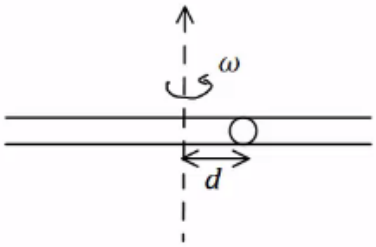
ב. מצאו את הערך של $\ddot{r}$ ושל $\ddot{\theta}$.

6) כדור חופשי בתוך צינור מסתובב

צינור מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω סביב מרכזו.
כדור קטן בעל מסה m נמצא בתוך הצינור.
ב-$t=0$ הכדור נמצא במנוחה ביחס לצינור ובמרחק d ממרכז הצינור.
בין הצינור לכדור אין חיכוך.

א. רשום את הכוחות הפועלים על הכדור בצירים פולריים.

ב. רשום את משוואת התנועה בכיוון הרדיאלי.



ג. בדוק כי הפתרון: $r(t)=\text{A}e^{\omega t}+\text{B}e^{-\omega t}$ מתאים
למשוואה שמצאת ומצא את הקבועים A , B.

ד. מהו הכוח הנורמאלי הפועל מהצינור על כדור?

7) משוואות לתנועת חלקיק

תנועת חלקיק מתוארת ע"י המשוואות: $r=\text{A}\cdot t^{\alpha}$ ו- $\dot{\theta}=\omega=const$
כאשר A , α קבועים.

א. הביעו את r כתלות ב- θ.

ב. שרטטו את התנועה עבור: $\alpha>0$, $\alpha<0$, $\alpha=0$.

ג. הניחו כי $\alpha=1$, $\text{A}=4\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $\omega=2\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$.
כמה סיבובים יעבור הגוף עד שהרדיוס יהיה 30_{m}?

8) חללית במסלול ספיראלי

חללית 1 נעה במסלול ספיראלי (בדו מימד) כך ש- $r_1(t)=At^{\alpha}$, כאשר A ו- α הם קבועים חיוביים נתונים.

נתון גם כי: $\ddot{\vec{r}}(t)\cdot\hat{r}=A\alpha(\alpha-1)t^{\alpha-2}-AC^2t^{\alpha}e^{2Ct}$.

החללית נעה נגד כיוון השעון ו- C הוא גם קבוע חיובי נתון.

בזמן $t=0$ החללית חוצה את ציר ה- x השלילי.

א. מצאו את מיקום החללית בקואורדינטות קרטזיות.

ב. חללית 2 נעה על מסלול ספיראלי כך ש- $r_2(t)=\frac{1}{2}r_1(t)$ ובאותה זווית כמו חללית 1.
מצאו את המיקום, המהירות והתאוצה של חללית 1 ביחס לחללית 2.

ג. תארו באופן מילולי את תנועתה של חללית 1 ביחס לחללית 2 אם $\alpha=2$.

9) עכביש הולך על דיסקה מסתובבת

עכביש נמצא במרכזה של דיסקה המסתובבת במהירות זוויתית $0.2\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$.
העכביש מתחיל לנוע במהירות קבועה ובקו ישר ביחס לדיסקה עד לקצה הדיסקה ברדיוס 2m. הזמן שלוקח לעכביש להגיע לקצה הוא 4 שניות.

א. מצאו את וקטורי מהירותו ותאוצתו של העכביש (ביחס למעבדה).

ב. הסבירו מדוע יש לעכביש תאוצה אם הוא הולך במהירות קבועה ביחס לקרוסלה.

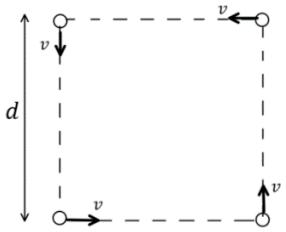
ג. הסבירו באופן איכותי את כל אחד מהרכיבים של תאוצת העכביש.

10) מהירות מינימאלית ללווין

לווין שעובר בסמוך לפני כדה"א מרגיש תאוצה $\vec{a}=-g\hat{r}$ (בהזנחת התנגדות האוויר).
מצאו מה צריכה להיות המהירות המינימלית של הלווין כך שלא יתנגש בפני כדה"א וישלים סיבוב.

11) משחק תופסת*

ארבעה ילדים משחקים תופסת, הם מתחילים לרוץ מארבע פינות של ריבוע בגודל $d\times d$. כל ילד רץ במהירות קבועה v לעבר הילד שמשמאלו (הכיוון הוא תמיד לכיוון הילד שמשמאלו).



א. תאר את תנועת הילדים וקבע היכן ייפגשו.

ב. כעבור כמה זמן ייפגשו?

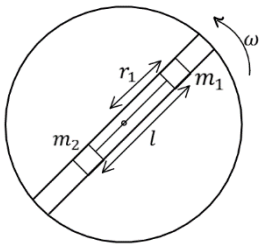
ג. כמה סיבובים עשה כל ילד עד למחצית מהזמן שנפגשו?

ד. מצא את וקטור המיקום של הילד המתחיל ברביע הראשון כפונקציה של הזמן בקואורדינטות קרטזיות.

רמזים: מהי הסימטריה בבעיה? איזה צורה יוצרים הילדים בכל רגע? רשום את המהירות של כל ילד בקואורדינטות פולריות.

12) שתי מסות מחוברות בחוט בתוך דסקה מסתובבת*

על דסקה המסתובבת במהירות זוויתית קבועה ω ישנה מסילה העוברת דרך מרכז הדסקה. במסילה ישנן שתי מסות m_1 , m_2 המחוברות בחוט באורך l. המערכת מונחת על שולחן אופקי (זו"א כיוון כוח הכובד לתוך הדף).



א. מצא את היחס בין המסות על מנת שרדיוס כל מסה יישאר קבוע במהלך התנועה.

כעת חותכים את החוט.

נסמן את הזמן שבו חותכים את החוט ב- $t=0$.

ב. רשום משוואה דיפרנציאלית שפתרונה ייתן את $r_1(t)$.

ג. פתור את המשוואה ומצא את $r_1(t)$.

הנח כי r_1 הוא מיקום המסה ברגע השחרור.

13) רוכב אופנוע*

רוכב אופנוע מתחיל את תנועתו ממנוחה.

מרחקו מנקודת ההתחלה משתנה לפי $r=Ct$, כאשר C קבוע.

בנוסף הרוכב מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω.

מצא את המרחק המקסימלי אליו יגיע הרוכב אם נתון מקדם החיכוך הסטטי μ_s.

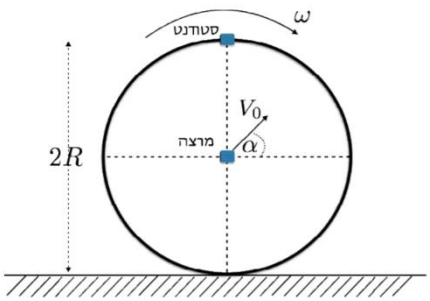
14) סטודנט ומרצה על גלגל ענק*

סטודנט נמרץ פוגש מרצה בעת ביקורו בפארק שעשועים.
הסטודנט נחוש בדעתו להראות שהוא יודע מכניקה ומשכנע את המרצה לטפס למרכז גלגל ענק. הסטודנט עולה על הקרון של הגלגל. הגלגל מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω עם כיוון השעון ורדיוסו R. כשהסטודנט מגיע לשיא הגובה המרצה זורק כרית במהירות התחלתית v_0 ובזווית α ביחס לאופק.
בזמן מסוים לאחר זריקת הכרית הסטודנט קופץ מהקרון כך שמהירותו היא המהירות המשיקית של הקרון ביחס למרצה. הסיכוי היחידי של הסטודנט לא להיפצע בעת הפגיעה בקרקע הוא אך ורק אם ינחת על הכרית.
הנח שתנועת הכרית היא כתנועת אבן.
לפני הזינוק של הסטודנט:

א. רשמו את ווקטור המיקום של הכרית בקואורדינטות קרטזיות ביחס למרצה.
ב. רשמו את ווקטור המיקום של הכרית בקואורדינטות פולריות ביחס למרצה.
ג. רשמו את ווקטור המיקום של הסטודנט בקואורדינטות קרטזיות ביחס למרצה.
ד. רשמו את ווקטור המיקום של הסטודנט בקואורדינטות פולריות ביחס למרצה.
ה. רשמו את ווקטור המיקום של הכרית בקואורדינטות קרטזיות ביחס לסטודנט.
ו. מה צריכה להיות גודלה של המהירות ההתחלתית v_0 והזווית α כדי שהכרית תעבור ליד הסטודנט לאחר זמן t_0.

הסטודנט מחליט לקפוץ כשהכרית עוברת לידו (אסור לו לתפוס אותה כשהיא לידו).

ז. הכרית יכולה לעבור ליד הסטודנט כשהיא לפני שיא הגובה, בשיא הגובה או אחריו. באיזה משלושת המקרים על הסטודנט לקפוץ על מנת לחסוך את הוצאות החיוב של האמבולנס? (נמקו את תשובתכם).
ח. על פי הסעיף בהינתן שהסטודנט והכרית בקרקע באותו הזמן.
מה הוא הקשר בין ווקטורי המהירויות של הסטודנט והכרית בעת הקפיצה כך שהסטודנט לא יפגע?
ט. חשבו את הגובה בו תתרחש הקפיצה.
בטאו את הגובה הנ"ל בעזרת קבועי הבעיה בלבד (t_0 הוא לא קבוע בעיה עבור שאלה זו).



15) קרוסלה**

חיפושית נעה על קרוסלה המסתובבת במהירות זוויתית קבועה ω_0.
רדיוס הקרוסלה R. החיפושית נעה מקצה הקרוסלה למרכזה במהירות קבועה v_0 ביחס לקרוסלה.

א. מצא את מיקום החיפושית בקורדינטות קרטזיות ובקורדינטות פולריות ביחס לצופים הבאים:
   i. צופה A- הנמצא על הקרוסלה בנקודת ההתחלה של החיפושית.
   ii. צופה B - הנמצא על הקרוסלה במרכזה.
   iii. צופה C - הנמצא במרכז הקרוסלה אך אינו מסתובב איתה.
   iv. צופה D - הנמצא בקצה הקרוסלה ואינו מסתובב עם הקרוסלה.

ב. מצא את המהירות והתאוצה ביחס לאותם צופים.

תשובות סופיות

1) א. $\vec{a}=-\left(\left(\Omega^2+\omega^2\right)A\sin\Omega t+\omega^2 l_0\right)\hat{r}+\left(2\Omega A\cos\Omega t\right)\hat{\theta}$

ב. $\theta<l_0\le\frac{\Omega^2+\omega^2}{\omega^2}\cdot A$ ג. $\theta<l_0\le 2m$

2) א. $\vec{r}=2At\hat{r}+At^2\cdot Bt\hat{\theta}$ ב. $\vec{a}=\left(2A-B^2At^4\right)\hat{r}+\left(5ABt^2\right)\hat{\theta}$

ג. $t=2\sec$

3) א. $r=v_0\cdot t\ ,\ \theta(t)=\omega\cdot t$ ב. $F_r=m\left(0-\omega^2 v_0 t\right)$

4) א. ביחס לדיסקה: $\theta'(t)=0\ ,\ r'(t)=R-\frac{1}{2}a_0t^2$,

ביחס למעבדה: $r(t)=R-\frac{1}{2}a_0t^2\ ,\ \theta(t)=\omega t$ ב. $T=m\left(a_0+\omega^2\left(R-\frac{1}{2}a_0t^2\right)\right)$

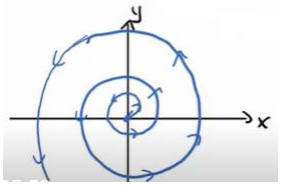
ג. $N_z=mg$

5) א. $|\vec{v}|\approx 1521\frac{m}{\sec}$ ב. $\ddot{r}\approx 7.44\frac{m}{\sec^2}\ ,\ \ddot{\theta}\approx -4.03\cdot10^{-4}\frac{rad}{\sec^2}$

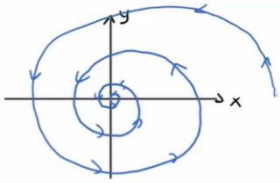
6) א. $\sum F_z=N_z-mg\ ,\ \sum F_\theta=N_\theta\ ,\ \sum F_r=0$ ב. $\ddot{r}-\dot{\theta}^2r=0$

ג. $A=B=\frac{d}{2}\ ,\ \dot{r}=\omega Ae^{\omega t}-\omega Be^{-\omega t}$ ד. $N_z=mg\ ,\ N_\theta=m\omega^2 d\left(e^{\omega t}-e^{-\omega t}\right)$

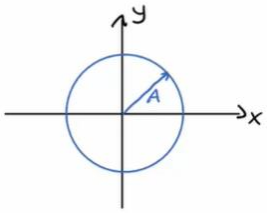
7) א. $r=A\left(\frac{\theta}{\omega}\right)^{\alpha}$ ב. $\alpha>0$:



$\alpha<0$:



ג. $N\approx 2.39$ $\alpha=0$:



8) א. $\vec{r}(t)=At^{\alpha}\left(-\cos\left(e^{ct}-1\right)\hat{x}-\sin\left(e^{ct}-1\right)\hat{y}\right)$

ב. $x(t)=-\frac{1}{2}At^{\alpha}\ ,\ y(t)=0$

$v_x(t)=-\frac{1}{2}A\alpha t^{\alpha-1}\ ,\ a_x(t)=-\frac{1}{2}A\alpha(\alpha-1)t^{\alpha-2}$

ג. תנועה בתאוצה קבועה בקו ישר.

9) א. $\vec{v}=0.5\hat{r}+0.1t\hat{\theta}$, $\vec{a}=-0.02\cdot t\hat{r}+0.2\hat{\theta}$

ב. כי הוא לא זז במהירות קבועה ביחס למעבדה.

ג. רכיב רציאלי : תאוצה רציאלית מהתנועה.

רכיב θ : $v_\theta=\omega r$ בגלל ש-r משתנה צריך תאוצה בכיוון θ שתגדיל את המהירות בכיוון θ אפילו ש-ω קבוע.

10) $\sqrt{gR_E}$

11) א. התנועה היא של הפינות של ריבוע הקטן ומסתובב. המפגש יהיה במרכז.

ב. $\frac{d}{v}$ ג. $\frac{\ln 2}{2\pi}$

ד. $\vec{r}(t)=\left(-\frac{vt}{\sqrt{2}}+\frac{d}{\sqrt{2}}\right)\left[\cos\left(\ln\left(\frac{d}{d-vt}\right)+\frac{\pi}{4}\right)\hat{x}+\sin\left(\ln\left(\frac{d}{d+t}\right)+\frac{\pi}{4}\right)\hat{y}\right]$

12) א. $\frac{m_1}{m_2}=\frac{r_2}{r_1}$ ב. $\ddot{r}_1=\omega^2 r_1$ ג. $r_1(t)=\frac{r_1}{2}\left(e^{\omega t}+e^{-\omega t}\right)$

13) $r_{max}=\sqrt{(\mu_s g)^2-(2C\omega_0)^2}\left(\frac{1}{\omega_0}\right)$

14) א. $x_1=v_0\cos\alpha\cdot t$, $y_1=v_0\sin\alpha\cdot t-\frac{1}{2}gt^2$

ב. $r=\sqrt{(v_0\cos\alpha\cdot t)^2+\left(v_0\sin\alpha t-\frac{1}{2}gt^2\right)^2}$, $\tan\theta=\frac{v_0\sin\alpha t-\frac{1}{2}gt^2}{v_0\cos\alpha t}$

ג. $x_2=R\cos\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t\right)$, $y_2=R\sin\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t\right)$ ד. $r=R$, $\theta=\frac{\pi}{2}-|\omega|\cdot t$

ה. $x_{1,2}=v_0\cos\alpha t-R\cos\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t\right)$, $y_{1,2}=v_0\sin\alpha t-\frac{1}{2}gt-R\sin\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t\right)$

ו. $\tan\alpha=\frac{\frac{1}{2}gt_0^2+R\sin\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t_0\right)}{R\cos\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t_0\right)}$

ז. אחריו. $v_0^2t_0^2=\left(\frac{1}{2}gt_0^2+R\sin\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t_0\right)\right)^2+R^2\cos^2\left(\frac{\pi}{2}-|\omega|t\right)$

ח. וקטורי המהירות חייבים להיות שווים בגודל ובכיוון.

ט. $y=\frac{v_0\cos\alpha}{|\omega|}$

15) א. ראו סרטון. ב. ראו סרטון.

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 7 - כוח גרר וכוח ציפה

תוכן העניינים

1. כוח גרר, הסבר ודוגמה עם צנחן 109
2. כוח ציפה 110
3. כוח סטוקס ..... (ללא ספר)
4. סיכום כוח גרר סטוקס וכוח ציפה 111
5. תרגילים מסכמים 112

כוח גרר, הסבר ודוגמה עם צנחן

רקע

כוח גרר הוא כוח מהצורה
$\vec{F} = -k\vec{v}$

כאשר $\vec{v}$ היא מהירות הגוף ו- k הוא קבוע כלשהו.

משוואת תנועה - משוואה הבוללת את x , v ו- a . בדרך מגיעים אליה ממשוואת הבוחות.

מהירות סופית - המהירות הקבועה שהגוף מגיע אליה לאחר זמן רב. (תאוצה שווה לאפס)

כוח סטוקס -כוח גרר שפועל על **כדור** בתוך נוזל
$\vec{F}_v = -6\pi\eta R\vec{v}$
η - צמיגות הנוזל
R - רדיוס הכדור

שאלות

1) הסבר ודוגמה עם צנחן
צנחן קופץ ממטוס ופותח מצנח.
נתון כי כוח החיכוך עם האוויר הוא: $\vec{F} = -k\vec{v}$.
א. מצאו את משוואת התנועה של הצנחן.
ב. מצאו את המהירות הסופית.
ג. מצאו את המהירות כפונקציה של הזמן אם הנפילה התחילה ממנוחה.

תשובות סופיות

1) א. $mg - kv_y = ma_y$ ב. $v_{yfinal} = \frac{mg}{k}$ ג. $v(t) = \frac{mg}{k}\left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right)$

כוח ציפה

רקע

כוח ציפה – כוח הפועל על גוף בנוזל. כיוונו הפוך לכוח הכובד.

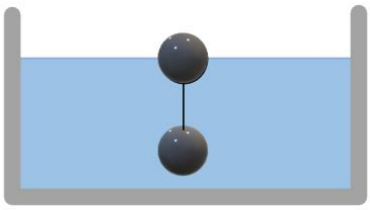
$$F_b = \rho_l V g$$

כאשר ρ_l היא צפיפות הנוזל ו- V הוא נפח הגוף.

שאלות

1) שני כדורים קשורים בחוט בתוך המים

שני כדורים בעלי נפח זהה $V = 20c.m^3$ קשורים בחוט זה לזה.
מניחים את הכדורים במים ולאחר זמן רב רואים שהמערכת התייצבה כך שכדור 1 נמצא כולו בתוך המים ורק חצי מנפחו של כדור 2 שקע לתוך המים, ראה איור.
המסה של כדור 1 גדולה פי 4 מזו של כדור 2.



א. מהי המסה של כל כדור?

ב. מהי צפיפות המסה של כל כדור?

תשובות סופיות

1) א. $m_1 = 24gr$, $m_2 = 6gr$ ב. $\rho_1 = 1.2\frac{gr}{c.m^3}$, $\rho_2 = 0.3\frac{gr}{c.m^3}$

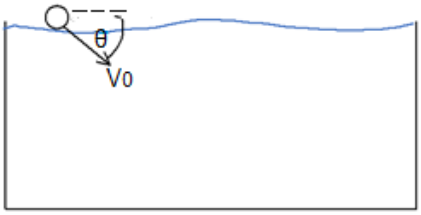
כדור נזרק לבריכה:

שאלות:

1) כדור נזרק לבריכה

כדור נזרק לתוך בריכה עם מהירות התחלתית v_0 בזווית θ עם פני המים.

נתונים:



צמיגות המים - η.

רדיוס הכדור - R.

מהירות התחלתית - v_0.

צפיפות המים - ρ_w.

צפיפות הכדור - ρ_b.

א. רשמו את משוואת התנועה של הכדור.

ב. מצאו את המהירות הסופית של הכדור.

ג. מצאו את העומק המקסימאלי אליו יגיע הכדור אם $\rho_b < \rho_w$.

תשובות סופיות:

1) א. משוואות התנועה הן: $C - kv_y = m\frac{dv_y}{dt}$ ו- $-kv_x = m\frac{dv_x}{dt}$

כאשר: $k = 6\pi\eta R$, $C = (\rho_b - \rho_w)g\frac{4\pi R^3}{3}$, $m = \rho_b\frac{4\pi R^3}{3}$

ב. $v_{x\,final} = 0$, $v_{y\,final} = \frac{C}{k}$

ג. $y_{max} = \frac{mC}{k^2}\left[\frac{v_0 k}{C}\sin\theta - \ln\left(\frac{C}{C - kv_0\sin\theta}\right)\right]$

תרגילים מסכמים:

שאלות:

1) כוח גרר עם חיכוך קינטי

גוף בעל מסה M נע על מישור אופקי במהירות התחלתית v_0 ימינה.
בין הגוף והמישור יש חיכוך קינטי ומקדם החיכוך הוא μ.
בנוסף פועל על הגוף כוח התנגדות של האוויר $f=-\alpha v$, α קבוע.

א. מצאו את משוואת הכוחות על הגוף.

ב. מהי מהירות הגוף בכל רגע?

ג. מה מיקום הגוף בכל רגע? הנח כי ברגע $t=0$ מיקום הגוף הוא x_0.

2) רכבת עוצרת

רכבת שמסתה 200 טון ומהירותה 30 מ׳/שנ׳, מתחילה לבלום כאשר כוח עוצר $F=-4000N-600\frac{N\cdot s}{m}$ פועל עליה.
כעבור איזה מרחק תעצור הרכבת בתנאים האלה?

3) כוח גרר ריבועי במהירות

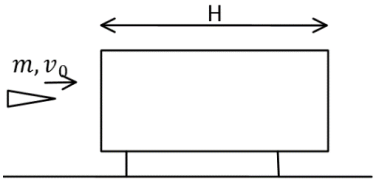
במהירויות גבוהות, גודל כח החיכוך שמפעיל האוויר על כדור הוא: $F_d=kv^2$.

א. מצאו את המהירות הסופית של כדור הנופל מגובה רב.
זורקים כדור ישר למעלה במהירות התחלתית השווה למהירות הסופית מסעיף א.

ב. מהי תאוצת הכדור כאשר מהירותו שווה לחצי ממהירותו ההתחלתית אם הכדור בדרכו למעלה?

ג. מהי תאוצת הכדור כאשר מהירותו שווה לחצי ממהירותו ההתחלתית אם הכדור בדרכו למטה?

4) כוח גרר מתכונתי למהירות בשלישית



קליע בעל מסה m נורה מלוע רובה ועובר דרך בול עץ בעובי H המקובע במקום. בכניסה לבול העץ מהירות הקליע v_0 וביציאה v_1.
במהלך התנועה בתוך העץ פועל על הקליע כוח מתכונתי למהירות בשלישית $f=-kv^3$ (k) קבוע.
נתון כי הקליע חודר לבול העץ במקביל לקרקע וכי ההשפעה של כוח הכובד על תנועת הקליע זניחה.

א. מצאו את מהירות הקליע כתלות בזמן בתוך בול העץ.

ב. מהו מיקום הקליע כתלות בזמן בתוך בול העץ?

ג. מהי מהירות הקליע בתוך הבול לאחר זמן ארוך ביחס ל- $\frac{m}{kv_0^2}$?

ד. בטאו את מהירות היציאה כתלות במהירות הכניסה, אורך הבול, מסת הקליע, ומקדם החיכוך .

5) צוללת

צוללת שמסתה 20 טון שטה בכיוון אופקי במהירות 10 מ'/שנ'.
ברגע מסוים, הצוללת מכבה את מנועה. מרגע זה פועל על הצוללת כוח עצירה בנתון בביטוי: $\vec{F}=-\left(\lambda v^2\right)\hat{v}$, כאשר $\hat{v}$ זה וקטור היחידה בכיוון התנועה.
זהו הכוח היחידי הפועל על הצוללת. הניחו כי בכיוון האנכי אין תנועה.
נתון כי 5 דקות לאחר כיבוי המנוע מהירות הצוללת קטנה פי 4.

א. מהי מהירות הצוללת כפונקציה של זמן?

ב. חשבו את הקבוע λ.

ג. מהו המרחק שעברה הצוללת בחמש הדקות מרגע כיבוי המנוע?

6) סירה עם כוח גרר אקספוננציאלי

סירה שמסתה 50 ק"ג החלה את תנועתה במהירות 5 מ'/שנ' ומואטת על ידי כוח חיכוך הנתון בנוסחה: $\vec{F}=-2e^{0.5v}\hat{v}$. יחידות המידה mks , v מהירות הגוף.
הניחו שכוח החיכוך הוא הכוח היחיד הפועל על הסירה.

א. כמה זמן יעבור עד לעצירת הסירה?

ב. מהי מהירות הגוף בחצי מהזמן הנ"ל?

תשובות סופיות:

א. $-\mu mg-\alpha v=ma$ ב. $\mathrm{v}(t)=\left(-\mu \mathrm{g}+\left(\mu \mathrm{g}+\frac{\alpha}{\mathrm{m}}\mathrm{v}_0\right)e^{-\frac{\alpha}{\mathrm{m}}t}\right)\frac{\mathrm{m}}{\alpha}$

ג. $x(t)=\frac{\mathrm{m}}{\alpha}\left((-\mu \mathrm{g})t+\left(\mu \mathrm{g}+\frac{\alpha}{\mathrm{m}}\mathrm{v}_0\right)\left(\frac{1}{-\frac{\alpha}{\mathrm{m}}}\right)e^{-\frac{\alpha}{\mathrm{m}}t}\right)+\mathrm{C}\ ,\ \mathrm{C}=x_0+\left(\frac{\mathrm{m}}{\alpha}\right)^2\left(\mu \mathrm{g}+\frac{\alpha}{\mathrm{m}}\mathrm{v}_0\right)$

1) $x(t)\approx 6.1\mathrm{km}$

2) א. $\mathrm{v}=\sqrt{\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{k}}}$ ב. $a=\frac{5}{4}\mathrm{g}$ ג. $a=\frac{3}{4}\mathrm{g}$

3) א. $\mathrm{v}(t)=\frac{1}{\sqrt{\frac{2\mathrm{k}}{\mathrm{m}}t-\frac{1}{\mathrm{v}_0{}^2}}}$ ב. $x(t)=\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{k}}\sqrt{\frac{2\mathrm{k}}{\mathrm{m}}t+\frac{1}{\mathrm{v}_0{}^2}}-\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{kv}_0}$

ג. $\mathrm{v}(t)\approx\frac{1}{\sqrt{\frac{2\mathrm{kt}}{\mathrm{m}}}}$ ד. $\mathrm{v}(t)=\frac{1}{\frac{\mathrm{kH}}{\mathrm{m}}+\frac{1}{\mathrm{v}_0}}=\mathrm{v}_2$

4) א. $\mathrm{v}(t)=\frac{1}{0.1+10^{-3}t}$ ב. $\lambda=20\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}}$ ג. $\Delta x=1.39\cdot 10^3\mathrm{m}$

5) א. $t=45.9\,\mathrm{sec}$ ב. $v\left(t=\frac{45.9}{2}\right)\approx 1.23\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 8 - תנועה הרמונית

תוכן העניינים

1. תנועה הרמונית פשוטה 115
2. תנועה הרמונית מרוסנת 118
3. תנועה הרמונית מאולצת 122
4. תרגילים מסכמים 125
5. תרגילים מסכמים (מטוטלות שונות) 127
6. תרגילים למתקדמים 128
7. תרגילים לבקשת סטודנטים 130

תנועה הרמונית פשוטה:

רקע:

משוואת התנועה:

$$-k(x-x_0)=m\ddot{x}$$

k ו$-m$- קבועים חיוביים כלשהם.

x_0 - קבוע שיכול להיות חיובי או שלילי.

x - משתנה כלשהו, יכול להיות גם זווית או כל משתנה אחר.

$\ddot{x}$ - נגזרת שניה של המשתנה.

חייב להיות מינוס לפני k.

פתרון המשוואה:

$$x(t)=A\cos(\omega t+\varphi)+x_0$$

x_0 - נקודת שיווי המשקל, הנקודה שבה: $\Sigma\vec{F}=0$.

A - אמפליטודה, המרחק המקסימאלי משוויי המשקל.

ω - תדירות זוויתית: $\omega=2\pi f=\frac{2\pi}{T}$.

φ - פאזה.

מציאת הקבועים בפתרון:

x_0 - אפשר למצא ישירות מהקבוע שבמשוואה או למצא אותו מסכום הכוחות שווה לאפס.

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}=\sqrt{\frac{\text{של המקדם } x}{\text{של המקדם } \ddot{x}}}$$

A, φ מוצאים מתנאי התחלה $x(0)$, $\dot{x}(0)$.

נוסחה למהירות המקסימאלית:

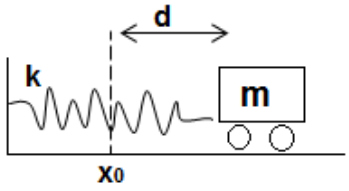
$$v_{max} = \omega A$$

אנרגיה:

$$E = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}k(x - x_0)^2 = \frac{1}{2}mA^2$$

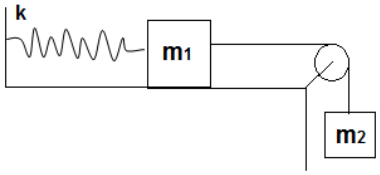
שאלות:

1) דוגמה - מסה מתנגשת במסה



מסה m מונחת על שולחן ללא חיכוך ומחוברת לקפיץ המחובר לקיר בעל קבוע קפיץ k.
מותחים את המסה מרחק d מהמיקום בו הקפיץ רפוי ומשחררים ממנוחה.
מצא את $x(t)$ של המסה.

2) דוגמה - מסה על שולחן מחוברת למסה תלויה



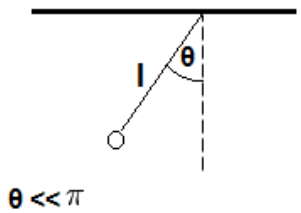
מסה m_1 מונחת על שולחן ללא חיכוך ומחוברת לקפיץ בעל קבוע k. מהמסה יוצא חוט העובר דרך גלגלת אידיאלית וקשור למסה נוספת התלויה באוויר M.

א. מצא את נקודת שיווי המשקל של המערכת (קבע את הראשית בנקודה שבה הקפיץ רפוי).

ב. מצא את תדירות התנודה של המערכת.

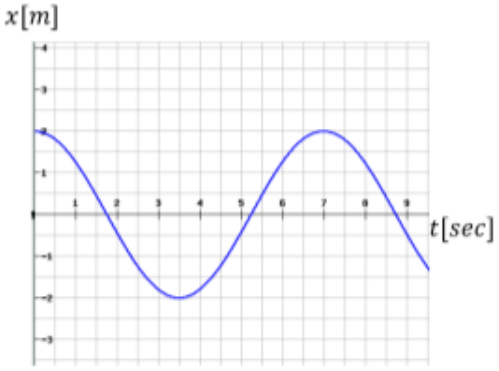
ג. מהי האמפליטודה המקסימלית האפשרית לתנועה כך שהמתיחות בחוט לא תתאפס במהלך התנועה?

3) דוגמה - מטוטלת מתמטית (עם אנרגיה)



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 θ (דרך אנרגיה).

4) גרף מיקום זמן



הגרף הבא מתאר את מיקומו כתלות בזמן של גוף הנע בתנועה הרמונית פשוטה.

א. מהי אמפליטודת התנועה?

ב. מהו זמן המחזור?

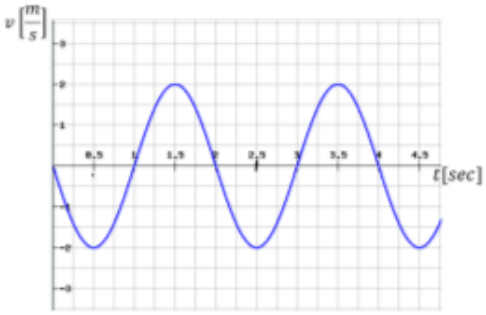
ג. מהי התדירות הזוויתית?

ד. מהי הפאזה?

ה. רשום נוסחה למהירות כתלות בזמן.

5) גרף מהירות זמן

מהירותו של גוף המתנדנד בתנועה הרמונית נתונה לפי הגרף הבא:



א. מתי מגיע הגוף לנקודת שיווי המשקל בפעם הראשונה?

ב. האם תאוצת הגוף ב- $t=1\text{sec}$ מקסימאלית?

ג. האם ב- $t=1.5\text{sec}$ האנרגיה קינטית מרבית?

ד. מהו הכוח ב- $t=2.5\text{sec}$?

ה. כמה מחזורי תנועה עשה הגוף ב-4 השניות הראשונות של התנועה?

תשובות סופיות:

1) $x(t)=-\frac{v_0}{2}\sqrt{\frac{2m}{k}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{2m}}t+\frac{\pi}{2}\right)+x_0$

2) א. $x=\frac{m_2 g}{k}$ ב. $\omega=\sqrt{\frac{k}{m_1+m_2}}$ ג. $A_{max}=\frac{g}{\omega^2}$

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

4) א. $A=2\text{m}$ ב. $T=7\text{sec}$ ג. $\omega\approx 0.898\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ ד. $\varphi=0$

ה. $v(t)=-1.80\cdot\sin(0.898\cdot t+0)$

5) א. $t=0.5\text{sec}$ ב. כן. ג. כן. ד. 0

ה. 2

תנועה הרמונית מרוסנת:

רקע:

משוואת התנועה:

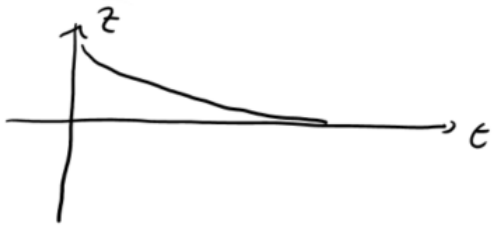
$$\ddot{z}+\Gamma\dot{z}+\omega_0^2 z=0$$

$$\Gamma=\frac{\lambda}{m}\ ,\ \omega_0^2=\frac{k}{m}$$

פתרון המשוואה מתחלק לשלושה מקרים:

(I). ריסון חזק: $\frac{\Gamma}{2}>\omega_0$

$$z(t)=e^{-\frac{\Gamma}{2}t}\left(Ae^{\sqrt{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2-\omega_0^2}\cdot t}+Be^{\sqrt{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2-\omega_0^2}\cdot t}\right)$$



אין תנודות.

(II). ריסון קריטי: $\frac{\Gamma}{2}=\omega_0$

$$z(t)=(A+B\cdot t)\cdot e^{-\omega_0\cdot t}$$

דעיכה הכי מהירה לשיווי משקל עם תנודה אחת.

III). ריסון חלש: $\frac{\Gamma}{2} < \omega_0$

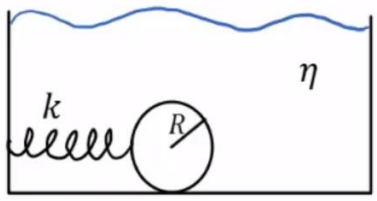
$$z(t) = Ae^{-\frac{\Gamma}{2}t}\cos(\tilde{\omega}t + \varphi)$$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$

יש תנודות דועכות, $\tilde{\omega}$ היא תדירות התנודות.

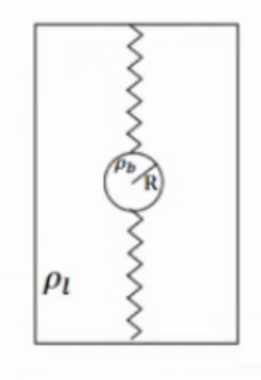
שאלות:

1) כדור במיכל מים



כדור בעל מסה m ורדיוס R נמצא בתוך מיכל מים ומחובר באמצעות קפיץ אופקי לדופן המיכל.
קבוע הקפיץ הוא k. בתנועת הגוף במים, מפעילים המים על הכדור כוח התנגדות המתכונתי והפוך למהירותו. כוח זה נקרא כוח סטוקס וגודלו הוא: $\vec{F} = -6\pi R\eta\vec{v}$. כאשר η היא צמיגות המים ו- R הוא רדיוס הכדור.
התייחס ל- m, k, η, R כנתונים ומצא את תדירות התנודות של הכדור בהנחה ש- $R < \frac{\sqrt{mk}}{3\pi\eta}$. הזנח את החיכוך בין הכדור לתחתית המיכל.

2) שני קפיצים בנוזל



כדור נמצא בתוך תיבה מלאה במים ומחובר עם קפיץ אידיאלי לקצה העליון של התיבה ועם קפיץ אידיאלי נוסף זהה לקצה התחתון של התיבה.
נתון: R - רדיוס הכדור, ρ_b - צפיפות המסה של הכדור,
ρ_l - צפיפות המסה של המים, K - קבוע שני הקפיצים ו- η - צמיגות המים.
(תזכורת: כאשר כדור נמצא בתוך נוזל פועלים עליו כוח ציפה: $F = \rho_l Vg$ וכוח סטוקס: $F = -6\pi\eta Rv$).

א. מצא את נקודת שיווי המשקל של המערכת.
ב. מה התנאי שיהיו תנודות הרמוניות?
מצא את התדירות בהנחה שתנודות אלו מתקיימות.
ג. מצא את התנאי בו יחזור הכדור הכי מהר לנקודת שיווי המשקל.

3) איבוד אנרגיה במחזור

בתנועה הרמונית מרוסנת קיים ריסון חלש כך שהאמפליטודה של התנועה יורדת ב-2.5 אחוז כל מחזור.
בכמה אחוז יורדת האנרגיה בכל מחזור?

4) משקולת במיכל מים תלויה מהתקרה

משקולת שמסתה: $M = 1\text{kg}$ נמצאת במיכל מים ומחוברת לתקרה באמצעות קפיץ בעל קבוע: $k = 20\frac{\text{N}}{\text{m}}$. כוח ההתנגדות שמפעילים המים הוא מהצורה של: $\vec{F} = -\lambda\vec{v}$ כאשר: $\lambda = 4\frac{\text{kg}}{\text{sec}}$ ו- $\vec{v}$ היא מהירות המסה.
הניחו שהמשקולת אינה יוצאת מהמים ואינה פוגעת ברצפה.

א. תוך כמה זמן תרד האמפליטודה לחמישית מגודלה ההתחלתי?
(הניחו שהפאזה היא אפס)

ב. לאחר כמה מחזורים זה יקרה?

5) מסה באמבט מים ודבש

מסה: $m = 1\text{kg}$ נמצאת באמבט מלא מים, המסה מחוברת באמצעות שני קפיצים זהים בעלי קבוע: $k = 25\frac{\text{N}}{\text{m}}$ לשתי דפנות האמבט ונעה ללא חיכוך עם ריצפת האמבט. מזיזים את המסה 0.5m מנקודת שיווי המשקל ומשחררים ממנוחה. התנגדות המים מפעילה כוח גרר: $\vec{F} = -\lambda\vec{v}$ כאשר: $\lambda = 10\frac{\text{kg}}{\text{sec}}$.

א. מהו העתק המסה כתלות בזמן?

ב. מחליפים את המים בדבש מה שמגדיל את λ פי $\sqrt{2}$. מזיזים שוב את המסה 0.5m ומשחררים, מהו העתק המסה כתלות בזמן?

תשובות סופיות:

1) $\tilde{\omega} = \sqrt{\frac{\text{k}}{\text{m}} - \left(\frac{3\pi\text{R}\eta}{\text{m}}\right)^2}$

2) א. $y_{eq} = \frac{\text{F}_b}{2\text{K}}$ ב. $\omega^* = \sqrt{\frac{2\text{K}}{\text{m}} - \left(\frac{6\pi\eta\text{R}}{2\text{m}}\right)^2}$ ג. $\frac{2\text{K}}{\text{m}} = \frac{6\pi\eta\text{R}^2}{2\text{m}}$

3) 5%

4) א. 1.6sec ב. בערך מחזור אחד.

5) א. $x(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{-5t}\cos\left(5t + \frac{\pi}{4}\right)$ ב. $x(t) = \left(\frac{1}{2} + \frac{5}{\sqrt{2}}t\right)e^{-5\cdot\sqrt{2}t}$

תנועה הרמונית מאולצת:

רקע:

כוח מאלץ:

$$\vec{F}(t) = F_0 \sin(\Omega t)$$

משוואת התנועה:

$$\ddot{z} + \Gamma \dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{F_0}{m} \sin(\Omega t)$$

פתרון משוואת התנועה:

$$x(t) = A(\Omega) \sin(\Omega t + \phi) + x_{\text{הומוגני}}(t)$$

$x_{\text{הומוגני}}(t)$ - הוא הפתרון של תנועה הרמונית מרוסנת שמתחלק לשלושת המקרים במצב עמיד נזניח את הפתרון ההומוגני.

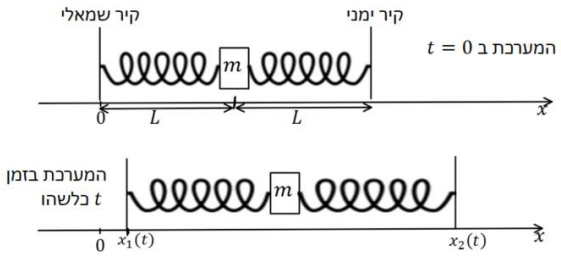
$$A(\Omega) = \frac{\frac{F_0}{m}}{\sqrt{(\omega_0{}^2 - \Omega^2)^2 + \Gamma^2 \Omega^2}}$$

$$\sin(\phi) = \frac{\Gamma\, \Omega}{\sqrt{(\omega_0{}^2 - \Omega^2)^2 + \Gamma^2 \Omega^2}}$$

תדירות תהודה - התדירות של הכוח המאלץ עבורה $A(\Omega)$ מקסימאלי.

שאלות:

1) מסה בין קירות זזים



מסה m מחוברת לשני קפיצים זהים בעלי קבוע k ואורך רפוי L משני צידיה. הקפיצים מחוברים לקירות הנמצאים במרחק L מהמסה משמאלה ומימינה והמערכת כולה מונחת על שולחן חלק (כוח הכובד לתוך הדף).

על המסה פועל כוח גרר: $F=-bv$. ב-$t=0$ הקירות מתחילים לזוז.

ראשית הצירים ממוקמת במרכז התנועה של הקיר השמאלי והכיוון החיובי ימינה.

מיקום הקירות כתלות בזמן הוא: $x_2(t)=2L+2d\sin(\omega t)$, $x_1(t)=d\sin(\omega t)$.

נתונים: m , b , k , L , d ו- $d<<L$.

א. מהי תדירות התנועה ומהי האמפליטודה?

ב. מה התנאי לתהודה בהנחה כי הריסון חלש מאוד?

2) מציאת תדירות ברבע אמפליטודה

מסה m מחוברת לקפיץ אופקי בעל קבוע k , המסה נעה על מישור חלק ללא חיכוך.

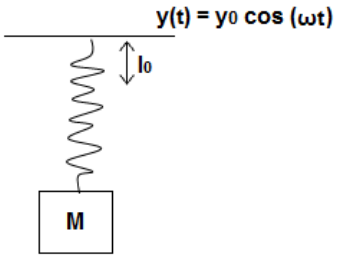
על המסה פועל כוח גרר: $f=-bv$ וכוח מאלץ: $F(t)=d\cdot\cos(\omega t)$.

מצא את תדירות הכוח בה אמפליטודת התנועה במצב העמיד תהיה רבע מהאמפליטודה המקסימלית.

הנח כי: m , k , b , d נתונים וכי: $b<<\sqrt{mk}$.

3) מסה תלויה על קרש נע

מסה M מחוברת באמצעות קפיץ אנכי לקרש אופקי הנע בציר ה- y לפי: $y(t)=y_0\cos(\omega t)$.



קבוע הקפיץ k ואורכו הרפוי l_0 נתונים.

מצא את מיקום המסה כפונקציה של הזמן.

תשובות סופיות:

1) א. $A(\omega)=\dfrac{\frac{3kd}{m}}{\sqrt{\left(\frac{2k}{m}-\omega^2\right)^2+\left(\frac{b}{m}\right)^2\omega^2}}$ ב. $\omega\sim\sqrt{\frac{2k}{m}}$

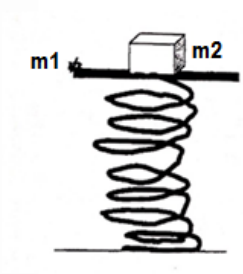
2) $\omega_{1,2}=\sqrt{\dfrac{B\pm\sqrt{B^2-4C}}{2}}$

3) $y(t)=\dfrac{\frac{F_0}{m}}{\frac{k}{m}-\omega^2}\cos\omega t+y'_0$

תרגילים מסכמים:

שאלות:

1) מסה על משטח על קפיץ אנכי



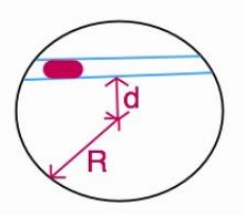
על קפיץ שקבועו k מונח משטח שמסתו m_1,
המשטח צמוד לקצהו של הקפיץ.
על המשטח מונח גוף שמסתו m_2.
מכווצים את הקפיץ בשיעור Δy ומשחררים.

א. מה צריך להיות Δy_{min} כדי שהגוף יתנתק מן המשטח באיזה שהוא שלב?

ב. הניחו: $m_2 = 0.06kg$, $m_1 = 0.04kg$, $k = 10\frac{Nr}{m}$, $\Delta y = 2\Delta y_{min}$
ומצאו את רגע הניתוק.

ג. באמצעות הנתונים המספריים מסעיף ב', מהו מקומו ומהירותו של המשטח ברגע שהגוף ניתק מן המשטח?

2) תנודה בתעלה בכדו"א



בתוך כדור הארץ נחפרה תעלה כבשרטוט.
מסת כדור הארץ M.
מהי תדירות התנודות הקטנות של מסה החופשיה לנוע בתעלה?

3) שתי מסות מחוברות בקפיץ**

שתי מסות m_1 ו- m_2 מחוברות בקפיץ בעל קבוע k ואורך רפוי l.
המסות נמצאות במנוחה על מישור אופקי חלק.
נותנים דחיפה ימינה למסה m_1 המקנה לה מהירות התחלתית v_0.

א. מהי תדירות התנודות של התנועה (כתלות בנתוני הבעיה)?
רמז: על מנת לפתור את המשוואות יש להחליף משתנים ל-

$$x_{c.m.} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2}{m_1 + m_2};\ x_{rel} = x_1 - x_2$$

ב. מצאו את מיקום המסה m_2 כתלות בזמן.

תשובות סופיות:

1) א. $\Delta y_{\min}=\frac{\left(m_1+m_2\right)}{k}$ ב. $t_1=\frac{1}{\omega}\cos^{-1}\left(-\frac{1}{2}\right)$

ג. $v(t)=\dot{\tilde{y}}(t)=-2\Delta y_{\min}\omega\sin(\omega t)$, $\Delta y_{\min}=\frac{\left(m_1+m_2\right)}{k}$

2) $\ddot{x}=-\left(\frac{M}{R^3}\right)(x-0)$

3) א. $\omega=\sqrt{\frac{k}{\mu}}$, $\mu=\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}$

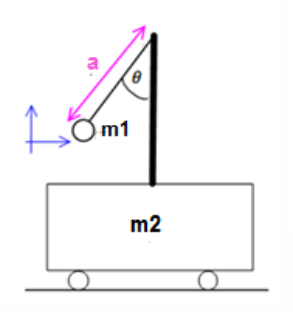
ב. $x_2(t)=\frac{m_1}{m_1+m}(l+v_0t)-\frac{m_1}{m_1+m_2}A\cos(\omega t+\varphi)$, $A=\frac{\sqrt{v_0^2+l^2\omega^2}}{\omega}$,

$\tan\varphi=-\frac{v_0}{\omega l}$

תרגילים מסכמים (מטוטלות שונות):

שאלות:

1) מטוטלת על עגלה נעה



עגלה בעלת מסה m_2 חופשיה לנוע על משטח אופקי ללא חיכוך.
אל העגלה מחובר מוט אנכי עליו תלויה מטוטלת מתמטית עם מסה m_1 ואורך חוט a.
משחררים את המסה (של המטוטלת) בזווית נתונה כאשר כל המערכת נמצאת במנוחה.

א. רשמו את מהירות המטוטלת במערכת העגלה כפונקציה של θ ו-$\dot{\theta}$.

ב. רשמו את מהירות העגלה והמטוטלת כפונקציה של θ ו-$\dot{\theta}$.

ג. רשמו את משוואת שימור האנרגיה המכאנית של המערכת.

ד. רשמו את משוואת שימור האנרגיה בתנודות קטנות.

ה. מצאו את תדירות התנודה של המסה M.

תשובות סופיות:

2) א. $v_x = \dot{\theta} a \cos\theta \ , \ v_y = \dot{\theta} a \sin\theta$

ב. $v_{1_x} = \left(1+\frac{m_1}{m_2}\right)^{-1} a\dot{\theta}\cos\theta \ , \ v_{1_y} = \dot{\theta} a \sin\theta$

ג. $E = \frac{1}{2} m_1 \left(\left(1+\frac{m_1}{m_2}\right)\left(1+\frac{m_1}{m_2}\right)\right)^{-2} a^2\dot{\theta}^2\cos^2\theta + \dot{\theta}^2 a^2 \sin^2\theta - m_1 g a \cos\theta$

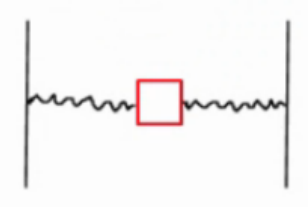
ד. $E = \frac{1}{2} m_1 \left(\left(1+\frac{m_1}{m_2}\right)^{-1} a^2\dot{\theta}^2 + \frac{ga}{2}\theta^2\right) - m_1 g a \frac{1}{2}$

ה. $\omega = \sqrt{\frac{\frac{ga^2}{2}}{\left(1+\frac{m_1}{m_2}\right)^{-1} a^2}}$

תרגילים למתקדמים:

שאלות:

1) מסה בין שני קפיצים עם אורך זניח

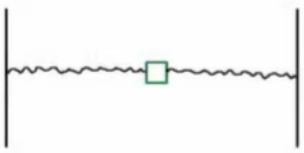


בין שני קירות במרחק 2L נמצאת מסה m המחוברת לקירות בקפיצים בעלי מקדם k ואורך רפוי זניח.

א. מצא את תדירויות התנודות הקטנות בציר ה-x.

ב. מצא את תדירויות התנודות הקטנות בציר ה-y.

2) מסה בין שני קפיצים (אורך רפוי לא זניח)**

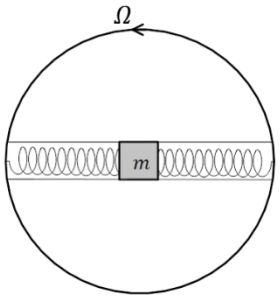


בין שני קירות במרחק 2L נמצאת מסה m המחוברת לקירות בקפיצים בעלי מקדם k ואורך רפוי l_0.

מצא את תדירות התנודות הקטנות בציר ה-y.

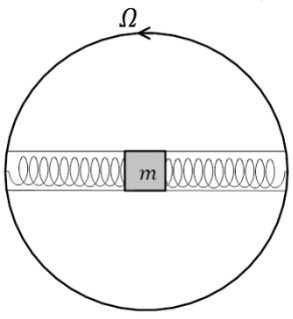
3) מסה בתוך חישוק מסתובב
(כולל קוריאוליס וקורדינטות פולריות)

גוף שמסתו m נמצא במרכז תעלה הנמצאת לאורך קוטרו של חישוק.
המערכת מונחת על השולחן כך שכוח הכובד לתוך הגוף.
הגוף מחובר לשני קפיצים זהים אחד מכל צד המצויים במצב הרפוי כאשר הגוף במרכז החישוק. קבוע הקפיצים הוא k.
מסובבים את החישוק במהירות זוויתית Ω ומרחיקים את המסה מעט מהמרכז.
רשום משוואת כוחות במערכת החישוק, מה התנאי לתנועה הרמונית ומהי תדירות התנועה אם התנאי מתקיים?
(מומלץ לפתור גם באמצעות ק. פולריות).



4) מסה בתוך חישוק מסתובב עם חיכוך
(כולל קואורדינטות פולריות, קוריאוליס, ותנועה מרוסנת)

גוף שמסתו m נמצא במרכז תעלה הנמצאת לאורך קוטרו של חישוק.
המערכת מונחת על השולחן כך שכוח הכובד לתוך הגוף.
הגוף מחובר לשני קפיצים זהים אחד מכל צד המצויים במצב הרפוי כאשר הגוף במרכז החישוק. קבוע הקפיצים הוא k.
מסובבים את החישוק במהירות זוויתית Ω ומשחררים את המסה ממנוחה במרחק d מהמרכז.
בין המסה והדופן של התעלה קיים חיכוך (אין חיכוך עם הבסיס).
מקדמי החיכוך הסטטי והקינטי הם: μ_k , μ_s.



א. רשום משוואת כוחות במערכת החישוק, מהם התנאים לתנועה הרמונית?
האם צריך את מקדם החיכוך הסטטי?

ב. מצא את המיקום כתלות בזמן בהנחת התנאים של סעיף א',
מהו מקדם האיכות של המערכת?
(מומלץ לפתור גם באמצעות ק. פולריות).

תשובות סופיות:

1) א. $\omega_x=\sqrt{\frac{2k}{m}}$ ב. $\omega_y=\sqrt{\frac{2k}{m}}$

2) $-\left(2k\frac{L\cdot l_0}{L}\right)y=\ddot{y}$

3) $\left(-2k-\Omega^2 m\right)x=m\ddot{x}$, $2k-\Omega^2 m>0$, $\omega=\sqrt{\frac{2k-m\Omega^2}{m}}$

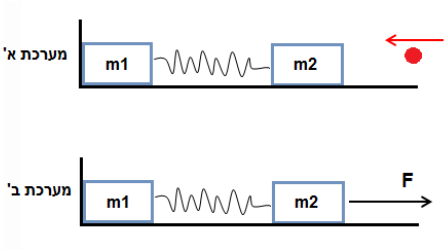
4) א. $\Omega^2\left(1+\mu_k{}^2\right)<\frac{2k}{m}$, $-2kx+m\Omega^2 x-2\mu_k m\Omega\dot{x}=m\ddot{x}$, לא כי $N=0$ כשהגוף נעצר.

ב. $x(t)=e^{-\frac{\Gamma}{2}t}\left(d\cos\left(\tilde{\omega}t\right)-\frac{d\sqrt{1-\omega_0{}^2}}{\tilde{\omega}}\sin\left(\tilde{\omega}t\right)\right)$, $Q=\frac{\omega_0}{\Gamma}=\frac{\sqrt{\frac{2k}{m}}}{2\mu_k\Omega}$.

תרגילים לבקשת סטודנטים:

שאלות:

1) קפיץ נמתח להתארכות מקסימלית



קליע בעל מסה זניחה נע במהירות לא ידועה לעבר מסה m_2 שמחוברת למסה m_1 דרך קפיץ בעל מקדם אלסטי k.

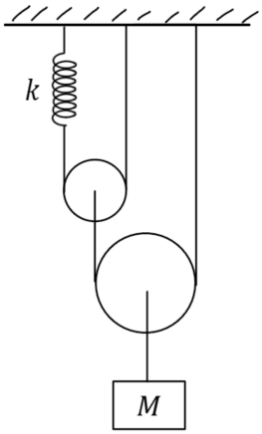
המסה m_1 ניצבת בצמוד לקיר כמתואר בשרטוט.

א. לאחר פגיעת הקליע הקפיץ מתכווץ במצב המקסימלי ומאבד d מאורכו.
מהי מהירות מרכז המסה מייד לאחר שהמערכת מתנתקת מהקיר?

ב. על מערכת בעלת נתונים זהים ואורך קפיץ רפוי l מופעל כוח קבוע ואופקי F לכיוון המסומן בציור.
מה ההתארכות המקסימלית של הקפיץ?

2) הרמונית עם גזירה של חוט *(רק למי שמכיר את הנושא של תאוצות לא שוות)*

במערכת הבאה הגלגלות והקפיץ אידיאלים.



קבוע הקפיץ הוא: $k = 50\frac{\text{N}}{\text{m}}$ והמסה: $M = 4\text{kg}$.

א. מצאו את התארכות הקפיץ במצב שיווי המשקל.

ב. מה ההעתק של המשקולת במצב שיווי המשקל (ביחס למצבה כשהקפיץ רפוי).

ג. מהי תדירות התנודות של המערכת?

ד. מותחים את המשקולת מטה 20cm מנקודת שיווי המשקל ומשחררים ממנוחה.
רשמו ביטוי למיקום של המשקולת כתלות בזמן.

תשובות סופיות:

1) א. $v_{c.m.}=\frac{\sqrt{\frac{k}{m_2}}d}{m_1+m_2}$ ב. $\Delta=\frac{F}{2k+k\frac{m_2-m_1}{m_1}}$

2) א. $0.2m$ ב. $0.05m$ ג. $3.54\frac{rad}{sec}$

ד. $x(t)=0.2\cos(3.54t)$ משיווי משקל.

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 9 - עבודה ואנרגיה

תוכן העניינים

1. שימור אנרגיה ומשפט עבודה ואנרגיה 132
2. חישוב עבודה לכוח לא קבוע 136
3. חישוב כוח משמר מאנרגיה פוטנציאלית 138
4. איך בודקים האם כוח הוא משמר 139
5. נקודת שיווי משקל 140
6. ניתוח באמצעות גרפים של אנרגיות 142
7. חישוב אנרגיה פוטנציאלית מכוח משמר 144
8. הספק ונצילות 145
9. תרגילים מסכמים 148
10. תרגילים מסכמים כולל תנועה מעגלית 152

שימור אנרגיה ומשפט עבודה ואנרגיה

רקע

עבודה של כוח קבוע :

$$W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r} = \left|\vec{F}\right| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos\alpha = F_x\Delta x + F_y\Delta y + F_z\Delta z$$

כאשר α היא הזווית בין הכוח להעתק

הערות :

1. העבודה של כוח שמאונך להעתק (לתנועה) מתאפסת.
2. אם הגוף לא זז אז אין עבודה (לכן העבודה של החיכוך הסטטי היא תמיד אפס).

הקשר בין עבודה כוללת לאנרגיה קינטית :

$W_{\Sigma F} = \Delta E_k$ העבודה של **כל הכוחות** שפועלים על הגוף

$E_k = \frac{1}{2}mv^2$ אנרגיה קינטית

כוח משמר :

1. **העבודה שמבצע הכוח אינה תלויה במסלול**. היא תלויה רק בנקודה בה התחיל הגוף ובנקודה בה סיים הגוף את התנועה.
2. העבודה במסלול סגור מתאפסת.
3. יש לו אנרגיה פוטנציאלית $W_c = -\Delta U$

האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית $U_g = mgh$

האנרגיה הפוטנציאלית האלסטית $U_{el} = \frac{1}{2}kx^2$

כאשר x הוא ההתארכות של הקפיץ ממצב רפוי ו-k הוא קבוע הקפיץ

אנרגיה (מכאנית) כללית : $E = E_k + U$

U היא סכום כל האנרגיות הפוטנציאליות שקיימות בבעיה.

משפט עבודה אנרגיה: $E_i + W_{NC} = E_F$

W_{NC} העבודה של הכוחות הלא משמרים

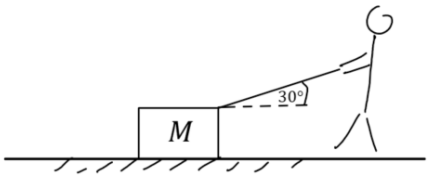
חוק שימור האנרגיה:

אם כל הכוחות משמרים (או העבודה של הכוחות הלא משמרים שווה לאפס) אז האנרגיה הכללית נשמרת

שאלות

1) אדם מושך ארגז

אדם מושך ארגז שמסתו $M = 5kg$ באמצעות חבל ובזווית 30 מעלות ביחס לקרקע.
מקדם החיכוך הקינטי בין הארגז לקרקע הוא: $\mu_k = 0.2$.
האדם מושך את הארגז לאורך שני מטרים. הכוח שמפעיל האדם הוא $80N$.



א. מהי העבודה שביצע האדם?
ב. מהי העבודה שביצע כוח החיכוך?
ג. מהן העבודות שביצעו כוח הכובד והנורמל מהמשטח?
ד. מהי העבודה הכוללת שנעשתה על הארגז?

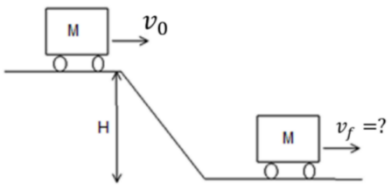
2) מהירות הארגז

בדוגמה הקודמת, אדם מושך ארגז, חשב את מהירות הארגז לאחר שהאדם משך אותו 2 מטרים אם ידוע שהוא התחיל ממנוחה.

3) חישוב עבודה של כוח הכובד

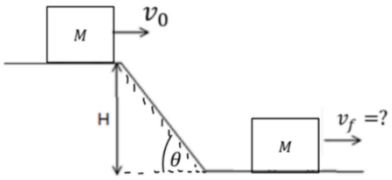
אבן בעלת מסה $2kg$ נופלת מגג בניין בגובה 10 מטרים.
חשבו את העבודה שביצע כוח הכובד על האבן עד הפגיעה בקרקע.
חשבו פעם אחת באופן מפורש דרך המכפלה הסקלרית ופעם נוספת דרך האנרגיה הפוטנציאלית.

4) עגלה במדרון



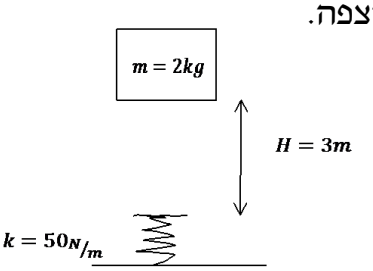
עגלה נעה על משטח ללא חיכוך.
העגלה מתחילה במעלה המדרון בגובה H
עם מהירות התחלתית v_0.
מצא את מהירות העגלה בתחתית המדרון.
נתונים: H , v_0.

5) קופסה במדרון עם חיכוך



קופסה יורדת במדרון משופע בעל זווית θ.
הנח כי מהירות הקופסה במעלה המדרון היא v_0
וגובהה ההתחלתי הוא H.
מצא את מהירות העגלה בתחתית המדרון.
הנח שהחיכוך הוא רק על החלק המשופע של התנועה.
נתונים: H , $\theta\mu_k$, v_0.

6) מסה נופלת על קפיץ

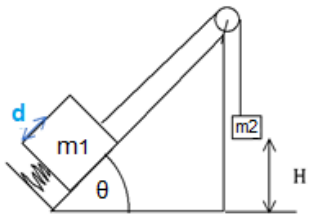


קפיץ חסר מסה, בעל קבוע קפיץ של $50\frac{N}{m}$, מחובר לרצפה.
משחררים ממנוחה מסה של $m = 2kg$ הנמצאת בגובה 3 מטר מעל הקפיץ.

א. מצא את הכיווץ המקסימאלי של הקפיץ.

ב. מה הגובה המקסימאלי אליו תגיע המסה לאחר הפגיעה בקפיץ.

7) שתי מסות מחוברות, מדרון וקפיץ



מסה m_1 נמצאת על מדרון משופע בזווית θ.
המסה מונחת על קפיץ בעל קבוע קפיץ k המכווץ ב- $\Delta x = d$.
אל המסה קשור חוט העובר דרך גלגלת אידיאלית ומחובר
למסה m_2 הנמצאת בגובה H מעל הרצפה.
המערכת משוחררת ממנוחה.
מצא את מהירות הפגיעה בקרקע של m_2.
נתון:

$m_1 = 1kg$, $m_2 = 2kg$

$H = 3m$, $k = 100\frac{N}{m}$

$\theta = 30^\circ$, $d = 30cm$

תשובות סופיות

1) א. $W=139J$ ב. $W_{fk}=-4J$ ג. $W_N=W_g=0$ ד. $W_T=135J$

2) $V_F\approx 7.35\frac{m}{sec}$

3) $W_C=\left|\vec{F}\right|\cdot\left|\Delta\vec{r}\right|\cos\alpha=200J$, $W_C=-\Delta U=-\left(U_F-U_i\right)=200J$

4) $V_F=\sqrt{v_0^{\,2}+2gH}$

5) $V_F=\sqrt{v_0^{\,2}+2gH\left(1-\mu_k\cot\left(\theta\right)\right)}$

6) א. $\Delta x=2m$ ב. $mgH=mgh$

7) $V=5.745\frac{m}{sec}$

חישוב עבודה לכוח לא קבוע

רקע

$$W = \int \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int \left(F_x \,\mathrm{d}x + F_y \,\mathrm{d}y + F_z \,\mathrm{d}z\right)$$

צריך גם משוואה של המסלול

שאלות

1) חישוב עבודה במסלולים שונים

חשב את העבודה שמבצע הכוח: $\vec{F} = xx + yxy$ בין הנקודה $A(0,0)$ לנקודה $B(2,4)$:

א. דרך המסלול של הקו הישר המחבר בין הנקודות.

ב. דרך מסלול המקביל לציר ה-x עד לנקודה $C(2,0)$ ולאחר מכן דרך המסלול המקביל לציר ה-y עד לנקודה B.

ג. דרך המסלול $y = x^2$.

ד. דרך המסלול $x(t) = 2t,\ y(t) = 4t^2$.

2) כוח בשלושה מימדים

נתון הכוח: $\vec{F} = zx^2\hat{x} + xz\hat{y} + 2y\hat{z}$.

א. חשב את העבודה של הכוח דרך המסלול היוצא מהנקודה $A(1,2,3)$ עד לנקודה $B(2,3,5)$ כאשר המסלול יוצא מ-A במקביל לציר ה-Y ועד לנקודה $C(1,3,3)$ ולאחר מכן מ-C במקביל לציר ה-Z ועד לנקודה $D(1,3,5)$ ולאחר מכן מהנקודה D במקביל לציר ה-X עד לנקודה B.

ב. חשב את העבודה של הכוח מהנקודה $A(0,0,-1)$ עד הנקודה $B(4,4,5)$ לאורך המסלול הנתון לפי המשוואות: $z(t) = 3t - 1\ ;\ y(t) = t^2\ ;\ x(t) = 2t$.

תשובות סופיות

1) א. $W_{A\to B}=\frac{4}{2}+\frac{4\cdot 8}{3}$ ב. $W_{A\to B}=18$ ג. $W_{A\to B}=2+\frac{64}{5}$

ד. $W_{A\to B}=2+\frac{64}{5}$

2) א. 26.67J ב. 128J

חישוב כוח משמר מאנרגיה פוטנציאלית

רקע

$$\vec{F} = -\vec{\nabla} \cdot U$$

שאלות

1) חישוב עבודה מתוך אנרגיה פוטנציאלית
על גוף מסוים פועל כוח משמר המתאים לאנרגיה הפוטנציאלית הבאה: $U(x,y) = 2x^2 - 6y^3$.
מצא את העבודה אותה צריך לבצע על מנת להביא את הגוף מהנקודה $(1,0)$ אל הנקודה $(2,3)$.

תשובות סופיות

1) $W_{ext} = 156J$

איך בודקים האם כוח הוא משמר

רקע

אם ורק אם $\vec{\nabla} \times \vec{F} = 0$, אז הכוח משמר.

הערה: צריך שכל רכיב יתאפס בנפרד

שאלות

1) דוגמה

נתון הכוח F: $\vec{F} = -2xyx + \left(x^2 - z\right)y + y\hat{z}$.

בדקו האם הכוח F משמר.

תשובות סופיות

1) משמר.

נקודת שיווי משקל:

רקע

נקודת שיווי משקל $\Sigma\vec{F}=0$ או $\frac{\partial U}{\partial x}=0$

שיווי משקל יציב - $U_x''>0$

שיווי משקל רופף - $U_x''<0$

שיווי משקל אדיש - אנרגיה קבועה

אם יש כמה ממדים אז $\vec{\nabla}U=0$

שיווי משקל יציב - כל הנגזרות השניות גדולות מאפס

שיווי משקל רופף - כל הנגזרות השניות קטנות מאפס

אוכף - חלק מהנגזרות השניות גדול מאפס וחלק קטן מאפס

שאלות:

1) שעון תלוי

שעון קיר תלוי באמצעות מסמר הנמצא בקצהו העליון.
ניתן לסובב את כל השעון (לא את המחוגים) סביב המסמר.

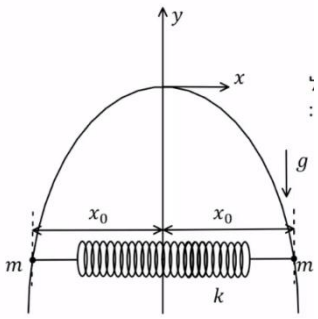
א. מצאו באילו מצבים השעון יהיה בשיווי משקל וקבעו עבור כל מצב איזה סוג שיווי משקל הוא.

ב. חזרו על סעיף א' אם המסמר תקוע במרכז השעון (השעון עדיין יכול להסתובב סביב המסמר).

2) אנרגיה פוטנציאלית בשיווי משקל

האנרגיה הפוטנציאלית של הגוף נתונה לפי הפונקציה הבאה: $U=(x-4)^2+x^3$.
מצאו את נקודת שיווי המשקל ומיינו אותה לסוגים הרלוונטיים.

3) קפיץ וחרוזים על תיל קשיח מכופף



תיל קשיח מכופף בצורת פרבולה המתאימה
לפונקציה: $y=-Ax^2$ כאשר A קבוע נתון.
על התיל מושחלים שני חרוזים זהים בעלי מסה m, אחד בכל צד.
קפיץ אופקי בעל קבוע k ואורך רפוי l מחבר בין החרוזים (ראה איור).
חשבו את המרחק האופקי x_0 של כל חרוז מציר ה-y במצב של שיווי משקל.
הניחו כי הקפיץ והחרוזים נמצאים תמיד באותו הגובה.
הדרכה: כתבו ביטוי לאנרגיה הפוטנציאלית כפונקציה של x בלבד.

תשובות סופיות:

1) א. כשהשען למטה שיווי משקל יציב וכשהשען הפוך ב-$180°$ שיווי משקל רופף. ב. השען בשיווי משקל אדיש.

2) $U''(x_1)=6\cdot\frac{4}{3}+2>0$, x_1 נק' מינימום $\Leftarrow$ ש.מ. יציב.

$U''(x_2)=-2\cdot 6+2<0$, x_2 נק' מקסימום $\Leftarrow$ ש.מ. רופף.

3) $x_0=\frac{kl}{2k-2mgA}$

ניתוח באמצעות גרפים של אנרגיות:

שאלות:

1) נקודה הכי ימנית

גוף שמסתו 6 ק"ג נע לאורך ציר x בהשפעת כוח יחיד הנגזר מהאנרגיה הפוטנציאלית: $U(x)=2x^4-36x^2$.

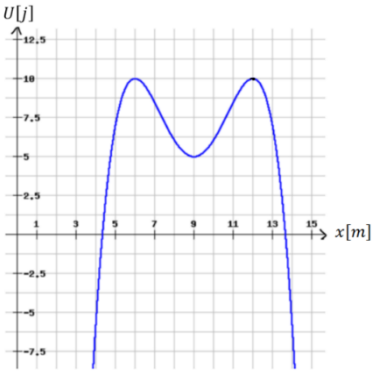
נתון שכאשר הגוף מגיע לנקודה בה $x=-1.5\text{m}$ מהירותו שווה ל- $v=3\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

א. מהי הנקודה הימנית ביותר במסלול של הגוף?

ב. חזור על סעיף א', אם ערך המהירות היה: $v=3\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

2) גמל דו דבשתי

כוח משמר פועל על כדור בעל מסה 625gr. הגרף הבא מתאר את האנרגיה הפוטנציאלית של הכדור כתלות במיקומו:



א. שרטטו באופן איכותי את הגרף של הכוח כתלות במיקום.

ב. תארו באופן מילולי את תנועת הכדור אם הוא משוחרר מ- $x=7\text{m}$ ממנוחה.

ג. מהי המהירות המינימלית שצריך לתת לכדור במצב של סעיף ב' על מנת שהכדור יגיע לאינסוף?

ד. מהן נקודות שיווי המשקל?

מיינו אותן לפי יציבותן וציינו מה המשמעות של כל סוג של שיווי משקל.

3) שני גופים בפוטנציאל אקספונציאלי ריבועי

שני גופים נמצאים על ציר ה- x ונתונים להשפעת הפוטנציאל: $U(x)=Axe^{-Bx^2}$

כאשר A , B הם קבועים חיוביים. נתון כי ברגע מסוים גוף אחד נמצא ב- $x=0$ והאנרגיה שלו היא אפס, והגוף השני נמצא ב- $x=-\sqrt{\frac{1}{B}}$ והאנרגיה שלו היא: $E=-\frac{A}{e}\sqrt{\frac{1}{B}}$. היכן ייפגשו הגופים? (בחר את התשובה הנכונה):

א. בתחום $-\sqrt{\frac{1}{B}}\le x\le 0$.

ב. הגופים לא ייפגשו אף פעם

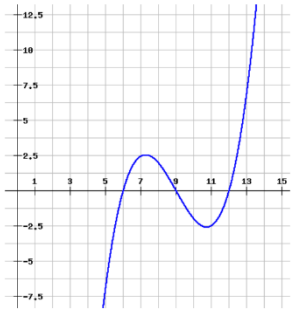
ג. בנקודה $x=-\sqrt{\frac{1}{B}}$.

ד. ב- $x=0$.

תשובות סופיות:

1) א. $x=-1.202\text{m}$ ב. $x=6.81\text{m}$

2) א.



ב. מתחיל בתאוצה בכיוון החיובי עד $x=9\text{m}$ ואז מתחיל להאט עד $x=11\text{m}$ שם עוצר רגעית ומסתובב חזרה. כך חוזר עד אינסוף.

ג. 2 מטר לשנייה.

ד. $x=6\text{m}$ לא יציבה , $x=9\text{m}$ יציבה , $x=12\text{m}$ לא יציבה.

3) א'.

חישוב אנרגיה פוטנציאלית מכוח משמר:

שאלות:

1) דוגמה

מצא את האנרגיה הפוטנציאלית של הכוח: $\vec{F} = -2xyx + \left(2 - x^2\right)y$

אם נתון ש: $U(0,0) = 0$.

2) תרגיל - חישוב אנרגיה פוטנציאלית תלת מימדית

נתון הכוח הבא:

$$\vec{F}(x,y,z) = A(y^2\hat{x} + (2xy + z^2)\hat{y} + 2yz\hat{z})$$

כאשר A קבוע.

א. הראו כי הכוח משמר.

ב. חשבו את פונקציית האנרגיה הפוטנציאלית אם נתון שהאנרגיה מתאפסת בראשית.

תשובות:

1) $U = x^2y - 2y$

2) א. הוכחה בסרטון. ב. $U(x,y,z) = -A\left(y^2x + z^2y\right)$

הספק ונצילות

רקע

הספק ממוצע:
W - העבודה

$$P_{avg} = \frac{W}{\Delta t}$$

הספק רגעי:
F - הכוח ו-v היא מהירות הגוף

$$P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

נצילות: $\eta = \frac{w_{out}}{E_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$

כאשר out מציין את החלק המנוצל על ידי המערכת ו in מציין את שכל מה שמושקע.

שאלות

1) כמה עולה להפעיל מזגן

כמה עולה להפעיל מזגן שההספק שלו 1 כוח סוס למשך שעה אחת?
יש לבדוק את תעריף חברת החשמל.

חשבון דו חודשי

פירוט החיובים / הזיכויים

מספר חשבון חוזה: [redacted]

גבאי מני

חשבון לתקופה מ- 13/01/2020 עד 15/03/2020

עמוד 2/2

חיוב בגין צריכה מחש"י (לא כולל מע"מ)

קריאות מונה מספר [redacted] מגורם הכפלה: 1

תעריף	סוג קריאה נוכחית	תאריכי קריאה נוכחית חודש/יום	תאריכי קריאה קודמת חודש/יום	ימים לחיוב	קריאה נוכחית	קריאה קודמת	צריכה בקוט"ש	מחיר לקוט"ש באגורות	סה"כ בש"ח
ביתי	רגילה	15/03	12/01	63	47387	46267	1120	44.84	502.21
סה"כ							1120		502.21
סה"כ בגין צריכה							1120		502.21 ש"ח

2) מכונית מאיצה מ-0 ל-100

מכונית מתחילה לנסוע ממנוחה ומגיעה למהירות של 100 קמ״ש ב-10 שניות.
מסת המכונית היא 1 טון. הניחו כי אין חיכוך עם האוויר.

א. מהי העבודה שהתבצעה על המכונית?

ב. מהו ההספק של המנוע בהנחה שהוא קבוע ומנוצל במלואו (הנחה לא נכונה)?

3) אופנוע נוסע במהירות קבועה כנגד התנגדות אוויר

אופנוע נוסע במהירות קבועה של 100 קמ״ש.
כנגדו פועל כוח ההתנגדות מהאוויר של 300 ניוטון.
מהו ההספק של המנוע, אם נניח שההספק מנוצל במלואו?

4) נצילות של 40 אחוז בדוגמה של המכונית המאיצה

בדוגמה "מכונית מאיצה מ-0 ל-100" מה ההספק של המנוע אם הנצילות שלו היא 40%?

5) הספק ממוצע לשנות מהירות

איזה כוח קבוע יש להפעיל על מכונית בעלת מסה של 2 טון,

כדי לשנות את מהירותה מ- $9\frac{\text{km}}{\text{hr}}$ ל- $27\frac{\text{km}}{\text{hr}}$ בתוך 4sec?

מהו ההספק הממוצע של כוח זה?

6) רכבת צעצוע חשמלית

רכבת צעצוע חשמלית מורכבת מ-10 קרונות.

הקרון הראשון והשני מכילים מנוע חשמלי ושוקלים 2 ק"ג כל אחד.

שאר הקרונות עמוסים בצעצועים ושוקלים 3 ק"ג כל אחד.

כל אחד מן המנועים מייצר הספק קבוע של 0.2KW.

א. כמה זמן ייקח לרכבת להגיע למהירות של 10 מטר לשנייה אם התחילה לנוע ממנוחה?

ב. מהי האנרגיה הקינטית של הקרון הראשון ומהי האנרגיה הקינטית של הקרון השני, כאשר הרכבת נעה במהירות שחישבת בסעיף א'?

ג. חשב את העבודה שביצע הכוח שפעל בחיבור בין הקרון הראשון לשני על הקרון השני בזמן ההאצה.

ד. חשב את העבודה שביצע הכוח שפעל בחיבור בין הקרון השני לשלישי על הקרון השלישי בזמן ההאצה.

ה. הרכבת מגיעה לעלייה עם שיפוע של 2 מעלות, מה צריך להיות הספק המנועים (בהנחה שהם שווים) על מנת שהרכבת תישאר במהירות קבועה של 10 מטר לשנייה?

7) הספק כאשר נתון מיקום כתלות בזמן

כוח יחיד פועל על גוף שמסתו 4kg, הכוח פועל בכיוון התנועה

והמיקום כתלות בזמן של הגוף הוא: $x(t)=2+3t+t^2$ ביחידות m.k.s.

א. מהי העבודה שמבצע הכוח במשך 3 השניות הראשונות של התנועה?

ב. מהו ההספק של הכוח ב- $t=2\text{sec}$?

תשובות סופיות

1) 45 אגורות.

2) א. $\Delta E_k \approx 385,800J = W_{\sum \vec{F}}$ ב. $p = 51.7HP$

3) $p = 11.18HP$

4) 135 כ"ס.

5) $F = 2500N, \quad \bar{p} = 16.76HP$

6) א. $\Delta t = 3.5sec$ ב. $E_{k_1=100J} = E_{k_2}$ ג. $W_{1\to 2} = 600J$

ד. $W_{3\to 2} = 1200J$ ה. $p = 97.7W$

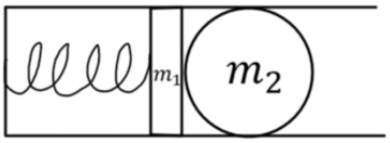
7) א. $W = 144J$ ב. $p(t=2) = 56W$

תרגילים מסכמים:

שאלות:

1) קפיץ יורה כדור

הלוע של רובה צעצוע מורכב מקפיץ בעל קבוע k ובוכנה בעלת מסה m_1.
בטעינה דוחפים כדור בעל מסה m_2 ודורכים את הקפיץ.
הכיווץ של הקפיץ הוא d.
ברגע הירי הקפיץ משוחרר ממנוחה.



א. באיזה רגע הכדור מנתק מגע מהבוכנה?

ב. מהי מהירות הכדור ברגע הזה?

2) כוח כפונקציה של מיקום, קפיץ וחיכוך*

מסה m נמצאת על מישור אופקי לא חלק ומחוברת לקפיץ בעל קבוע k.
החל מ- $t=0$ פועל על המסה כוח התלוי במיקום: $\vec{F}(x)=\left(30x^2-4x\right)\hat{x}$.
כל היחידות בשאלה הן יחידות סטנדרטיות.
ב- $t=0$ המסה נמצאת בראשית עם מהירות התחלתית v_0 והקפיץ רפוי.

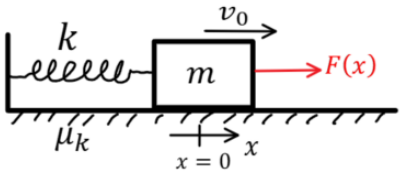
נתונים: $m=2kg$, $k=10\frac{N}{m}$, $\mu_k=0.3$, $v_0=5\frac{m}{sec}$.

א. רשמו ביטוי לתאוצת המסה כתלות במיקום $a(x)$, הנח כי התנועה תמיד בכיוון החיובי.

ב. מצאו את המיקום בו התאוצה של המסה מתאפסת.

ג. מהי העבודה שביצע הכוח מתחילת התנועה ועד אשר $x=0.5m$?

ד. מהי המהירות של המסה כאשר מיקומה $x=0.5m$?



3) כוח כפונקציה של זמן במישור משופע*

מסה $m=5kg$ נמצאת על מישור משופע לא חלק.

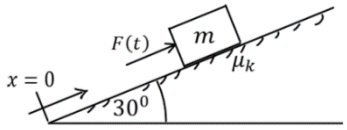
על המסה פועל כוח התלוי בזמן $F(t)$ שדוחף אותה במעלה המישור.

מהירות המסה ידועה והיא נתונה לפי הפונקציה: $v(t)=3t^2+2t$.

מקדם החיכוך הוא: $\mu_k=0.2$ ונתון כי: $x(t=0)=0$.

כל היחידות הן יחידות סטנדרטיות.

זווית המישור היא 30 מעלות.



א. (1) היכן נמצא הגוף ב-$t=2\sec$?

(2) מהו גודל הכוח F ברגע זה?

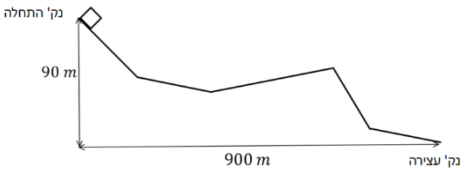
ב. מהו מיקום הגוף כאשר תאוצתו היא: $8\frac{m}{sec^2}$?

ג. מהי האנרגיה הקינטית של הגוף ברגע של סעיף ב'?

ד. מהי עבודת הכוח F מרגע $t=0\sec$ ועד ל-$t=3\sec$?

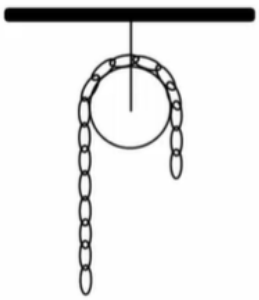
4) קופסה מחליקה על מקטעים ישרים*

קופסה משוחררת ממנוחה ומתחילה להחליק לאורך מסלול שאינו ידוע,
אך מורכב מקטעים ישרים בלבד.
בין הקופסה למשטח עליו היא מחליקה קיים
חיכוך והקופסה נעצרת בנקודה
המרוחקת 900m אופקית ו-90m מתחת
לנקודה בה התחילה.
חשבו את מקדם החיכוך, לא חסרים נתונים.

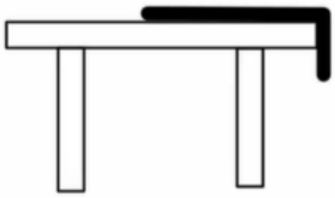


5) שרשרת על גלגלת

שרשרת בעלת מסה M ואורך L מונחת על גלגלת
אידאלית התלויה מהתקרה.
השרשרת מונחת כך שרבע מהשרשרת בצד אחד של
הגלגלת ושאר השרשרת בצד השני.
הנח שהחלק על הגלגלת עצמה זניח.
המערכת משוחררת ממנוחה.
מצאו את מהירות השרשרת ברגע שהקצה האחרון
שלה עובר את הגלגלת.



6) חבל מחליק משולחן אנרגיה ומשוואת תנועה*



חבל באורך L ומסה M מונח על שולחן חסר חיכוך כך שהקצה של החבל באורך d נשמט מחוץ לשולחן. החבל מוחזק ומשוחרר ממנוחה.

א. רשמו את האנרגיה הקינטית והאנרגיה הפוטנציאלית במהלך החלקת החבל.

ב. השתמשו בשימור אנרגיה ומצאו את משוואת התנועה של החבל.

ג. השתמשו במשוואת התנועה ומצאו את מהירות החלקת כל החבל מהשולחן למטה.

7) חישוב עבודה של כוח במסלול מעגלי ואלפטי

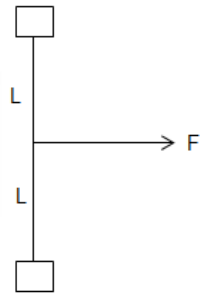
נתון הכוח הבא: $\vec{F}=a(2x+4y)x+b(4x-2y)y$

א. מצא תנאי על a ו- b כך שהכוח יהיה משמר.

ב. מצא את העבודה שעושה הכוח על גוף הנע במסלול סגור לאורך מעגל המתואר ע"י: $\vec{r}=R\cos\theta x+R\sin\theta y$ כאשר הגוף מתחיל את תנועתו מהנקודה $(R,0)$.

ג. מצא את העבודה שעושה הכוח על גוף הנע במסלול סגור לאורך אליפסה המתוארת ע"י: $\vec{r}=d\cos\theta x=k\sin\theta y$ כאשר הגוף מתחיל את תנועתו מהנקודה $(d,0)$.

8) חוט מושך שתי מסות מחוברות בחוט**



חוט חסר מסה באורך $2L$ מחבר שתי מסות הנעות במישור אופקי ללא חיכוך.
כוח אופקי קבוע ונתון מושך את החוט במרכזו, בכיוון מאונך לחוט.
הנח שהמסות מתנגשות ונדבקות בהתנגשות.
כמה אנרגיה הלכה לאיבוד בהתנגשות?

תשובות סופיות:

1) א. בנקודת הרפיון של הקפיץ. ב. $V=\sqrt{\frac{kd^2}{m_1+m_2}}$

2) א. $a_{(x)}=15x^2-7x-3$ ב. $x=0.738m$ ג. $W=0.75J$

ד. $V=4.64\frac{m}{s}$

3) א. (1) $x=12$ (2) $F=103.7N$ ב. $x=2m$ ג. $E_k=62.5J$

ד. $W=3935J$

4) 0.1

5) $V=\sqrt{\frac{3gL}{8}}$

6) א. $E=\frac{1}{2}MV^2-\frac{M}{2}g\frac{y^2}{2}$ ב. $\ddot{y}=\frac{g}{L}y$

ג. $V(y=L)=\sqrt{\frac{g}{L}\left(L^2-d^2\right)}$

7) א. $\vec{\nabla}\times\vec{F}=0\Rightarrow a=b$ ב. $W=R^2\left(0-4a\pi+4b\pi\right)$ ג. $W=k\cdot d\left(0-4a\pi+4b\pi\right)$

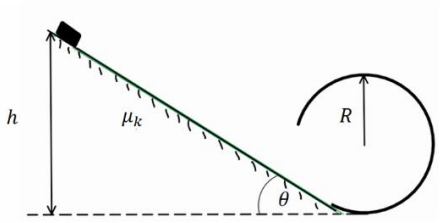
8) $\Delta E=F\cdot l$

תרגילים מסכמים כולל תנועה מעגלית:

שאלות:

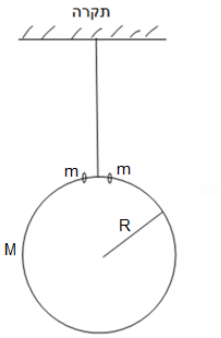
1) תנאי להשלים סיבוב עם החיכוך במישור משופע

גוף בעל מסה m מחליק על גבי מסילה המתוארת באיור.
מקדם החיכוך בין הגוף למישור המשופע הוא μ_k.
זווית המישור היא θ.
החלק המעגלי חסר חיכוך.
מצא את h הנמוך ביותר עבורו הגוף ישלים סיבוב בחלק העגול.



2) שני חרוזים על טבעת מתרוממת*

טבעת בעלת רדיוס R ומסה M תלויה מהתקרה באמצעות חוט. מניחים בקצה העליון של הטבעת שני חרוזים בעלי מסה זהה m.
החרוזים מתחילים ליפול ממנוחה לשני צדי הטבעת.
מצא את היחס בין המסות הדרוש על מנת שהטבעת תתרומם במהלך נפילת הכדורים.

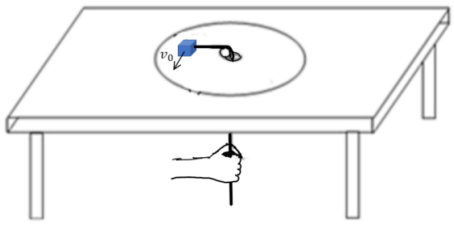


3) מסה מסתובבת על שולחן ונמשכת למרכז*

מסה m נעה על שולחן חסר חיכוך בתנועה מעגלית ברדיוס R ובמהירות v_0.
חוט קשור אל המסה הולך למרכז השולחן ועובר דרך גלגלת אידיאלית וחור בשולחן.
מושכים את החוט כך שהמסה מתקרבת למרכז.

א. מהי המהירות הזוויתית כתלות ב- r (המרחק ממרכז הסיבוב).
השתמשו בשיקולי כוחות בלבד. רמז: אין כוחות בציר $\hat{\theta}$.

ב. הוכיחו שהעבודה שהושקעה במשיכת החוט עד לרדיוס R_2 כלשהו הקטן מ- R זהה לשינוי באנרגיה הקינטית של המסה.
בסעיף זה ניתן להניח שהמהירות הרדיאלית קבועה.



תשובות סופיות:

1) $h_{min}=\frac{2.5R}{1-\frac{\mu_k}{\tan\theta}}$

2) $\frac{m}{M}\geq\frac{3}{2}$

3) א. $\omega(r)=\frac{v_0R}{r^2}$ ב. הוכחה.

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 10 - מתקף ותנע

תוכן העניינים

1. מהו תנע והחוק השני של ניוטון (ללא ספר)
2. מתקף 154
3. חוק שימור תנע וכוחות חיצוניים 156
4. סוגי התנגשויות 157
5. שימור תנע בהתנגשויות קצרות 159
6. סיכום ומקדם תקומה 160
7. התנגשויות קצרות ללא שימור תנע 161
8. תרגילים ישנים 162
9. תרגילים מסכמים 165

מתקף ותנע:

רקע

התנע של גוף:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

הניסוח הכללי יותר לחוק השני של ניוטון:

$$\sum \vec{F} = \frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}$$

המתקף של כוח:

$$\vec{J} = \int \vec{F}\,\mathrm{d}t$$

המתקף הוא השטח מתחת לגרף של הכוח כתלות בזמן
(לא לבלבל עם העבודה שהיא השטח מתחת לגרף של הכוח כתלות במיקום).

המתקף הכולל שפועל על גוף שווה לשינוי בתנע שלו:

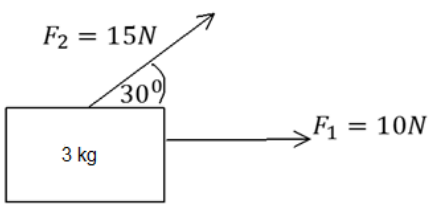
$$\vec{J}_{\Sigma\vec{F}} = \Delta\vec{p}$$

שאלות:

1) דוגמה לחישוב מתקף

שחקן בועט בכדור בעל מסה 2 ק"ג בכוח קבוע של 50 ניוטון.
זמן המגע בין הכדור לשחקן הוא 0.2 שניות.
מהי מהירות הכדור לאחר הבעיטה?

2) דוגמה 2- שני כוחות על גוף



נתון גוף בעל מסה של 3 קילוגרם.
על הגוף פועלים הכוחות כמתואר בציור
במשך זמן של 0.5 שניות.

א. מצא את המתקף שמפעיל כל כוח.

ב. מצא את המתקף השקול הפועל על הגוף.

ג. מצא את מהירות הגוף לאחר פעולת הכוחות אם התחיל ממנוחה.

3) מתקף של כוח ממוצע דוגמה

כדור בעל מסה של 1 ק"ג נזרק לעבר קיר במהירות של 2 מטר לשנייה.
הכדור פוגע בקיר וחוזר באותה המהירות.

א. חשב את המתקף שפעל על הכדור.

ב. מי מפעיל את המתקף הנ"ל?

ג. חשב את הכוח הנורמאלי הממוצע שמפעיל הקיר אם זמן הפגיעה הוא 0.2 שניות.

תשובות סופיות:

1) $V_f = \frac{5m}{sec}$

2) א. $\vec{J}_1 = 5N\cdot sec\,\hat{x}$, $\left|\vec{J}_2\right| = 7.5N\cdot sec$ ב. $|J| = 12.1N\cdot sec$

ג. $V_x = \frac{11.5}{3}\frac{m}{sec}$, $V_y = \frac{3.75}{3}\frac{m}{sec}$

3) א. $\vec{J} = \Delta\vec{P} = -4N\cdot sec\,\hat{x}$ ב. הכוח הנורמלי. ג. $\bar{N} = -20N\hat{x}$

חוק שימור תנע וכוחות חיצוניים:

רקע

אם סכום הכוחות החיצוניים על מערכת גופים מתאפס אז התנע הכולל של המערכת נשמר.

הנוסחה לחוק שימור התנע עבור שני גופים:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$$

בד"כ רושמים את הנוסחה פשוט לכל ציר בנפרד.

שאלות:

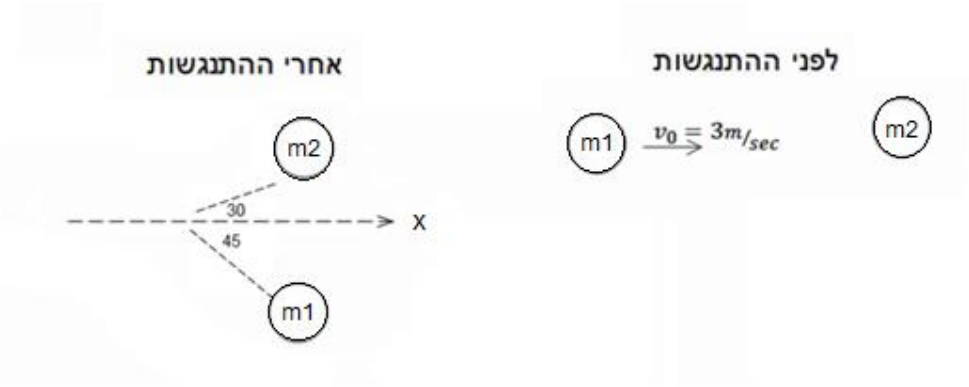
1) דוגמה לשימור תנע

כדור בעל מסה m_1 ומהירות V_0, פוגע בכדור שני בעל מסה m_2.
לאחר ההתנגשות, כדור 2 עף בזווית של 30 מעלות עם ציר ה-x
וכדור 1 עף בזווית של 45 מעלות מתחת לציר ה-x.

נתון: $m_1 = 3kg\ ,\ m_2 = 2kg\ ,\ V_0 = 3\frac{m}{sec}$.

א. מצא את גודל מהירות הגופים לאחר ההתנגשות.

ב. מצא את המתקף שפעל על כל גוף.



תשובות סופיות:

1) א. $V_1 = 1.55\frac{m}{sec}\ ,\ V_2 = 3.29\frac{m}{sec}$

ב. $\vec{J}_1 = -5.71N\cdot sec\,\hat{x} - 3.29N\cdot sec\,\hat{y}\ ,\ \vec{J}_2 = -\vec{J}_1$

סוגי התנגשויות:

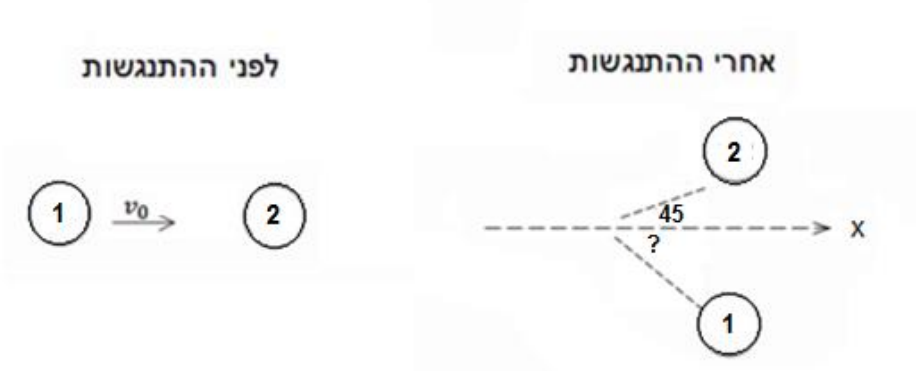
רקע

סוג ההתנגשות	התנגשות אלסטית	התנגשות אי-אלסטית
תכונות	שימור תנע ושימור אנרגיה $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$ $\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2$	רק שימור תנע $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$
מקרים מיוחדים	התנגשות חזיתית $v_1+u_1 = v_2+u_2$ התנגשות חזיתית בין שני גופים בעלי מסות שוות כשאחד הגופים במנוחה כל האנרגיה עוברת לגוף השני (הגוף הפוגע נעצר) התנגשות **שאינה** חזיתית בין שני גופים בעלי מסות שוות כשאחד הגופים במנוחה זווית בין המהירויות היא 90 מעלות	התנגשות פלסטית הגופים נעים יחד לאחר ההתנגשות $m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2=(m_1+m_2)\vec{u}$ דוגמאות: קליע שנתקע בבול עץ, שני כדורים שנדבקים רתע הגופים נעים יחד לפני ההתנגשות $(m_1+m_2)\vec{v}=m_1\vec{u}_1+m_2\vec{u}_2$ דוגמאות: קליע שנורה מרובה, פיצוץ

שאלות:

1) פיזור

כדור מספר 1 בעל מסה m ומהירות V_0 מתנגש אלסטית בכדור מספר 2 בעל מסה $3m$ הנמצא במנוחה.
הזווית של כדור מספר 2 עם ציר ה-x היא 45.
מצא את הזווית של כדור מספר 1 לאחר ההתנגשות.



תשובות סופיות:

1) $\theta = 71.56°$

שימור תנע בהתנגשויות קצרות:

שאלות:

1) זיקוק מתפוצץ

זיקוק נורה לאוויר בכיוון אנכי לקרקע.
ברגע שהזיקוק מגיע לשיא הגובה הוא מתפוצץ לשלושה חלקים שווים בגודלם.
משך זמן הפיצוץ הוא: 0.5sec.

מהירות החלק הראשון לאחר הפיצוץ היא: $50\frac{\text{m}}{\text{sec}}\hat{x}$ ומהירות החלק השני היא: $20\frac{\text{m}}{\text{sec}}\hat{x}-10\frac{\text{m}}{\text{sec}}\hat{y}+50\frac{\text{m}}{\text{sec}}\hat{z}$.
מהי מהירות החלק השלישי?

תשובות סופיות:

1) $\vec{u}_3=70\hat{x}-25\hat{y}+50\hat{z}$

סיכום ומקדם תקומה:

רקע

מקדם תקומה:

$$e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2}$$

מסמל את מידת האלסטיות של גופים בהתנגשות.

שאלות:

1) דוגמה עם מקדם תקומה
גוף בעל מסה m נע במהירות V על משטח אופקי חלק ומתנגש בגוף בעל מסה $3m$ הנמצא במנוחה.
נתון כי ההתנגשות חד ממדית ומקדם התקומה הוא 0.8.
מצא את מהירות הגופים לאחר ההתנגשות.

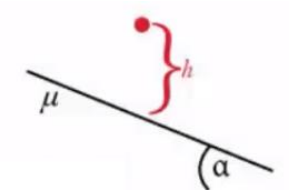
תשובות סופיות:

1) $u_2 = 0.45V$, $u_1 = -0.35V$

התנגשויות קצרות ללא שימור תנע:

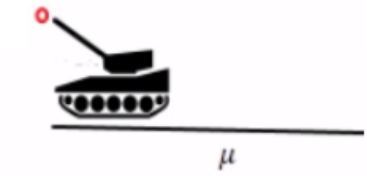
שאלות:

1) התנגשות קצרה במדרון



כדור בעל מסה m נופל אל מדרון לפי המתואר בשרטוט.
נתון כי הכדור אינו מתרומם חזרה מעל המדרון לאחר הפגיעה.
מצא את מהירות הכדור רגע לאחר הפגיעה.

2) טנק וחיכוך קינטי



טנק בעל מסה M יורה פגז בעל מסה m
בזווית α מעל האופק במהירות V.
הטנק מוצב על מישור בעל מקדם חיכוך קינטי נתון.
מה תהיה מהירותו של הטנק רגע לאחר הירייה?

תשובות סופיות:

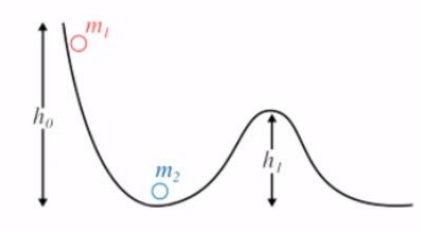
1) $u_p = \frac{m\sqrt{2gh}\sin\theta - \mu m\sqrt{2gh}\cos\theta}{m}$

2) $u = \frac{mv\cos\alpha - \mu mv\sin\alpha}{M}$

תרגילים ישנים:

שאלות:

1) גובה למעבר מכשול לשני כדורים



כדור משוחרר ממנוחה על פי הנתונים בשרטוט.
מה צריך להיות הגובה המינימלי ממנו הכדור משוחרר על מנת ששני הכדורים יעברו את המכשול כאשר:

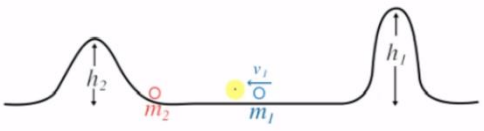
א. ההתנגשות פלסטית.

ב. ההתנגשות אלסטית.

(אין צורך לפתור את המשוואות).

2) מהירות למעבר מכשול לשני כדורים

בשאלה זו אין צורך לפתור את המשוואות.
שני כדורים מונחים כמתואר בשרטוט.
מה צריכה להיות המהירות ההתחלתית המינימלית של הכדור הימני על מנת שהכדור השמאלי יעבור את המכשול:



א. בהתנגשות פלסטית.

ב. בהתנגשות אלסטית.

כעת נתון כי המסה השמאלית כבדה פי 100 מהמסה הימנית.
בהינתן שההתנגשות אלסטית,
מה צריכה להיות המהירות המינימלית ההתחלתית על מנת ש:

ג. הכדור השמאלי יעבור את המכשול השמאלי.

ד. הכדור הימני יעבור את המכשול הימני.

3) לא אלסטי לא פלסטי

שני קרונות בעלי מסה 1 מונחים על גבי משטח ללא חיכוך. יורים את המסה הימנית במהירות 10 שמאלה.
נתון כי ההתנגשות הינה אי אלסטית/אי פלסטית.
מהי מהירותה של כל אחת מהמסות לאחר הפגיעה
אם נתון כי בהתנגשות אבדה חצי מהאנרגיה ההתחלתית?

4) יחסי מסות בהתנגשות אלסטית

שני כדורים מונחים על שולחן.
הכדור השמאלי נורה במהירות 10 אל עבר הכדור הימני בהתנגשות אלסטית.
תאר את מהירויות הגופים לאחר ההתנגשות במקרים הבאים:

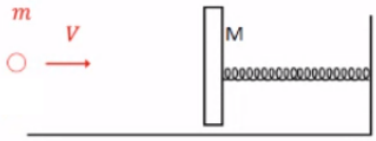
א. מסת הכדורים שווה.

ב. מסת הכדור השמאלי כפולה פי 100 מזו של הימני.

ג. מסת הכדור הימני כפולה פי 100 מזו של השמאלי.

5) קליע לקפיץ בלי חיכוך

קליע נורה אל קפיץ לפי הנתונים המופיעים בשרטוט.
מהו הכיווץ המקסימלי?
(אין חיכוך בשאלה).



6) רתע באקדח

אקדח בעל מסה M יורה קליע בעל מסה m במהירות V.
מהי מהירות האקדח לאחר יציאת הקליע?
כמה אנרגיה נוצרה בתהליך?

7) תנע לבעיטה בכדור

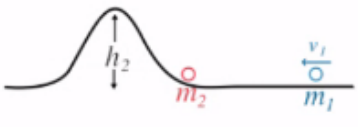
כדורגלן מניף את רגלו לעבר כדור.
מסת הכדור m ומסת הרגל M והפגיעה אלסטית.

א. מה צריכה להיות מהירות הרגל על מנת שהכדור יצא לדרכו אל השער במהירות U?

ב. פרשני ספורט רבים נוהגים לומר כי על דשא רטוב הכדור מאיץ מהר יותר. האם כך הדבר?

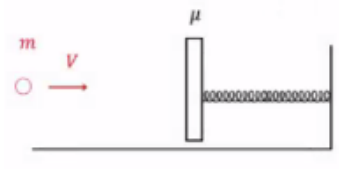
8) מהירות למעבר מכשול בפלסטי

מהי המהירות המינימלית שצריך לתת למסה הימנית על מנת שלאחר התנגשות פלסטית הגוף יעבור את המכשול?



9) קליע לקפיץ עם חיכוך

קליע נורה אל קפיץ לפי הנתונים המופיעים בשרטוט.
מהו הכיווץ המקסימלי בקפיץ,
אם נתון מקדם החיכוך בין המסה M לרצפה?



תשובות סופיות:

1) א. $\frac{1}{2}u_1^2 = gh_1$ ב. $\frac{1}{2}u_2^2 = gh_1$

2) א. $gh_2 = \frac{1}{2}u^2$ ב. $\frac{1}{2}u_2^2 = gh_2$ ג. $\frac{1}{2}u_2^2 = gh_2$
ד. $\frac{1}{2}u_1^2 = gh_1$

3) $u_1 = 100 - u_2$, $0 = 2u_2^2 - 200u_2 + 9950$

4) ראה סרטון.

5) $\frac{1}{2}(m+M)u^2 = \frac{1}{2}k\Delta^2$

6) $V_2 = -\frac{m}{M}V$, $E = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}MV_2^2$

7) א. $P \Rightarrow MV_1 = Mu_1 + mu$
$E \Rightarrow \frac{1}{2}MV_1^2 = \frac{1}{2}Mu_1^2 + \frac{1}{2}mu^2$
ב. לא.

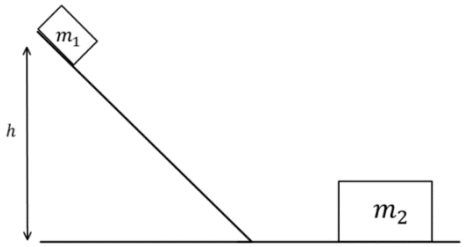
8) $P \Rightarrow MV_1 = (m_1 + m_2)u$
$E \Rightarrow \frac{1}{2}\{m+M\}u^2 = (m+M)gh$

9) $\frac{1}{2}(m+M)u^2 + (m+M)g \cdot \mu \cdot \Delta \cdot \cos(180) = \frac{1}{2}k\Delta^2$

תרגילים מסכמים:

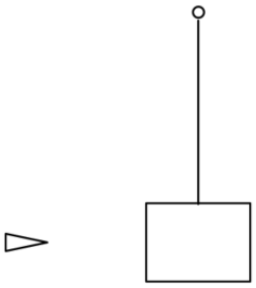
שאלות:

1) גוף יורד במדרון מתנגש ועולה חזרה



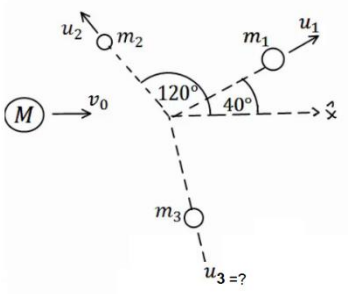
גוף בעל מסה $m_1 = 2kg$ משוחרר ממנוחה על מדרון משופע בגובה $h = 1m$.
בתחתית המדרון מונח גוף בעל מסה $m_2 = 5kg$.
הוגף הראשון פוגע בגוף השני בהגיעו למישור האופקי והגופים מתנגשים התנגשות אלסטית, עד לאיזה גובה יגיע הגוף הראשן בחזרה במעלה המדרון? אין חיכוך בין הגופים למשטחים.

2) קליע חודר מטוטלת בליסטית



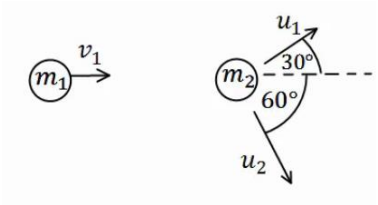
בול עץ בעל מסה $2kg$ קשור לחוט ותלוי אנכית במנוחה.
קליע בעל מסה $5gr$ נע במהירות $v_1 = 450\frac{m}{sec}$ פוגע בבול העץ, חודר אותו, ויוצא מצידו השני במהירות $u_1 = 150\frac{m}{sec}$.
לאיזה גובה מקסימאלי יגיע בול העץ?

3) פצצה



פצצה בעלת מסה $M = 13kg$ נעה באוויר במהירות קבועה $v_0 = 100\frac{m}{sec}$. ברגע מסוים, הפצצה מתפוצצת לשלושה חלקים קטנים יותר.
מסת החלק הראשון היא: $m_1 = 4kg$ והוא נע במהירות $v_1 = 80\frac{m}{sec}$ בזווית של $40°$ ביחס לכיוון המקורי.
מסת החלק השני היא: $m_2 = 2kg$ והוא נע במהירות $v_2 = 10\frac{m}{sec}$ בזווית של $120°$ ביחס לכיוון המקורי.
מסת החלק השלישי היא: $7kg$.
מצא את מהירות החלקיק השלישי.

4) איבוד אנרגיה

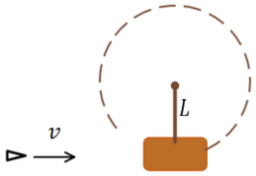


כדור בעל מסה $m_1 = 2kg$ ומהירות $v_1 = 10\frac{m}{sec}$ מתנגש בכדור בעל מסה $m_2 = 3kg$ הנמצא במנוחה.
לאחר ההתנגשות הכדור הראשון נע בכיוון $30°$ מעל לכיוון הפגיעה, והכדור השני נע בזווית $60°$ מתחת לכיוון הפגיעה (ראה איור).

א. מצא את מהירות הגופים לאחר ההתנגשות.

ב. האם ההתנגשות אלסטית? אם לא - כמה אנרגיה נאבדה בהתנגשות?

5) קליע חודר בול עץ וגורם לסיבוב אנכי (כולל תנועה מעגלית)



בול עץ בעל מסה M תלוי אנכית באמצעות מוט קשיח חסר מסה באורך L. המוט ביחד עם בול העץ יכולים להסתובב במעגל אנכי (ראה איור).
יורים קליע בעל מסה m במהירות אופקית v לעבר בול העץ.
הקליע חודר את הבול ויוצא מצידו השני במהירות v_f.
יחד עם הקליע יוצאת גם חתיכה מהעץ (במהירות הקליע) ובמסה של 5 אחוז ממסת בול העץ.
מהי המהירות המינימלית של הכדור עבורה בול העץ יוכל להשלים סיבוב אנכי (שימו לב שהמוט קשיח)?

6) אדם יורד מכדור פורח

אדם נמצא בכדור פורח בגובה קבוע באוויר.
משקלו של האדם הוא 70 ק"ג ומסתו של הכדור פורח (ללא האדם) היא 280 ק"ג (כולל הסל וכל אביזר אחר בכדור).
האדם משלשל חבל מהסל של הכדור פורח ומתחיל לרדת באמצעות החבל כלפי מטה.

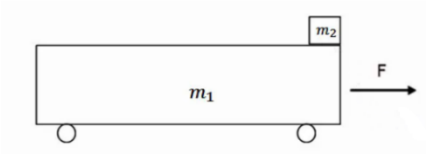
א. אם מהירותו של האדם בזמן הירידה בחבל היא 3 מטר לשנייה כלפי מטה וביחס לקרקע, מהי המהירות של הכדור פורח (גודל וכיוון)?

ב. מהי מהירות הכדור פורח אם האדם נעצר לפתע באמצע (לפני שהוא מגיע לקרקע)?

7) מסה על קרונית ואיבוד אנרגיה

נתון כוח F קבוע המושך עגלה בעלת מסה m_1 ללא חיכוך.

מעל העגלה נמצאת מסה m_2 ובין המסות יש חיכוך.



נתון: m_2 , m_1 , F , μ_k , μ_s .

א. מה הכוח F המקסימאלי עבורו המסה העליונה תחליק ביחס לתחתונה?

נניח כי הכוח F גדול מזה שחישבת בסעיף א'.

נניח גם כי הכוח הפועל במשך זמן T נתון והמסה העליונה אינה נופלת מהתחתונה.

ב. מה הכוח F המקסימאלי?

ג. מהי תאוצת הגופים, מהירותם ומיקומם כפונקציה של הזמן עד לזמן T?

ד. כמה אנרגיה הלכה לאיבוד בזמן הזה?

ה. מצא את מהירותם הסופית של הגופים (ב-$t > T$) בהנחה שהמסה העליונה עדיין לא נופלת.

8) מסה על שני קרונות

נתונים שני קרונות על משטח חלק.

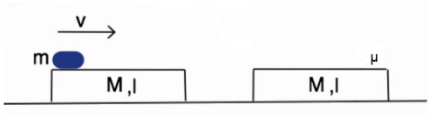
הקרון הימני במנוחה והקרון השמאלי נע לעברו במהירות v.

על הקרון השמאלי מונחת מסה הנעה יחד עד הקרון.

מקדם החיכוך בין המסה לקרון הימני נתונה.

בין המסה לקרון השמאלי אין חיכוך.

בזמן $t = 0$ הקרון השמאלי פוגע בקרון הימני ונצמד אליו (אך הוא יכול להיפרד ממנו לאחר מכן).



א. מתי תעבור המסה לקרון הימני?

ב. מה תהיה מהירותו הסופית של הקרון הימני?

ג. מהי תאוצת הקרון הימני? כמה זמן תאוצה זו נמשכת?

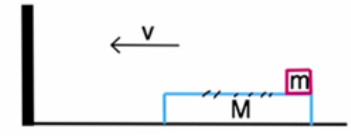
ד. האם סעיף ב' וג' תואמים בתשובותיהם?

9) מסות שומרות תנע ונדבקות לקיר

המסה m מונחת על גבי הקרונית M (אך אינה מחוברת אליה).

שתי המסות נעות יחד במהירות v על גבי משטח חלק לעבר קיר. התנגשות בקיר אלסטית.

מקדם החיכוך בין המסות הוא μ .

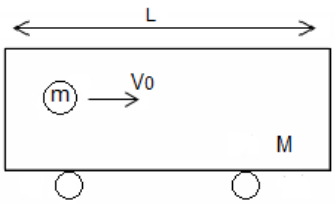


א. מה תהיה מהירות המסה M לאחר זמן רב בהנחה שהיא גדולה מהמסה m .

ב. ענה על סעיף א' בהנחה שהמסה M קטנה מהמסה m .

10) כדור בקרונית

כדור בעל מסה m ומהירות v_0 נע בתוך קרונית בעלת מסה $M=\alpha m$ ואורך L.
הכדור מתנגש בדופן הימנית של הקרונית התנגשות אלסטית.
(אין חיכוך בין הקרונית לרצפה).



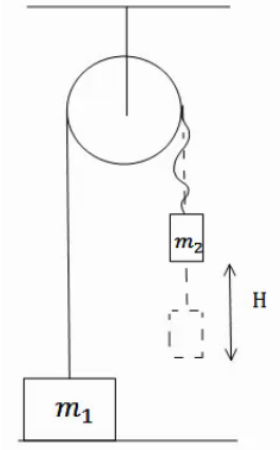
א. מהי מהירות הגופים לאחר ההתנגשות?
בדוק עבור: $\alpha = 0\ ,\ 1\ ,\ \infty$.

ב. כמה זמן יעבור מהפגיעה הראשונה בדופן לפגיעה השנייה בדופן השמאלית?

11) שתי מסות על גלגלת וחוט רפוי

שתי מסות $m_1\ ,\ m_2$ תלויות על גלגלת אידיאלית חסרת חיכוך.
המסה m_1 נמצאת על הקרקע במנוחה בעוד שהמסה m_2 תלויה באוויר.
מרימים את מסה m_2 גובה H נוסף כך שהחוט מתרופף ומשחררים אותה ממנוחה.

א. מצא את מהירות המסה m_2 לפני שהיא מגיעה לנקודה בה החוט נמתח.



ב. כעת החוט נמתח. הנח שהחוט אינו אלסטי, כלומר, האורך שלו קבוע ללא תלות בגודל המתיחות שלו כל עוד קיימת בו מתיחות כלשהי (והוא אינו רפוי כמו בסעיף א').
מצא את השינוי הכולל בתנע של שתי המשקולות (בין הקטע מיד לפני שהחוט נמתח לבין הקטע מיד אחרי שהחוט מתוח ושתי המסות זזות).

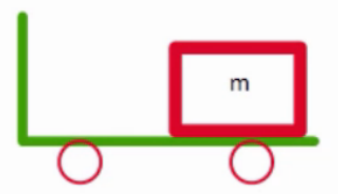
ג. מצא את המתקף שהפעילה התקרה על הגלגלת בזמן מתיחות החוט.

ד. לאיזה גובה תעלה m_1 בהנחה ש-$m_1 > m_2$ ו-m_2 אינה פוגעת ברצפה.

ה. מהו המתקף שמפעילה התקרה על הגלגלת מהרגע $t=0$ ועד לרגע בו m_1 הגיעה לשיא הגובה?

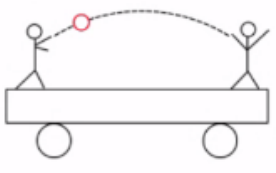
12) מסה מתנגשת במשאית ונופלת

מסה m מונחת על עגלה חסרת חיכוך בעלת אורך L
ומסה $5m$. המסה נוסעת במהירות v לכיוון שמאל והעגלה נייחת.
נתון כי ההתנגשות בין המסה לבין העגלה היא התנגשות אלסטית.
לאחר כמה זמן מרגע ההתנגשות תיפול המסה מהעגלה?



13) רתע בתוך עגלה

בתוך עגלה ללא חיכוך עומדים שני חברים המקובעים לרצפת הקרון.
מסת האנשים והקרון M ואורך הקרון L.
האדם זורק כדור בעל מסה m במהירות v אל עבר חברו.



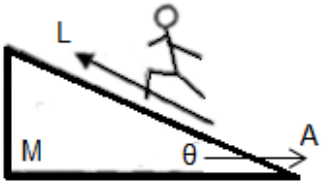
א. מה תהיה מהירות העגלה והאנשים שעליה לאחר זריקת הכדור?
ב. מה תהיה מהירות העגלה לאחר שהחבר יתפוס את הכדור?
ג. כמה זמן הכדור ישהה באוויר?
ד. מהו המרחק אותו עברה העגלה במהלך זמן זה?
ה. תאר מה יקרה אם החבר ימסור חזרה את הכדור לחברו.

14) אדם הולך על עגלה (מכיל תנועה יחסית)

אדם בעל מסה M עומד על עגלה בעלת מסה m.
האדם מתחיל ללכת במהירות v_R ביחס לעגלה.
מצא את מהירות האדם והעגלה ביחס לקרקע אם אין חיכוך בין העגלה לרצפה.

15) אדם על רמפה (מכיל תנועה יחסית)*

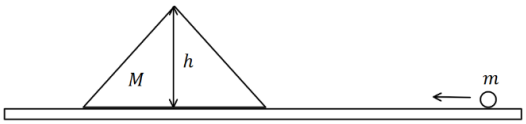
אדם שמסתו m רץ במעלה רמפה משופעת בזווית θ.
מסת הרמפה היא M, והיא מונחת על מישור חלק.
האדם מתחיל ממנוחה והזמן הדרוש לו בכדי לעבור דרך שאורכה L על פני הרמפה הוא T.



א. מהי תאוצת האדם ביחס לרמפה?
ב. עקב הריצה נהדפת הרמפה ימינה, בתאוצה לא ידועה A יחסית לקרקע.
בטאו את רכיבי התאוצה של האדם יחסית לקרקע בעזרת התאוצה A.
ג. כמה זזה הרמפה ימינה בזמן T?

16) כדור עולה על מדרון משולש

מדרון משולש בעל גובה $h=3m$ חופשי לנוע מעל משטח אופקי חלק (ללא חיכוך).
מסת המדרון היא: $M=15kg$.
מגלגלים כדור בעל מסה $m=5kg$ על המשטח לכיוון המדרון.
התייחס לכדור כאל גוף נקודתי.



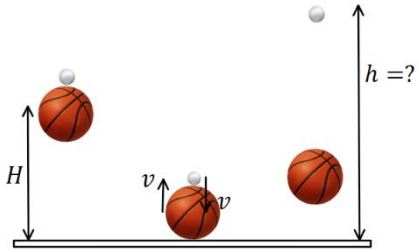
א. מה צריכה להיות המהירות שבה מגלגלים את הכדור כך שהוא יעצור (ביחס למדרון) בדיוק לפני שהוא עובר את שיא הגובה של המדרון?
ב. מהי מהירות המדרון ברגע שהכדור מגיע לשיא הגובה?
ג. מהי המהירות הסופית של המדרון והכדור?

17) מסה מחליקה בין שני טריזים

גוף בעל מסה m מחליק על שני טריזים זהים בעלי מסה M כל אחד.
המעבר מהטריז למשטח האופקי הוא חלק,
המשטחים חסרי חיכוך וחופשיים לנוע על השולחן (ראו סרטוט).
לאיזה גובה מקסימאלי יטפס הגוף על הטריז השני אם גובהו ההתחלתי הוא h?

18) כדור גולף על כדורסל

כדור גולף וכדור כדורסל מוחזקים במנוחה אחד מעל השני בגובה $H=1.5m$.
משחררים אותם ליפול ממנוחה.
מה יהיה הגובה המרבי אליו יגיע כדור הגולף
אם נניח שכל ההתנגשויות אלסטיות ומצחיות.
מסת כדור הגולף היא: $m=46gr$
ומסת הכדורסל היא: $M=624gr$.

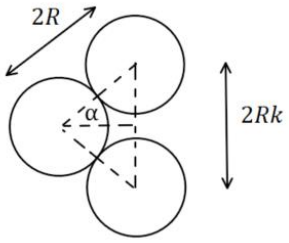


19) התנגשות אלסטית זהה בכל המערכות

במערכת אינרציאלית מסוימת האנרגיה הקינטית של שני גופים m_1 ו-m_2 היא E_k.
מצאו את האנרגיה הקינטית של הגופים במערכת אינרציאלית אחרת הנעה במהירות v_0 ביחס למערכת המקורית.
השתמשו בתוצאה שקיבלתם והראו כי אם במערכת מסוימת ההתנגשות היא אלסטית אז היא חייבת להיות אלסטית גם בכל מערכות הייחוס האינרציאליות האחרות.

20) דיסקה מתנגשת בשתי דיסקות זהות

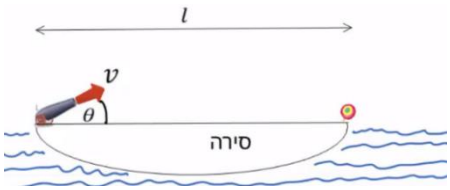
על מישור חלק נמצאות 3 דיסקות זהות בעלות מסה M ורדיוס R כל אחת.
הדיסקה השמאלית באיור נעה במהירות v ומתנגשת התנגשות אלסטית בו זמנית עם שתי הדיסקות האחרות כפי שמתואר באיור.
המרחק בין הדיסקות שנמצאות במנוחה לפני ההתנגשות מתואר על ידי $2Rk$ כאשר $1\le k\le 2$.



א. מהי גודלה של מהירות הדיסקה הפוגעת לאחר ההתנגשות כתלות בזווית α שבאיור?

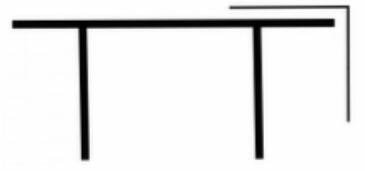
ב. עבור אילו ערכים של k הדיסקה תחזור אחורה/תיעצר במקום/ תמשיך קדימה?

21) סירה יורה פגז על מטרה בקצה השני



סירה באורך l נמצאת על מים שקטים, בקצה השמאלי של הסירה נמצא תותח צעצוע ובקצה הימני נמצאת מטרה.
התותח יורה פגז צעצוע בזווית θ ובמהירות v ביחס לקרקע.
מסת הפגז היא m ומסת הסירה היא M.
מצא את המהירות v הדרושה בשביל לפגוע בדיוק במטרה
(הזנח את גובה התותח וגובה המטרה והנח כי התותח מחובר לסירה).

22) שרשרת מחליקה משולחן

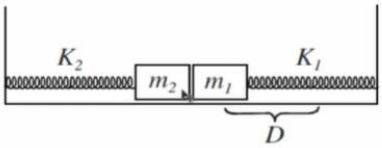


שרשרת בעלת אורך l ומסה m מחליקה ממנוחה משולחן כאשר חציה עדיין מונח על השולחן.

א. מה תהיה מהירות השרשרת ברגע הניתוק מהשולחן, בהנחה שאין חיכוך?

ב. ענה על סעיף א' בהנחה שמקדם חיכוך μ קיים בין השרשרת לשולחן.

23) שתי מסות ושני קפיצים

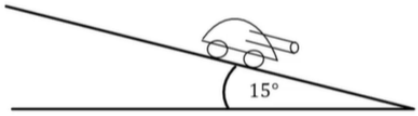


מסות מתחילות ממנוחה כבשרטוט.
המסה הימנית נמתחת מרחק D ימינה ומשוחררת.
כשהיא פוגעת במסה השנייה היא נדבקת אליה ושתיהן ממשיכות יחד.

א. מהו הכיווץ המקסימלי של הקפיץ השמאלי?

ב. מהו הכיווץ המקסימלי של הקפיץ הימני כאשר שתי המסות חוזרות ימינה?

24) טנק יורה פגזים ועולה במדרון**



טנק שמסתו 800 ק"ג (טנק קל מאוד) נמצא ברגע מסוים במנוחה על מדרון משופע בזווית של 15 מעלות. הטנק יורה שני פגזים במרווח של 2 שניות בין הירי הראשון לשני.
מסת כל פגז היא 20 ק"ג והוא נורה במהירות לוע של 400 מטר לשנייה במקביל ובמורד למדרון.
הניחו שלטנק גלגלים והחיכוך בינו למדרון זניח.
מה ההעתק המקסימאלי שיעשה הטנק במעלה המדרון?

תשובות סופיות:

1) 0.18m

2) 0.028m

3) $u = 155\frac{\text{m}}{\text{sec}}$

4) א. $u_1 = 8.66\frac{\text{m}}{\text{sec}}$, $u_2 = 3.34\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ב. לא אלסטית, $Q = 8.27\text{J}$

5) $v_{min} = \left[\left(m + 0.05M\right)v_f + 0.95M \cdot 2\sqrt{gL}\right] \cdot \frac{1}{m}$

6) א. $0.75\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ כלפי מעלה. ב. 0

7) א. $F \le \mu_s g\left(m_1 + m_2\right)$ ב. תאוצה: $a_1 = \frac{F}{m_1} - \frac{m_2}{m_1}\mu_k g$, $a_2 = \mu_k g$,

מהירות: $v_2\left(t\right) = a_2 t$, $v_1\left(t\right) = a_1 t$, מיקום: $x_2\left(t\right) = \frac{1}{2}a_2 t^2$, $x_1\left(t\right) = \frac{1}{2}a_1 t^2$

ג. $E = F \cdot \frac{1}{2}a_1 T^2 - \left(\frac{1}{2}m_2 v_2^{\,2}\left(T\right) + \frac{1}{2}m_1 v_1^{\,2}\left(T\right)\right)$ ד. $u_f = \frac{F \cdot T}{m_1 + m_2}$

8) א. $t = \frac{2l}{v}$ ב. $\tilde{u} = \frac{v\left(m + \frac{M}{2}\right)}{M + m}$

ג. $a = \frac{mg\mu}{M}$, $M \cdot v \cdot \left(m + \frac{M}{2}\right) = \left(m + M\right) \cdot M \cdot \frac{v}{2} + \left(m + M\right) \cdot mg\mu \cdot \tilde{t}$ ד. כן.

9) א. $\tilde{u} = \frac{v\left(M - m\right)}{M + m}$ חיובי. ב. $\tilde{u} = \frac{v\left(M - m\right)}{M + m}$, שלילי.

10) א. $\alpha = 0$: $u_2 = 2v_0$, $u_1 = v_0$; $\alpha = 1$: $u_2 = v_0$, $u_1 = 0$; $\alpha = \infty$: $u_2 = 0$, $u_1 = -v_0$

ב. $t = \frac{L}{u_2 - u_1}$

11) א. $v_2 = \sqrt{2gH}$ ב. $\Delta P_{Total} = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2}\sqrt{2gH}$ ג. $J_{ceiling} = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2}\sqrt{2gH}\,\hat{y}$

ד. $h = \frac{m_2}{m_1 - m_2}\sqrt{\frac{H}{2g}}$ ה. $J_{Totalceiling} = 0 + \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2}\sqrt{2gH} + \frac{m_1\left(m_1 + m_2\right)}{m_1 - m_2}\sqrt{32gH}$

12) $t = \frac{L}{v}$

13) א. $0 = mv + Mu$ ב. $mv + Mu = \left(m + M\right) \cdot 0$ ג. $L = t \cdot \left(v - u\right)$

ד. $x = u \cdot t$ ה. ראה סרטון.

14) $u_1 = \frac{-Mv_R}{m + M}$, $u_2 = \frac{mv_R}{m + M}$

15) א. $a'_P = \frac{2L}{T^2}$ ב. $a_{P_x} = \frac{2L}{T^2}\cos\theta - A$ ג. $x_{ramp}(T) = \frac{m}{m+M}L\cos\theta$

16) א. $v_0 = 8.94\frac{m}{sec}$ ב. $u = \sqrt{5}\frac{m}{sec}$ ג. $u_1' = 2\sqrt{5}\frac{m}{sec}$, $u_2' = -2\sqrt{5}\frac{m}{sec}$

17) $h'_{max} = \frac{M^2 h}{(M+m)^2}$

18) $h \approx 12.3m$

19) $E_k' = E_R - (m_1v_1 + m_2v_2)v_0 + \frac{1}{2}(m_1+m_2)v_0^2$

20) א. $u_1 = v\frac{1-2\cos^2\alpha}{1+2\cos^2\alpha}$

ב. קדימה: $\sqrt{2} < k \le 2$, במקום: $k = \sqrt{2}$, אחורה: $1 \le k < \sqrt{2}$

21) $v = \sqrt{\frac{gL}{\left(1+\frac{m}{M}\sin 2\theta\right)}}$

22) א. $v = \sqrt{\frac{3}{4}gl}$ ב. $v = gl\left(\frac{3-\mu}{4}\right)$

23) ראה סרטון.

24) $x(t=5.82) \approx 60m$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 11 - מרכז מסה

תוכן העניינים

1. הסבר בסיסי על מרכז מסה 174
2. דוגמה מרכז מסה של דיסקה עם חור 176
3. תנועה לפי הכוחות החיצוניים ..... (ללא ספר)
4. שני תרגילים 177
5. חישוב מרכז מסה של גופים גדולים בעזרת אינטגרל ..... (ללא ספר)
6. דוגמאות לחישוב מרכז מסה בעזרת אינטגרלים 178
7. תרגילים מסכמים 180

הסבר בסיסי על מרכז מסה:

רקע

$$\vec{r}_{c.m.} = \frac{m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2}{m_1 + m_2}$$

ניתן לרשום אותה לכל רכיב בנפרד , לדוגמה לרכיב x :

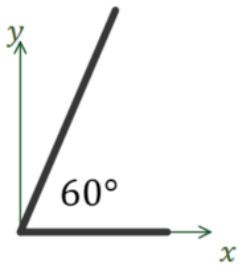
$$x_{c.m.} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{v}_{c.m.} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{a}_{c.m.} = \frac{m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2}{m_1 + m_2}$$

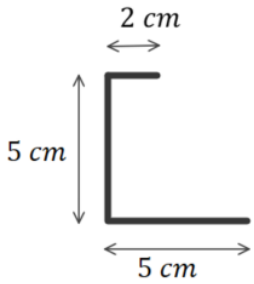
שאלות:

1) דוגמה - מרכז מסה של שני מוטות בזווית



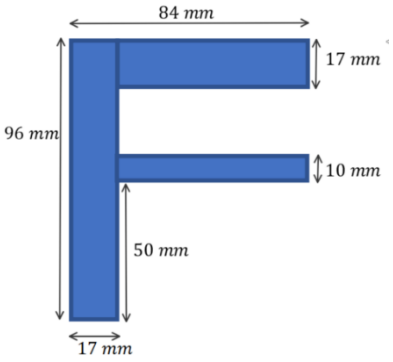
המערכת המתוארת באיור מורכבת משני מוטות בעלי צפיפות אחידה.
מוט ראשון באורך 3c.m נמצא לאורך ציר ה- x
ומסתו 2kg , מוט שני נמצא בזווית $60°$ עם ציר ה- x
החיובי אורכו 5c.m ומסתו 3kg .
מצאו את מרכז המסה של המערכת (ביחס לראשית).

2) דוגמה - מרכז מסה של האות נ



המערכת המתוארת באיור מורכבת ממוט בעל צפיפות מסה אחידה המכופף בצורת האות "נ" בתמונת מראה.
מצאו את מיקום מרכז המסה של המערכת ביחס לפינה השמאלית התחתונה.

3) דוגמה - מרכז מסה של F



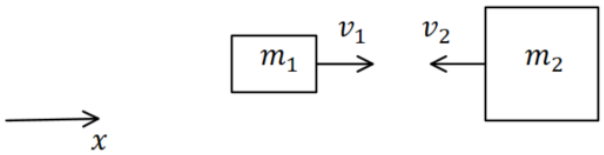
מרכיבים את האות F מלוחות בעלי צפיפות מסה אחידה ליחידת שטח.
המימדים של כל הלוחות נתונים באיור.

א. מצאו את מרכז המסה של המערכת ביחס לפינה השמאלית התחתונה של האות.

ב. מהו מרכז המסה של המערכת ביחס לפינה הימנית התחתונה של האות?

4) דוגמה - מהירות מרכז מסה בהתנגשות

שני גופים בעלי מסות m_1 ו-m_2 נעים על קו ישר אחד כלפי השני במהירויות v_1 ו- v_2. חשבו את מהירות מרכז המסה לפני ואחרי ההתנגשות.



תשובות סופיות:

1) $x_{c.m}=1.35c.m \quad , \quad y_{c.m}=1.3c.m$

2) $x_{c.m}=1.2c.m \quad , \quad y_{c.m}=1.875c.m$

3) א. $x_{c.m}=31mm \quad , \quad y_{c.m}=62mm$ ב. $x_{c.m}=14mm \quad , \quad y_{c.m}=62mm$

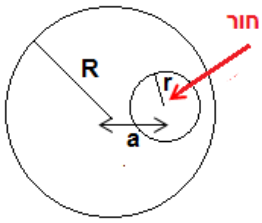
4) $\frac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2}$

דוגמה מרכז מסה של דיסקה עם חור:

שאלות:

1) דוגמה מרכז מסה של דיסקה עם חור

בדסקה בעלת רדיוס R ומסה M קדחו חור עגול בעל רדיוס r במרחק a ממרכז הדסקה. הנח כי צפיפות המסה אחידה בכל הדסקה.
מצא את מרכז המסה של הדסקה עם החור.



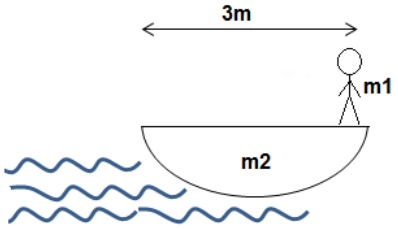
תשובות סופיות:

1) $x_{\text{c.m.}} = \dfrac{-a\left(\rho\pi r^2\right)}{\mathrm{M}-\left(\rho\pi r^2\right)}$

שני תרגילים:

שאלות:

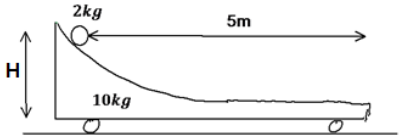
1) נער על סירה



אדם עומד בקצה סירה באורך 3 מטר.
מסת האדם היא 70 קילוגרם ומסת הסירה 100 קילוגרם.
האדם התקדם 2 מטרים לאורך הסירה.
כמה זזה הסירה?
(הזנח את החיכוך בין המים לסירה).

נתון: $m_1 = 70kg$, $m_2 = 100kg$.

2) כדור על קרונית



כדור מונח על קרונית משופעת הנמצאת במנוחה.
הכדור מונח בגובה $H = 1m$ ובמרחק של $5m$ מטר מקצה הקרונית.

מסת הקרונית: $m_1 = 10kg$, מסת הכדור: $m_2 = 2kg$.

א. מצא את העתק הקרונית כאשר הכדור מגיע לקצה.

ב. מצא את מהירות הגופים אם נתון שמהירות הכדור בקצה הקרונית היא רק בכיוון ציר ה-x.

תשובות סופיות:

1) $x = \frac{14}{17}m$

2) א. $\Delta x_1 = -\frac{10}{12}m$ ב. $u_2 \approx 4.08\frac{m}{sec}$, $u_1 \approx -0.82\frac{m}{sec}$

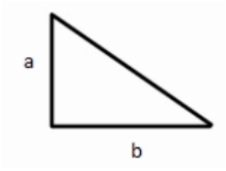
דוגמאות לחישוב מרכז מסה בעזרת אינטגרלים:

שאלות:

1) מרכז מסה של מוט עם צפיפות לא משתנה

חשב את מרכז המסה של מוט בעל אורך L וצפיפות מסה $\lambda(x)=\lambda_0\frac{x}{L}$.

2) מרכז מסה של משולש

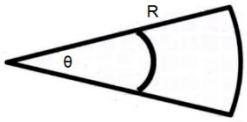


מצא את מרכז המסה של המשולש שבתמונה.

3) מרכז מסה של שער

שער חשמלי בעל מסה m ואורך l מונח על ציר שמרחקו d מסופו.
הסבר מדוע מחוברים לקצה השער משקולת כבדה
ומצא את מסתה אם נתון כי אורכה L.

4) מרכז מסה של גיזרה וחצי דיסקה

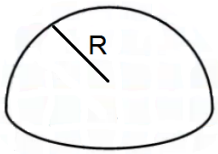


חשב את מרכז המסה של גיזרה עם צפיפות אחידה וזווית θ.

5) חישוב שטח גיזרה

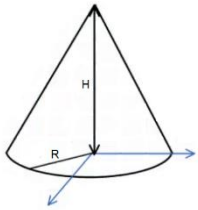
נתון מעגל שרדיוסו R.
חשב שטח של גיזרה עם זווית θ.

6) מרכז מסה של חצי כדור מלא



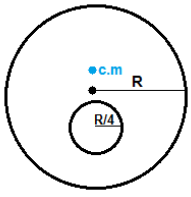
חשב את מרכז המסה של חצי כדור מלא בעל צפיפות אחידה.

7) מרכז מסה של חרוט מלא



חשב את מרכז המסה של חרוט מלא בעל צפיפות אחידה.

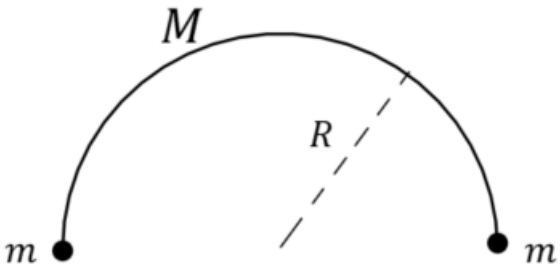
8) דיסקה עם חור



חשב את מרכז המסה של חרוט מלא בעל צפיפות אחידה.

9) חצי חישוק ושתי מסות

מצאו את מרכז המסה של חצי החישוק בעל מסה M ורדיוס R אשר בקצותיו חוברו שני כדורים קטנים בעלי מסה m.



תשובות סופיות:

1) $x_{c.m.}=\frac{2}{3}L$

2) $r_{c.m}=\left(\frac{1}{3}b,\frac{1}{3}a\right)$

3) $\frac{\left(\frac{L}{2}-d\right)m+\left(d+\frac{l}{2}\right)M}{m+M}=0$

4) $x_{c.m.}=\frac{4R\sin\frac{\theta_0}{2}}{3\theta_0}$

5) $S=\frac{\theta R^2}{2}$

6) $z_{c.m.}=\frac{3R}{8}$

7) $z_{c.m.}=\frac{H}{4}$

8) $z_{c.m.}=-\frac{1}{30}R$

9) $y_{c.m.}=\frac{2RM}{\pi(M+2m)}$

תרגילים מסכמים:

שאלות:

1) שני גופים מחוברים בקפיץ נלחצים לקיר

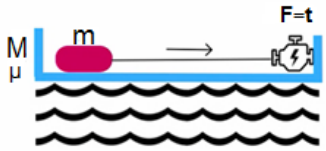
שני גופים מחוברים בקפיץ בעל קבוע k ונמצאים על משטח אופקי חסר חיכוך.
מסת הגוף הימני היא m_1, מסת הגוף השמאלי היא m_2 והוא צמוד לקיר.
האורך הרפוי של הקפיץ הוא l_0.

לוחצים את הגוף הימני עד שהקפיץ מתכווץ לאורך $\frac{l_0}{3}$ ומשחררים ממנוחה.

א. מתי תתנתק המסה השמאלית מהקיר?

ב. מהו מיקום מרכז המסה כתלות בזמן?

2) מנוע מושך מסה בסירה



על סירה (ללא חיכוך עם המים) מונחת מסה.
המסה מחוברת בחוט למנוע המחובר לסירה.
כוח המשיכה של המנוע משתנה בזמן,
מקדם החיכוך הסטטי ומקדם החיכוך הקינטי נתונים.

א. מתי תתחיל לנוע המסה?

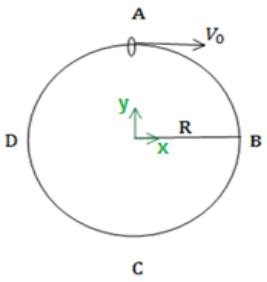
ב. מה תהיה תאוצת מרכז המסה? תאוצת הסירה? תאוצת המסה?

ג. לאחר שהמסה נעה החוט ניתק. ענה שוב על סעיף ב'.

ד. האם המסה והסירה ייעצרו בו זמנית?

3) חרוז מסתובב על חישוק שחופשי לנוע

חישוק בעל רדיוס R ומסה m מונח על שולחן אופקי חלק.
על החישוק ישנו חרוז המתחיל לנוע מהנקודה A ומסתו m גם כן.
ב-$t=0$ החישוק נמצא במנוחה ומהירותו ההתחלתית
של החרוז היא v_0 ימינה.

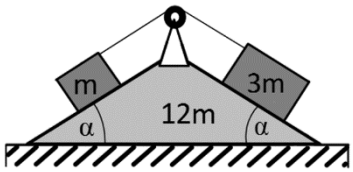


א. מצא את מיקום מרכז המסה של המערכת בתחילת התנועה.

ב. מצא את מהירות מרכז המסה כפונקציה של הזמן ואת מסלולה.

ג. מהן מהירויות החרוז והצינור כאשר החרוז נמצא בנקודות B, C, D ושוב ב-A ביחס לחישוק?

4) שני גופים על מדרון שנע

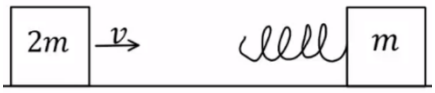


שני גופים בעלי מסות m ו-$3m$ נמצאים על מדרון דו-צדדי בעל זווית נטייה α משני צדדיו.
שני הגופים קשורים זה לזה בחוט אידיאלי דרך גלגלת אידיאלית המחוברת למדרון.
למדרון מסה $12m$ והוא יכול לנוע על הרצפה.
אין חיכוך בין הגופים למדרון ובין המדרון לרצפה.
משחררים את המערכת ממנוחה.

א. חשב את העתק המדרון, לאחר שהגוף הכבד עבר מרחק L במורד המדרון.
ב. מהי העבודה שביצע משקל הגוף הכבד ומשקל הגוף הקל במהלך התנועה?
ג. חשב את מהירות המדרון ביחס לרצפה ברגע זה.

5) מסה מתנגשת במסה עם קפיץ

גוף שמסתו $2m$ נע במהירות v על משטח חסר חיכוך לעבר גוף נוסף שמסתו m הנמצא במנוחה. בצידו השמאלי של הגוף במנוחה ישנו קפיץ רפוי בעל קבוע k. הבעיה חד מימדית.



א. מהי מהירות מרכז המסה של הגופים?
ב. מהי ההתכווצות המקסימאלית של הקפיץ?

תשובות סופיות:

1) א. כאשר הקפיץ מגיע לנקודת רפיון או ב- $t=\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m_1}{k}}$.

ב. $x_{c.m.}(d)=\frac{m_1 l_0}{m_1+m_2}\left(1+\frac{2}{3}\sqrt{m_1 k}t\right)$

2) א. $\mu\cdot mg=t$ ב. $a=\frac{t}{m}\ ,\ -a=\frac{t}{M}$ ג. $a=\mu\cdot g\frac{m}{M}\ ,\ -a=\mu\cdot g$

ד. כן.

3) א. $y_{c.m.}(t=0)=\frac{R}{2}$ ב. $\vec{v}_{c.m.}(t)=\frac{1}{2}v_0\hat{x}$

ג. בנקודה B: $u_{1_x}=\frac{1}{2}v_0=u_{2_x}\ ,\ u_{1_y}=\frac{-v_0}{2}=-u_{2_y}$,

בנקודה C: $u_{1_x}=0\ ,\ u_{2_x}=v_0\ ,\ u_{1_y}=0=u_{2_y}$,

בנקודה D: $u_{1_x}=u_{2_x}=\frac{1}{2}v_0\ ,\ u_{1_y}=\frac{v_0}{2}=-u_{2_y}$

4) א. $x_2=-\frac{L\cos\alpha}{4}$ ב. הכבד: $W=3mgL\sin\alpha$, הקל: $W=mg(-L\sin\alpha)$

ג. $v_{2_x}=\sqrt{\frac{gL\sin\alpha}{4(4\tan^2\alpha+3)}}$

5) א. $v_{c.m.}=\frac{2}{3}v$ ב. $\Delta x_{max}=\sqrt{\frac{10m}{3k}}\cdot v$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 12 - מסה משתנה

תוכן העניינים

1. הקדמה ופיתוח הנוסחה 183
2. שימוש בנוסחה 185
3. סיכום מסה משתנה ..... (ללא ספר)
4. תרגילים נוספים 186

שימוש בנוסחה:

רקע

אם מסת הגוף משתנה אז צריך לעבוד בניסוח הכללי יותר של החוק השני

$$\Sigma\vec{F} = \frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}$$

(הנוסחה $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ לא נכונה עבור גוף שהמסה שלו משתנה)

נוסחה כללית לתנועה גופים שפולטים מסה

$$\sum \vec{F}_{ext} = M(t)\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} + \vec{v}_{rel}\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}$$

כאשר

$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}$ - קצב הפליטה ((חיובי כאשר חומר יוצא מהגוף ושלילי אם חומר נכנס לגוף)

$\vec{v}_{rel}$ - מהירות החומר שנפלט ביחס לגוף (אם החומר נפלט אחורה אז היא צריכה להיות שלילית)

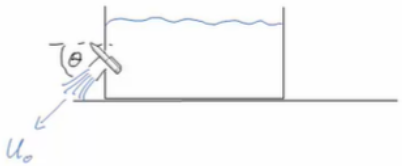
שאלות:

1) חיכוך במסה משתנה

עגלה בעלת מסה התחלתית M_0 נעה על משטח עם חיכוך.

לעגלה מחובר בקצה האחורי צינור המשפריץ מים בקצב α ומהירות u_0.

הצינור נמצא בזווית θ ביחס לציר ה-x.



נתון: M_0 , θ , α , μ_k , u_0.

א. כתוב את משוואת התנועה.

ב. מצא את המהירות כפונקציה של הזמן.

תשובות סופיות:

1) א. $-\mu_k\left(\mathrm{M}(t)g-\mathrm{u}_0\sin\theta\alpha\right)=\mathrm{M}(t)\frac{d\mathrm{v}_x}{dt}-\alpha\mathrm{u}_0\cos\theta$

ב. $\mathrm{v}(t)=-\mu_k gt+\left(\frac{\mathrm{C}}{\alpha}\ln\frac{\mathrm{M}_0-\alpha t}{\mathrm{M}_0}\right)+\mathrm{v}_0$

שימוש בנוסחה:

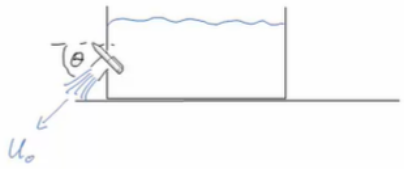
שאלות:

1) חיכוך במסה משתנה

עגלה בעלת מסה התחלתית M_0 נעה על משטח עם חיכוך.

לעגלה מחובר בקצה האחורי צינור המשפריץ מים בקצב α ומהירות u_0.

הצינור נמצא בזווית θ ביחס לציר ה-x.



נתון: M_0 , θ , α , μ_k , u_0.

א. כתוב את משוואת התנועה.

ב. מצא את המהירות כפונקציה של הזמן.

תשובות סופיות:

1) א. $-\mu_k\left(M(t)g-u_0\sin\theta\alpha\right)=M(t)\frac{dv_x}{dt}-\alpha u_0\cos\theta$

ב. $v(t)=-\mu_k gt+\left(\frac{C}{\alpha}\ln\frac{M_0-\alpha t}{M_0}\right)+v_0$

תרגילים נוספים:

שאלות:

1) עגלה עם מטף קצף

מתקינים על עגלה מטף קצף.
המטף פולט קצף אחורנית (ואופקית) מהעגלה במהירות u ביחס לעגלה ובקצב $\left|\frac{dm}{dt}\right| = a - bt$.

פליטת הקצף גורמת לעגלה לנוע בקו ישר.
מסת העגלה (כולל המטף) בתחילת התנועה היא M_0 ואין חיכוך בין העגלה לקרקע.

א. מהן היחידות של a ו- b? הנח שכל הגדלים האחרים ב- m.k.s.

ב. מצאו את תאוצת העגלה כתלות בזמן כל עוד $t > \frac{a}{b}$.

ג. מהי מהירות העגלה כתלות בזמן?

2) חללית מנתקת מיכלים

חללית יכולה לנתק את מכלי הדלק הריקים שלה.
מיכל שהתרוקן מתנתק ונופל לים וכל משקלו של המיכל הריק אינו מעמיס עוד על החללית.
נתונה חללית בעלת מסה התחלתית- M_0, קצב פליטת גזים- α ומהירות הגז ביחס לחללית- u.

כאשר החללית מאבדת ממשקלה מסה m (מסת הדלק שהיה במיכל) היא מנתקת את המיכל שמסתו k וממשיכה במעופה הרגיל. כאשר החללית מאבדת ממשקלה m נוסף, נגמר הדלק במכליה והיא מכבה מנועים וממשיכה במהירות הסופית.
הנח שהחללית מתחילה ממנוחה ושהיא משוגרת מתחת חלל, כלומר אין השפעת כבידה על החללית.

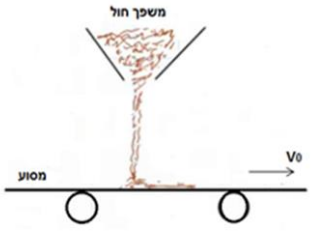
א. מהי מהירות החללית רגע לפני ניתוק המיכל הראשון?

ב. מהי מהירות החללית לאחר ניתוק המיכל?

ג. מהי מהירותה הסופית של החללית?
(הנח שהיא שומרת על מהירותה לאחר כיבוי המנועים).

ד. בכמה שיפרה החללית את מהירותה הסופית על ידי ניתוק המיכלים?

3) משפך חול על מסוע



משפך חול מפיל חול על מסוע בקצב $\frac{dm}{dt} = At$
כאשר A קבוע. אין חיכוך בין המסוע לרצפה.

א. מה הכוח F הדרוש על מנת למשוך את המסוע במהירות קבועה (ונתונה) V_0 ?

ב. מהו ההספק (אנרגיה ליחידת זמן) שמשקיע הכוח?

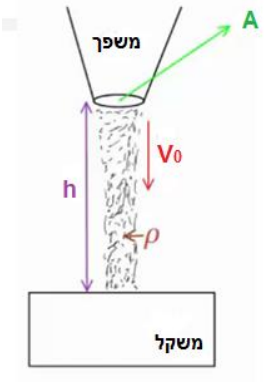
4) בלון

בלון בעל מסה M מלא בגז. נתון כי $\frac{3}{4}$ ממסת הבלון היא מסת הגז.
משחררים את הבלון ממנוחה והגז יוצא במהירות u_0 ביחס לבלון.
נתון כי הבלון מאיץ בקו ישר כלפי מעלה בתאוצה של $0.5g$.

א. מצא את קצב פליטת הגז מהבלון.

ב. מצא את הגובה המקסימלי אליו יגיע הבלון.

5) משפך על משקל



משפך חול נמצא מעל משקל, החול יוצא מהמשפך במהירות V_0. שטח החתך של פתח המשפך הוא A
ונתון כי המשפך נמצא בגובה H מעל המשקל.
נתונה צפיפות המסה של החול ρ.
הזנח את גובה החול המצטבר על המשקל.

א. מהי כמות החול היוצאת מהמשפך ביחידת זמן?

ב. מה מהירות החול בהגיעו לפני פגיעתו במשקל?

ג. במהלך המילוי כאשר המשקל מראה W מה היחס בין המשקל האמיתי של החול לערך שמראה המשקל?

ד. נניח כי כאשר המשקל מראה את המשקל מסעיף ג' סוגרים את המשפך. מה יראה המשקל לאחר זמן רב?

ה. לאחר האמור בסעיף ד' מאיצים את המשקל בתאוצה של 5 מטר לשנייה בריבוע כלפי מעלה. מה יראה המשקל?

6) טיפת גשם

טיפת גשם נופלת דרך ענן וסופחת מים יחסית לשטח הפנים שלה.

קצב שינוי המסה של הטיפה נתון לפי $\frac{dm}{dt}=4\pi r^2 b$, כאשר b קבוע ו- r הוא רדיוס הטיפה. נתונה גם צפיפות המים ρ. הזנח את התנגדות האוויר.

הנח כי הטיפה מתחילה ליפול ממנוחה ורדיוסה ההתחלתי הוא r_0.

א. מצא את רדיוס הטיפה כפונקציה של הזמן.

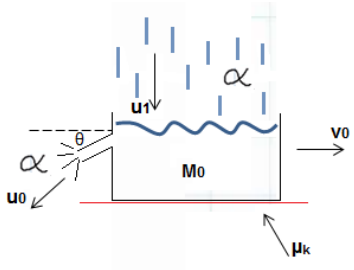
ב. חשב את מהירות הטיפה כפונקציה של הזמן.

ג. מצא את התאוצה של הטיפה זמן קצר לאחר תחילת תנועתה.

ד. מצא את תאוצת הטיפה לאחר זמן רב.

פתרון משוואה דיפרנציאלית מהצורה: $\frac{dv}{dr}=\mathrm{A}\frac{\mathrm{v}}{r}+\mathrm{B}$ הוא $\mathrm{v}(r)=(\mathrm{C}r)^{\mathrm{A}}+\frac{\mathrm{B}}{1-\mathrm{A}}r$.

7) עגלה עם גשם, משאבה וחיכוך



עגלה בעלת מסה M_0 נוסעת על משטח עם חיכוך.

על העגלה יורד גשם בקצב a ובמהירות u_1 בציר האנכי בלבד. בנוסף, לעגלה מחוברת משאבה בקצה האחורי, המוציאה מים מן העגלה החוצה במהירות u_0 ובקצב זהה a.

המשאבה מוציאה את המים בזווית θ מתחת לציר ה- x (ראה ציור).

לעגלה מהירות התחלתית V_0.

מקדם החיכוך הקינטי μ_k וכל הגדלים הרשומים בשאלה נתונים.

א. מצא את משוואת התנועה של העגלה.

ב. מצא את המהירות הסופית של העגלה.

ג. מצא את מהירות העגלה כפונקציה של הזמן.

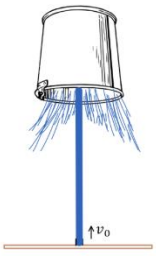
8) חול נשפך מקרונית

קרונית עמוסה בחול נעה על פסים ללא חיכוך במהירות v.

ברגע מסוים נפתח חלון בתחתית הקרונית וחול מתחיל להישפך בקצב קבוע α.

מהי מהירות הקרונית כתלות בזמן?

9) דלי מוחזק באוויר



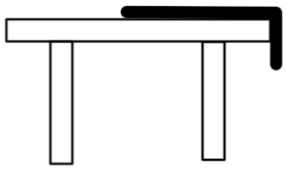
דלי בעל מסה M מוחזק הפוך באוויר באמצעות זרם מים.

המים יוצאים מצינור באדמה במהירות v_0 כלפי מעלה ובקצב α.

מהו הגובה בו הדלי נמצא באוויר?

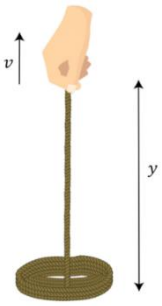
הנח שהמים לא ניתזים חזרה לאחר הפגיעה בדלי.

10) חבל מחליק משולחן



חבל באורך L ומסה M מונח על שולחן חסר חיכוך כך שהקצה של החבל באורך d נשמט מחוץ לשולחן.
החבל מוחזק ומשוחרר ממנוחה.
מה תהיה מהירות החבל כאשר כל אורך החבל ייפול מהשולחן.
פתור משיקולי תנע בלבד! הנח שהחבל אינו פוגע ברצפה.

11) מרימים חבל ממנוחה



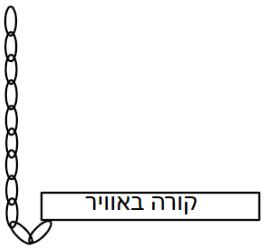
חבל אחיד, בעל מסה M ואורך L מונח על שולחן.
מרימים קצה אחד של החבל במהירות קבועה v.

א. מהי המתיחות בקצה העליון של החבל כתלות בפרמטרים של השאלה ובגובה הקצה y?

ב. מהי העבודה שעושה היד ביחידת זמן?

ג. מהו קצב שינוי האנרגיה הכוללת של החבל?

12) שרשרת מחוברת לקורה נופלת



שרשרת באורך L וצפיפות אחידה λ מחוברת לקורה התלויה באוויר.
מרימים את השרשרת אנכית מעל הקורה ומשחררים ממנוחה.
הנח שהחלק שמחובר לקורה בהתחלה זניח, כלומר גובה הקצה העליון של השרשרת הוא L מעל החיבור עם הקורה.
הנח שהשרשרת לא פוגעת בקרקע במהלך הנפילה.

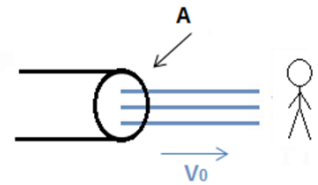
א. מהי מהירות החלק שנופל כתלות בזמן?

ב. מהו התנע של כל השרשרת כתלות בזמן?

ג. מה הכוח שמפעילה הקורה על השרשרת כתלות בזמן?

ד. מה גודל הכוח שמפעילה הקורה ברגע הנפילה האחרון של השרשרת אם מסת השרשרת היא 2 ק"ג?

13) צינור משפריץ על אדם*

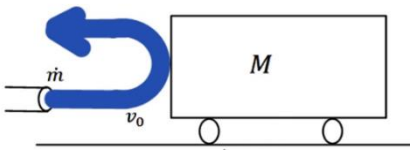


צינור משפריץ מים על אדם.
לצינור שטח חתך A וצפיפות המים נתונה ρ.
נתונה גם מהירות יציאת המים מהצינור v_0.

א. מצא את הכוח שפועל על אדם הנמצא במנוחה, בהנחה שהמים אינם ניתזים חזרה.

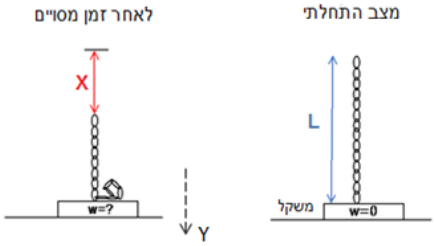
ב. מצא את הכוח הפועל על אדם הבורח במהירות $v < v_0$.

14) צינור משפריץ מים על עגלה*



צינור משפריץ מים על עגלה בעלת מסה M.
המים יוצאים מהצינור במהירות v_0 ובקצב $\dot{m}$ נתון (הנח כי מהירות המים קבועה עד לפגיעה בעגלה) . המים מתנגשים התנגשות אלסטית ביחס לעגלה.
מצא את מהירות העגלה כפונקציה של הזמן.

15) שרשרת נופלת על מד משקל*



שרשרת בעלת אורך L ומסה M מוחזקת בצורה אנכית מעל משקל כך שהקצה התחתון שלה בדיוק נוגע במשקל.
השרשרת משוחררת ממנוחה.
מצא מה מראה המשקל כפונקציה של x (המרחק אותו עבר הקצה העליון).

תשובות סופיות:

1) א. $[b]=\frac{kg}{sec^2}$, $[a]=\frac{kg}{sec}$ ב. $\frac{dv}{dt}=\frac{u(a-bt)}{M_0-at+\frac{1}{2}bt^2}$

ג. $v(t)=u\ln\left[\frac{M_0}{M_0-at+\frac{1}{2}bt^2}\right]$

2) א. $u\ln\frac{M_0}{M_0-m}$ ב. לא משתנה.

ג. $u\ln\frac{M_0(M_0-2m-k)}{(M_0-m)(M_0-m-k)}$ ד. $u\ln\left(\frac{M_0-m-k}{M_0-2m-k}\right)$

3) א. $F=V_0 A t$ ב. $\rho=V_0^2 A t$

4) א. $-\frac{3g}{2u_0}Me^{-\frac{3g}{2u_0}t}$ ב. $y_{max}=\frac{g}{4}\left(\frac{2u_0}{3g}\ln 4\right)^2+\frac{1}{2g}\left(\frac{u_0}{3}\ln 4\right)^2$

5) א. $\frac{dm}{dt}=\rho A V_0$ ב. $V_F=\sqrt{V_0^2+2gh}$ ג. $\frac{W}{W'}=1-\frac{V_F\rho A V_0}{W'}$

ד. $W=W+\rho Ahg$ ה. $W=W+\frac{W}{g}a_0$

6) א. $r=\frac{b}{\rho}t+r_0$ ב. $v(r)=-\frac{\rho g}{4b}r_0\left(\frac{r}{r_0}\right)^{-3}+\frac{\rho g}{4b}r$

ג. $a(t=0)=g$ ד. $\lim_{t\to\infty}a(t)=\lim_{r\to\infty}a(r)=\frac{g}{4}$

7) א. $-\mu_k N=M_0\frac{dv}{dt}+\alpha V(t)-u_0\alpha\cos\theta$ ב. $V(t)=(u_0\alpha\cos\theta-\mu_R N)\frac{1}{\alpha}$

ג. $V(t)=\frac{1}{\alpha}\left(C-(C-\alpha V_0)e^{-\frac{\alpha}{M_0}t}\right)$

8) $v=const$

9) $h=\frac{\alpha v_0^2-Mg}{2g\alpha}$

10) $V_F^2=\frac{g}{2}(L^2-d^2)$

11) א. $F=\frac{M}{L}gy+\frac{M}{L}v^2$ ב. $\rho=\frac{M}{L}gyv+\frac{M}{L}v^3$ ג. $\frac{dE}{dt}=\frac{M}{L}gyv+\frac{M}{L}v^3$

12 א. $v = gt$ ב. $\rho_T = \lambda\left(L - \frac{1}{4}gt^2\right)gt$ ג. $\frac{3}{4}\lambda g^2 t^2$ ד. 60_N

13 א. $\sum F = -\sum F = \rho A v_0^2$ ב. $\sum F = \rho A\left(v_0 - v\right)^2$

14 $v(t) = v_0\left(1 - \frac{1}{2\dot{m}}Mt + 1\right)$

15 $N(x = L) = 3Mg$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 13 - מומנט התמד

תוכן העניינים

1. הקדמה - גוף קשיח וציר סיבוב ..... (ללא ספר)
2. מומנט התמד, הסבר בסיסי וחישוב עבור גוף נקודת ..... (ללא ספר)
3. משפט שטיינר ואדטיביות 193
4. נוסחאות לגופים נוספים וסיכום 196
5. lz=lx+ly ..... (ללא ספר)
6. סימטריה לz ..... (ללא ספר)
7. חישוב מומנט ההתמד של דיסקה סביב ציר Z וציר X 197
8. תרגילים שונים לחישוב מומנט התמד 198

אדטיביות:

רקע

גוף קשיח:

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

אם גוף קשיח מסתובב סביב ציר סיבוב **כל הנקודות על הגוף מבצעות תנועה מעגלית באותה המהירות הזוויתית** (אך לא באותה מהירות קווית)
מומנט התמד:

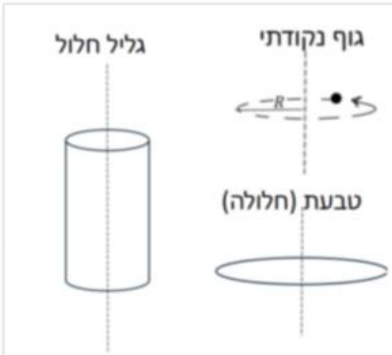
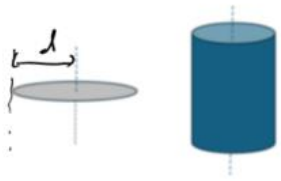
הגדרה - עבור מערכת של גופים נקודתיים $I = \Sigma m_i r_i^2$

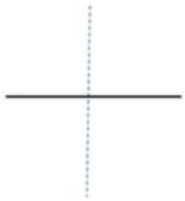
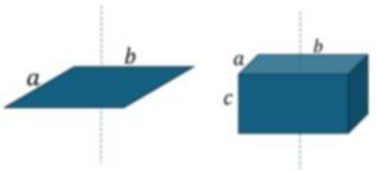
משפט שטיינר - $I' = I_{c.m.} + md^2$ כאשר d הוא המרחק בין הצירים ו m היא המסה הכוללת של הגוף

הערה: משפט שטיינר פועל רק לצירים מקבילים, ורק כאשר אחד הצירים עובר במרכז המסה.

אדטיביות - מומנט ההתמד הוא פונקציה אדטיבית, כלומר ניתן לסכום את המומנט התמד של כל חלק וחלק בגוף על מנת לקבל את המומנט הכולל. $I_T = I_1 + I_2$

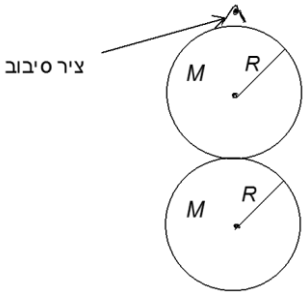
נוסחאות מומנט התמד של גופים נפוצים:

גוף נקודתי סביב ציר כלשהו $I = mR^2$ טבעת וגליל חלול סביב הציר המרכזי $I_{c.m.} = mR^2$	
דיסקה/ גליל מלא במרכז מסה סביב ציר z -אנך לדיסקה $I_{c.m.} = \frac{1}{2}mR^2$	
דיסקה במרכז מסה סביב ציר x -במישור הדיסקה $I_{c.m.} = \frac{1}{4}mR^2$	

מוט במרכז המסה $I_{c.m.} = \frac{1}{12}mL^2$	
מוט בקצה $I = \frac{1}{3}mL^2$	
כדור מלא במרכז מסה $I_{c.m.} = \frac{2}{5}mR^2$	
תיבה או לוח במרכז מסה $I_{c.m.} = \frac{m(a^2+b^2)}{12}$	

שאלות:

1) שעון כפול תלוי על קיר



לדסקה בעלת מסה M ורדיוס R מחברים דסקה נוספת זהה בקצה התחתון של הדסקה.
מצא את מומנט ההתמד של המערכת סביב ציר המאונך למישור הדסקה והעובר בקצה העליון של הדסקה (הראשונה).

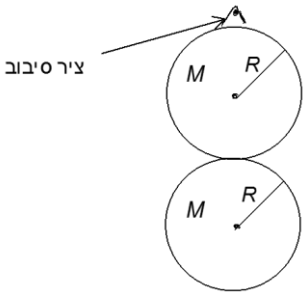
תשובות סופיות:

1) $I = 11mR^2$

אדטיביות:

שאלות:

1) דוגמה



לדסקה בעלת מסה M ורדיוס R מחברים דסקה נוספת זהה בקצה התחתון של הדסקה.
מצא את מומנט ההתמד של המערכת סביב ציר המאונך למישור הדסקה והעובר בקצה העליון של הדסקה (הראשונה).

תשובות סופיות:

1) $I = 11mR^2$

חישוב מומנט ההתמד באמצעות אינטגרלים:

רקע

עבור גוף קשיח: $I = \int r^2 \, \mathrm{d}m$

כאשר r הוא המרחק של כל גוף מציר הסיבוב (ולא מהראשית)

אם ציר הסיבוב הוא ציר z אז $r^2 = x^2 + y^2$

תרגילים שונים לחישוב מומנט התמד:

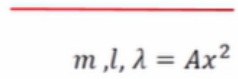
שאלות:

1) חישוב אינטגרל של מוט לא אחיד

חשב את מומנט ההתמד של מוט עם צפיפות ליחידת אורך $\lambda(x)=\lambda_0\frac{x}{L}$ סביב קצה המוט.

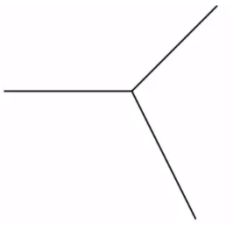
x הוא המרחק מהקצה, L הוא אורך המוט ו- λ_0 נתון.

2) חישוב נוסף מוט בצפיפות לא אחידה



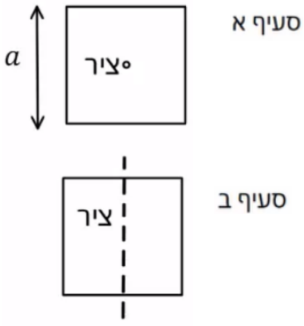
מצא את מומנט ההתמד של מוט סביב מרכזו לפי הנתונים שבשרטוט.
הצפיפות הנתונה מתייחסת למרכז המוט כראשית הצירים.

3) שלושה מוטות מחוברים בקצה



שלושה מוטות זהים באורך l ומסה m כל אחד מחוברים באופן המוצג באיור.
מצא את מומנט ההתמד של המערכת סביב ציר הנמצא בנקודת החיבור בין המוטות ובמאונך למישור.

4) מסגרת ריבועית



נתונה מסגרת ריבועית בעלת אורך צלע a ומסה M.
מצא את מומנט ההתמד של מסגרת.

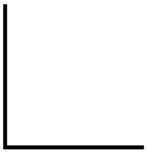
א. סביב ציר העובר במרכזה ומאונך למישור המסגרת.

ב. סביב ציר העובר במרכז המסגרת ודרך מרכז שתי צלעות ומקביל לשתי הצלעות האחרות.

5) מומנט התמד של שער חשמלי

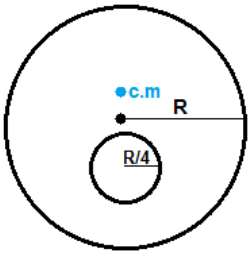
מצא את מומנט ההתמד של שער חשמלי בעל מסה m ואורך l אשר בסופו מחוברת משקולת בעלת מסה M ואורך L המסתובב סביב מרכז המסה שלו.

6) מומנט התמד של רייש



מצא את מומנט ההתמד של הגוף שבשרטוט סביב מרכז המסה שלו בשתי דרכים שונות. אורך כל מוט l ומסתו m.

7) דיסקה עם חור



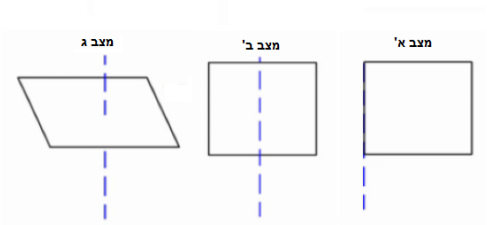
א. מצא את מומנט ההתמד של דיסקה בעלת מסה M ורדיוס R, אם ידוע כי במרחק R ממרכז הדיסקה קדחו חור ברדיוס רבע R. הדיסקה מסתובבת סביב ציר במרכזה (ולא במרכז המסה של המערכת).

ב. מצא את מומנט ההתמד של הגוף סביב מרכז המסה שלו.

8) חצי חישוק ושתי מסות

מצא את מומנט ההתמד של חצי החישוק שבתמונה. רדיוסו R, מסתו M ובקצותיו חוברו שתי מסות m. החישוק סובב סביב מסמר בקודקודו.

9) חישוב אינטגרל של ריבוע



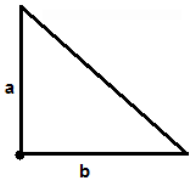
חשב את מומנט ההתמד של לוח ריבוע בעל אורך צלע a, מסה M וצפיפות אחידה בכל אחד מהמצבים הבאים:

א. ציר הסיבוב הוא אחת הפאות של הריבוע.

ב. ציר הסיבוב מקביל לפאות ועובר במרכז.

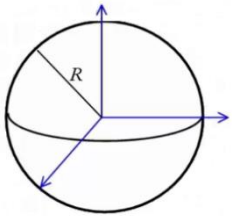
ג. ציר הסיבוב אנך למשטח הריבוע ועובר במרכזו.

10) מומנט התמד של משולש



מצא את מומנט ההתמד של המשולש סביב קודקודו הישר.

11) מומנט התמד של כדור מלא



חשב את מומנט ההתמד של כדור מלא בעל רדיוס R, מסה M וצפיפות אחידה, סביב ציר העובר במרכז הכדור.

12) מומנט התמד של קליפה כדורית

מצאו את מומנט ההתמד של קליפה כדורית ברדיוס R ומסה m סביב ציר העובר דרך מרכז המסה של הקליפה.

תשובות סופיות:

1) $I_0 = M\frac{L^2}{2}$

2) $I = \frac{12ml^2}{80}$

3) $I_{c.m.} = ml^2$

4) א. $I_{c.m.} = \frac{M}{4}\left(\frac{l^2}{3}+a^2\right)$ ב. $I = \frac{M}{8}\left(a^2+\frac{l^2}{3}\right)$

5) $I=\left(\frac{1}{12}ml^2+m\left(\frac{m\cdot 0+\frac{M(l+L)}{2}}{m+M}\right)^2\right)+\left(\frac{1}{12}\left(L^2+L^2\right)M+M\left(\frac{l}{2}-\left(\frac{m\cdot 0+\frac{M(l+L)}{2}}{m+M}\right)+\frac{L}{2}\right)^2\right)$

6) $I = \frac{5}{12}ml^2$

7) א. $I_0 = \frac{247}{512}MR^2$ ב. $I_0 = I_{c.m.}+\frac{15}{16}M\cdot\left(\frac{R}{30}\right)^2$

8) $I_1 = I_{c.m.}+m'b^2$

9) א. $I = \frac{1}{3}Ma^2$ ב. $I = \frac{1}{12}Ma^2$ ג. $I = M\frac{1}{6}a^2$

10) $I_0 = \frac{1}{6}m\left(a^2+b^2\right)$

11) $I = \frac{2}{5}MR^2$

12) $\frac{2MR^2}{3}$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 14 - מומנט כוח

תוכן העניינים

1. מומנט כוח - הסבר 201
2. מכפלה וקטורית ..... (ללא ספר)
3. תרגיל - מומנטים על משולש 203
4. פיתוח, מדוע מתייחסים לכוח הכובד כאילו פועל במרכז המסה ..... (ללא ספר)
5. משוואת מומנטים ..... (ללא ספר)
6. תרגיל - שני פועלים מחזירים מנשא 204
7. תרגילים מסכמים 205

מומנט כוח - הסבר:

רקע

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

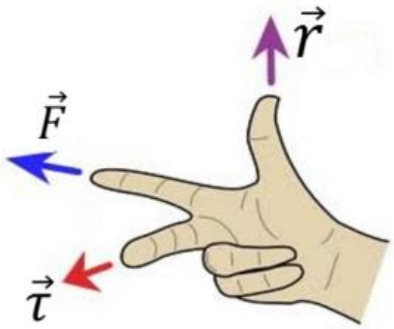
כאשר $\vec{r}$ הוא וקטור שיוצא מהציר עד לנקודה שבה פועל הכוח.

ניתן לחשב את המכפלה באמצעות דטרמיננטה או באמצעות גודל וכיוון
גודל המומנט :

$$|\vec{\tau}| = |\vec{r}||\vec{F}|\sin\alpha = |\vec{F}|r_{\perp}$$

כאשר $r_{\perp}$ הוא הרכיב של $\vec{r}$ המאונך לכוח

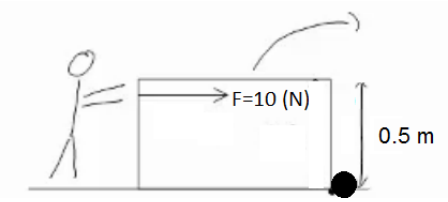
כיוון לפי כלל יד ימין או כלל הבורג



משוואת מומנטים : אם גוף נמצא במנוחה אז סכום המומנטים הפועלים עליו שווה
לאפס.

שאלות:

1) מרחק אפקטיבי



אדם דוחף ארגז בגובה 0.5m ומפעיל כוח F (ראו תמונה).
לארגז אין חיכוך עם המשטח.
האדם דוחף את הארגז ללא כל בעיה עד שנתקע באבן והארגז מתהפך (מיקום האבן הופך לציר הסיבוב).
חשבו את גודל מומנט הכוח.

תשובות סופיות:

1) $|\vec{\tau}| = 5N \cdot m$

תרגיל - מומנטים על משולש:

שאלות:

1) מומנטים על משולש

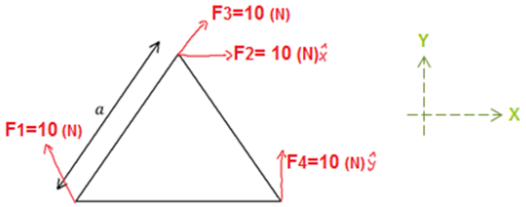
המשולש בתמונה הוא משולש שווה צלעות עם אורך צלע נתונה a.

א. חשב את המומנטים של הכוחות בתמונה סביב הפינה השמאלית של המשולש.

ב. נתונה המסה של המשולש M ונתון גם כי מרכז המסה של המשולש נמצא בנק': $\left(\frac{1}{2}a\ ,\ \frac{1}{2\sqrt{3}}a\right)$.

חשב את מומנט הכוח של כוח הכובד.

ג. חשב שוב את המומנטים סביב ציר העובר במרכז המסה של המשולש, הנח כי הזווית בין F_1 לדופן המשולש היא 60 מעלות.



תשובות סופיות:

1) א. $\tau_1 = 0!\ ,\ \vec{\tau}_2 = -5\cdot\sqrt{3}a\ ,\ \vec{\tau}_3 = 0!\ ,\ \tau_4 = 10a$ ב. $\tau_g = -Mg\frac{1}{2}a$

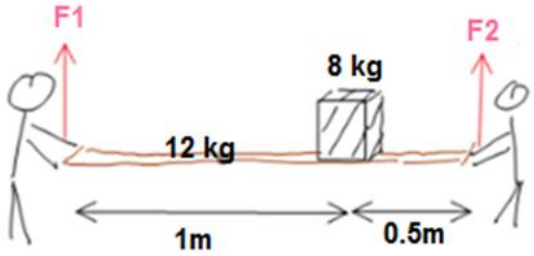
ג. $\tau_1 = \frac{-10a}{\sqrt{3}}\ ,\ \tau_2 = -10\cdot\frac{1}{\sqrt{3}}a\ ,\ \tau_3 = -\frac{1}{\sqrt{3}}a\cdot 10\cdot\sin 30°\ ,\ \tau_4 = 10\cdot\frac{1}{2}a\ ,\ \tau_g = 0$

תרגיל - שני פועלים מחזיקים מנשא:

שאלות:

1) שני פועלים מחזיקים מנשא

שני פועלים מחזיקים מנשא מעץ שמסתו $12kg$ ואורכו $1.5m$.
על המנשא, במרחק של $0.5m$ מהפועל הימני, מונח ארגז בעל מסה של $8kg$.
בהנחה כי המערכת במנוחה, מצאו את הכוח שמפעיל כל פועל (ראה איור).



תשובות סופיות:

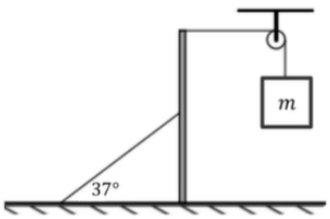
1) $F_2 = 113.333N$, $F_1 = 86.666N$

תרגילים מסכמים:

שאלות:

1) מוט עומד מחובר לחוט ומשקולת

מוט אחיד מונח על משטח אופקי לא חלק, כמוראה בתרשים.
המוט מחובר במרכזו לחוט אידיאלי שקצהו
השני קשור למשטח ויוצר עימו זווית של $37°$.
הקצה העליון של המוט מחובר באמצעות חוט
אופקי אידיאלי וגלגלת אל משקולת שמסתה $m = 7kg$.
המערכת נמצאת במנוחה.

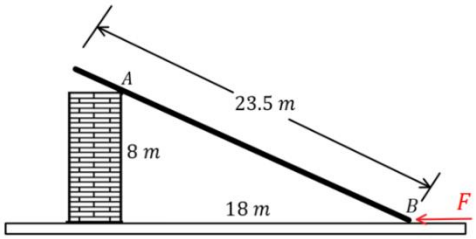


א. מהי המתיחות בחוט המחובר אל המשטח?

ב. מהו כוח החיכוך שמפעיל המשטח האופקי על המוט?

2) קורה על קיר אנכי

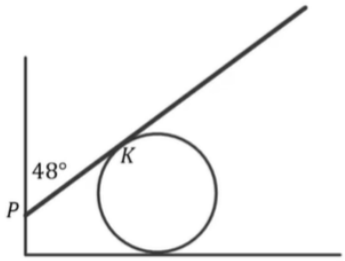
באיור לשאלה זו מתוארת קורה אחידה
שאורכה הכולל הוא $23.5m$.
מסת הקורה היא $140kg$.
הקורה נשענת בנקודה A על קיר אנכי חלק
שגובהו $8m$.



קצה הקורה מונח על הרצפה בנקודה B במרחק $18m$ מהקיר
ובקצה הזה פועל כוח אופקי F, כמתואר באיור.
מקדם החיכוך הסטטי שבין הקורה הרצפה הוא $\mu_s = 0.3$.
מהו F המקסימלי הניתן להפעיל כך שהקורה תישאר במנוחה?

3) מוט נשען על כדור

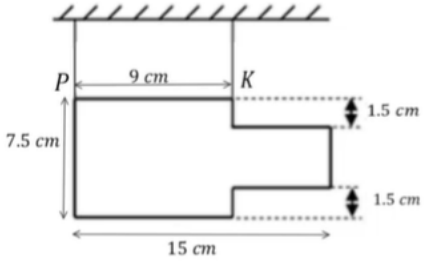
נתון מוט דק שאורכו $L = 3.5m$ ומסתו $m = 7kg$
הנשען על כדור חסר חיכוך המודבק לרצפה כמתואר בשרטוט.
נקודת המגע של המוט בכדור היא הנקודה K.
בקצהו השמאלי נוגע המוט בקיר בעל חיכוך
בנקודה P, הזווית שיוצר המוט יחסית לקיר
היא $48°$. מקדם החיכוך הסטטי שבין הקיר למוט
הוא $\mu_s = 0.15$.



א. מהו הכוח שמפעיל הכדור על המוט אם
נתון שקצהו הימני של המוט נמצא על סף תנועה כלפי מטה?

ב. מהו המרחק בין הנקודות P ו- K במצב זה?

4) טבלה מעץ

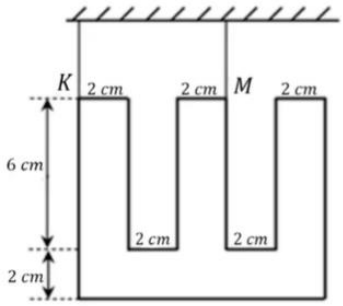


טבלה העשויה עץ בעלת עובי אחיד שמסתה 400 גר' וצורתה כמתואר בתרשים, תלויה בשני חוטים בנקודות K ו-P.

א. חשב את מרכז הכובד של הטבלה ביחס למערכת צירים שראשיתה ממוקמת בנקודה P.

ב. מצא את המתיחות בשני החוטים.

5) שלט בצורת האות ש



שלט העשוי מחומר אחיד בצורת האות "ש" (כמשורטט), שמסתו 4 ק"ג, נתלה בשני חוטים בנקודות K ו- M.

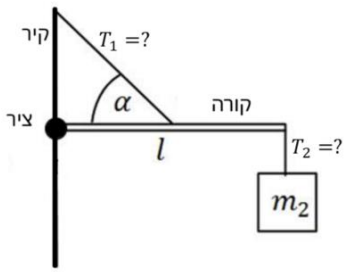
א. חשבו את מרכז המסה של השלט ביחס למערכת צירים שראשיתה ממוקמת בנקודה K.

ב. מצאו את המתיחות בשני החוטים.

6) מסה תלויה על קורה שמחוברת לקיר

קורה בעלת מסה m_1 ואורך l מחוברת לקיר באמצעות ציר.

בקצה הקורה קשורה מסה m_2 התלויה במנוחה.

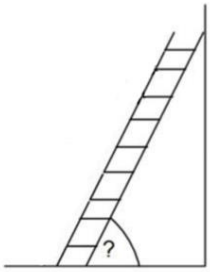


מאמצע הקורה יוצא חוט בזווית הקשור חזרה לקיר, הזווית שיוצר החוט עם הקורה היא α.

א. מהי המתיחות בחוטים?

ב. מהו הכוח (גודל וכיוון) שמפעיל הציר?

7) סולם נשען על קיר



סולם נשען על קיר.

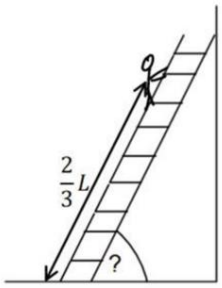
קיים חיכוך סטטי בין הסולם לרצפה וגם בין הסולם לקיר.

מקדם החיכוך הסטטי בין הסולם לרצפה ובין הסולם לקיר הוא μ_s. אורך הסולם הוא L וניתן להניח שמסתו מפולגת בצורה אחידה.

מהי הזווית המינימלית עם הרצפה כך שהסולם לא יחליק?

8) אדם עומד על סולם שנשען על קיר

אדם עומד על סולם שנשען על קיר.
אורך הסולם הוא L וניתן להניח שמסתו מפולגת בצורה אחידה. האדם עומד על הסולם כשמרחקו מהקצה התחתון של הסולם הוא שני שליש מאורך הסולם.
קיים חיכוך סטטי בין הסולם לרצפה וגם בין הסולם לקיר.
מקדם החיכוך הסטטי בין הסולם לרצפה ובין הסולם לקיר הוא μ_s. מסת האדם כפולה ממסת הסולם.
מהי הזווית המינימלית עם הרצפה כך שהסולם לא יחליק?



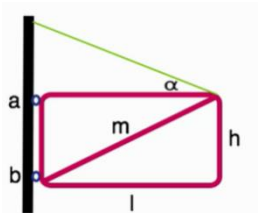
9) מומנטים על שער

שער שגובהו h ואורכו l מחובר לקיר בשני צירים a ו-b.
על מנת להקל על הציר העליון חיברו לשער כבל ומתחו אותו עד אשר הכוח האופקי בנקודה a מתאפס.

א. מהי המתיחות בכבל?

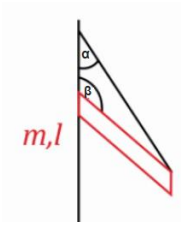
ב. מהו הכוח האופקי הפועל על הציר b?

ג. מהו סכום הכוחות האנכיים המופעלים על שני הצירים?



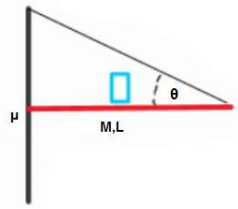
10) גגון מוחזק אל קיר

גגון מוחזק אל קיר בעזרת חבל וחיכוך כמתואר בשרטוט.
מצא את הכוחות הפועלים על הגגון.



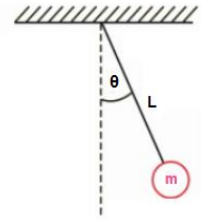
11) מסה על גגון מחליק

גגון מוחזק לקיר בעזרת חיכוך בלבד לפי הנתונים שבשרטוט.
מהו המרחק הקטן ביותר מהקיר בו ניתן לשים את המסה m מבלי לגרום לגגון להחליק מהקיר?



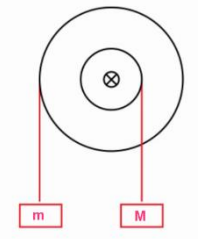
12) מטוטלת מתמטית

מצא את מומנט הכוח המופעל על מטוטלת מתמטית כפונקציה של הזווית מהאנך.

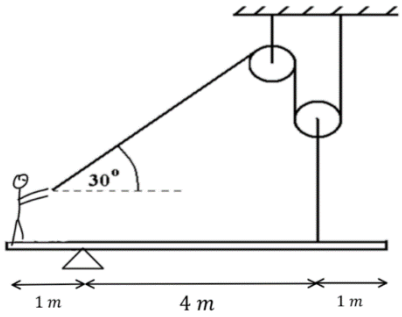


13) מנוף מדיסקה כפולה

נתונה המערכת שבשרטוט.
רשום את כל הכוחות הפועלים על הדיסקה ומצא את יחס הרדיוסים בין שתי הדיסקות.



14) אדם על קורה מחזיק בחוט ושתי גלגלות

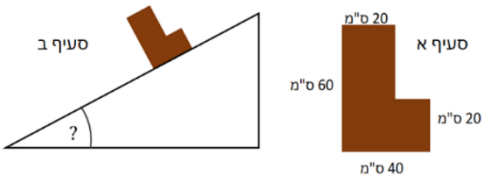


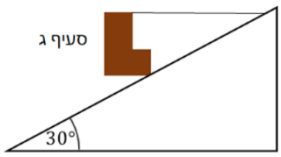
אדם שמסתו 65kg עומד בקצה קורה שמסתה 40kg.
הקורה מונחת על ציר הנמצא במרחק 1m מהאדם.
האורך הכולל של הקורה הוא 6m.
האדם מחזיק בחוט העובר דרך שתי גלגלות כפי שמתואר באיור.
הגלגלת השמאלית מחוברת לתקרה, הגלגלת הימנית לקורה במרחק 1m מהקצה השני.

א. מהו הכוח בו האדם צריך למשוך את החבל כדי לשמור על מצב של שיווי משקל?
ב. מהם רכיבי הכוח שהציר מפעיל על הקורה?
ג. מהו מקדם החיכוך הסטטי המינימאלי בין האדם לקורה כדי שהאדם לא יחליק מהקורה?

15) L על מישור משופע*

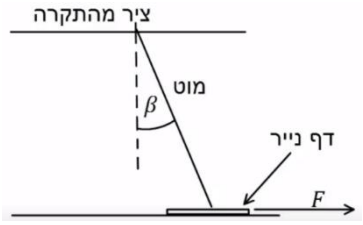
באיור נתון גוף משטחי בצורת L.
צפיפות המסה של הגוף היא: $\sigma = 5\frac{kg}{m^2}$.





א. מהו מרכז המסה של הגוף ביחס לפינה התחתונה השמאלית?
ב. מניחים את הגוף על מישור משופע. מהי הזווית המקסימאלית של המישור עבורה הגוף לא יתהפך?
ג. קושרים את הגוף למישור באמצעות חוט אופקי מהפינה הימנית העליונה ומותחים את החוט עד שהגוף מתיישר במקביל לקרקע.
מהי המתיחות בחוט במצב זה אם זווית המישור היא 30° והגוף במנוחה.

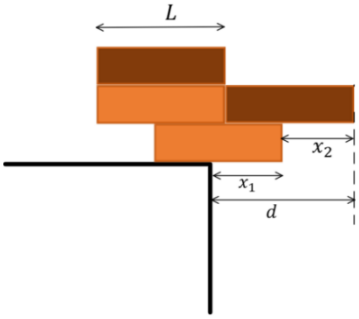
16) מוט נשען על דף נייר*



מוט בעל אורך L ומסה M מחובר לתקרה באמצעות ציר.
בקצהו השני המוט מונח על דף נייר המונח על הרצפה.
מסת דף הנייר זניחה.
הזווית בין המוט לאנך היא β ומקדם החיכוך הסטטי בין המוט לנייר ובין הנייר לרצפה הוא μ_s.

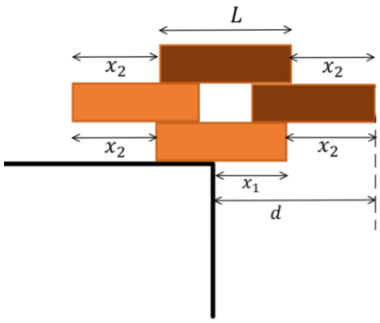
א. מושכים את הנייר ימינה בכוח F.
מהו הכוח המינימלי הדרוש בשביל להוציא את הנייר מתחת למוט? הנח שהמוט נשאר במנוחה.
ב. חזור על סעיף א' אם הכוח פועל שמאלה.

17) ערימת קוביות 1



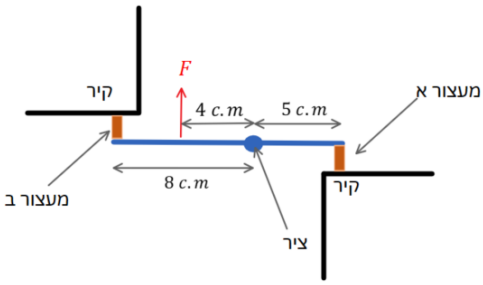
ערימת קוביות מורכבת מ-4 קוביות זהות באורך L.
הקוביות מסודרות באופן שמתואר באיור.
מהו המרחק d המקסימאלי האפשרי כך שהערימה לא תיפול מהשולחן.
מהם x_1 ו-x_2 במצב זה?

18) ערימת קוביות 2*



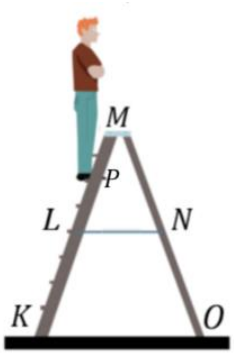
ערימת קוביות מורכבת מ-4 קוביות זהות באורך L.
הקוביות מסודרות באופן שמתואר באיור.
מהו המרחק d המקסימאלי האפשרי כך שהערימה לא תיפול מהשולחן.
מהם x_1 ו-x_2 במצב זה?

19) מוט עם שני מעצורים מגומי**



באיור ישנו מוט באורך 13c.m. המחובר בציר הנמצא במרחק 5c.m. מהקצה הימני.
בשני הקצוות של המוט ישנם מעצורים זהים העשויים מגומי.
מפעילים כוח $F=200N$ במרחק 4c.m. שמאלה מהציר, הכוח גורם לכיווץ קטן של המעצורים.
המערכת אופקית, כלומר כוח הכובד פועל לתוך הדף וניתן להתעלם ממנו.
מהו הכוח שפועל על כל מעצור?
רמז: התייחס למעצורים כמו קפיצים בעלי קבוע k זהה.

20) אדם על סולם עם שתי רגליים**



אדם עומד על סולם בעל שתי רגליים המחוברות באמצעות כבל במרכז הסולם. משקל האדם הוא 800 ניוטון וניתן להזניח את משקל הסולם ואת החיכוך עם הרצפה.
נתונים אורכי הקטעים הבאים:
$KM=OM=2.34m$, $KP=1.70m$, $LN=0.746m$.

א. מצא את הכוחות שפועלים בנקודות O ו-K.

ב. מצאו את המתיחות בכבל.

רמז: יש לעשות משוואה רק על חלק מהסולם.

תשובות סופיות:

1) א. $T_2 \approx 180N$ ב. $f_s = T_1 = 70N$, ימינה.

2) $F_{max} \approx 521N$

3) א. $N_2 \approx 110N$ ב. $PK \approx 0.84m$

4) א. $x_{c.m.} = 6.6c.m.$, $y_{c.m.} = 3.75c.m$ ב. $T_2 = 3N$, $T_1 = 1N$

5) א. $x_{c.m.} = 5c.m.$, $y_{c.m.} \approx 4.4c.m$ ב. $T_K = 6.7N$, $T_M = 33.3N$

6) א. $T_1 = \frac{(m_1 + 2m_2)g}{\sin\alpha}$, $T_2 = m_2 g$

ב. $\tan\theta = -\frac{m_2}{m_1 + 2m_2}\tan\alpha$, $F = \sqrt{\left((m_1 + 2m_2)g\cot\alpha\right)^2 + (m_2 g)^2}$

7) $\tan\theta = \frac{1-\mu_s^2}{2\mu_s}$

8) $\tan\theta = \frac{11-7\mu_s^2}{18\mu_s}$

9) ראה סרטון.

10) ראה סרטון.

11) ראה סרטון.

12) $\sum\tau = -mgl\sin\theta + Tl\sin\theta = -mgl\sin\theta$

13) $\sum\tau = \frac{m}{M} = \frac{r}{R}$

14) א. $T_1 = 20N$ ב. $F_y = 1000N$, $F_x = 10\sqrt{3}N$ שמאלה

ג. $\mu_{s_{min}} = 0.027$

15) א. $x_{c.m.} = 0.15m$, $y_{c.m.} = 0.25m$ ב. $\alpha = 31^\circ$

ג. $T = 3.3N$

16) א. $F_{min} = \frac{\mu_s mg\sin\beta}{\sin\beta + \mu_s\cos\beta}$ ב. $F_{min} = \frac{\mu_s mg\sin\beta}{\sin\beta + \mu_s\cos\beta}$

17) $x_1 = \frac{5L}{8}$, $x_2 = \frac{L}{2}$, $d = \frac{9L}{8}$

18) $x_1 = \frac{L}{2}$, $x_2 = \frac{2L}{3}$, $d = \frac{7L}{6}$

19) $F_R \approx 45N$, $F_L \approx 72N$

20) א. $N_O \approx 291N$, $N_k = 509N$ ב. $T_L \approx 196N$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 15 - תנע זוויתי

תוכן העניינים

1. נוסחאות וחוקי שימור 211
2. תנע זוויתי ביחס למרכז מסה 215
3. פרסציה ..... (ללא ספר)
4. תרגילים בפרסציה 217

נוסחאות וחוקי שימור:

רקע

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

$\vec{r}$ - הוא וקטור המיקום של הגוף
$\vec{p}$ - התנע הקווי

עבור גוף הנע בקו ישר ניתן לחשב את התנ"ז לפי L=mvd כאשר d זה המרחק האפקטיבי

הקשר בין תנ"ז למומנט כוח:

$$\sum \vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

חוק שימור התנע הזוויתי:
אם $\sum \vec{\tau}_{ext} = 0$ אז התנע הזוויתי נשמר

סיכום חוקי שימור:
תנע - $\sum \vec{F}_{ext} = 0$
אנרגיה - האם כל הכוחות משמרים?
תנ"ז - $\sum \vec{\tau}_{ext} = 0$

שאלות:

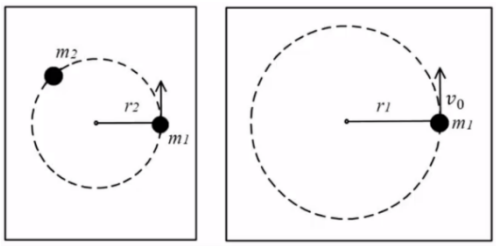
1) תנ"ז בזריקה משופעת

אבן נזרקת בזריקה משופעת במהירות v_0 ובזווית α,
כוח הכובד שפועל על האבן $\vec{F} = -mg\hat{y}$.

א. מהו התנ"ז של האבן ביחס לנקודת המוצא כתלות בזמן?
ב. מהו מומנט הכוח של כוח הכובד?
ג. הראה כי השינוי של התנ"ז בזמן שווה למומנט הכוח של כוח הכובד.

2) גוף מסתובב על שולחן ונמשך למרכז

מסה m_1 מחוברת לחוט המחובר למרכז שולחן.



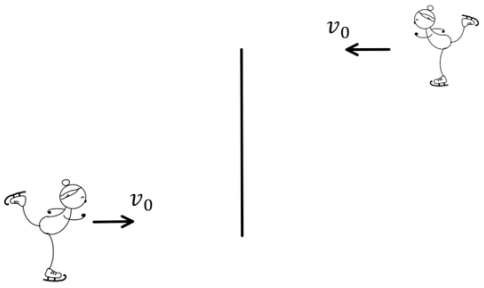
המסה נעה במסלול מעגלי ברדיוס קבוע r_1 ובמהירות קבועה v_0 .

ברגע מסוים מושכים את המסה למרכז המעגל (מקצרים את אורך החוט) ומפסיקים כאשר אורך החוט שווה r_2 והמסה מסתובבת שוב בתנועה מעגלית קבועה.

רגע לאחר מכן מניחים מסה נוספת m_2 במסלול של m_1 והמסות מתנגשות התנגשות פלסטית.

מצאו את מהירות המסות לאחר ההתנגשות.

3) שתי מחליקות על הקרח



שתי מחליקות תאומות בעלות מסה זהה m מחליקות בכיוונים מנוגדים ובמהירות v_0 .

המחליקות נעות על קווים ישרים והמרחק בין הקווים הוא d . באמצע ביניהן שמים חבל.

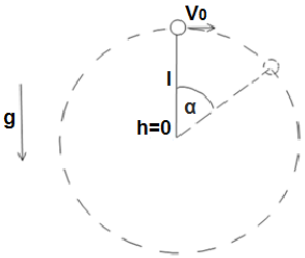
כאשר הן מגיעות לחבל, שתיהן תופסות את החבל ומתחילות להסתובב סביב המרכז ביניהן.

א. מה המהירות הזוויתית שהן מסתובבות?

ב. כעת המחליקות מושכות את החבל ומתקרבות זו לזו עד אשר המרחק ביניהן הוא $\frac{d}{2}$.

מצא את המהירות הזוויתית החדשה של המחליקות.

4) כדור מסתובב אנכית



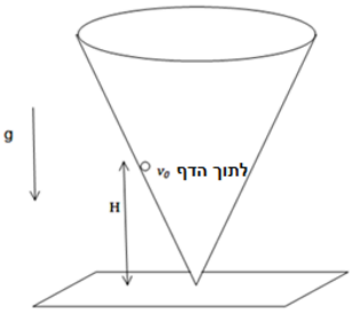
כדור בעל מסה m מחובר לחוט בעל אורך l ומסתובב במעגל אנכי.

נתון כי מהירת הכדור בשיא הגובה היא v_0 .

א. מצא את מומנט הכוח הפועל על הכדור כפונקציה של הזווית α .

ב. מצא את התנע הזוויתי של הכדור כפונקציה של הזווית α .

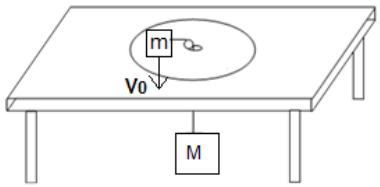
5) כדור בתוך חרוט



כדור קטן נע בתוך חרוט המחובר הפוך למשטח.
נתון כי מהירות הכדור ההתחלתית היא v_0
בכיוון אופקי ומשיק לדופן החרוט.
גובהו ההתחלתי H.
מצא את הגובה המקסימאלי אליו יגיע הכדור
(החרוט אינו זז).
הנחיות: מספיק להגיע למשוואה ממעלה שלישית
על h אין צורך לפתור אותה.

6) כדור מסתובב מחובר למסה תלויה

מסה m נעה על שולחן חסר חיכוך ומחובר באמצעות
חוט העובר דרך מרכז השולחן למסה M התלויה באוויר.
אורך החוט הוא L. נתון כי ב- $t=0$ המסה M
נמצאת במנוחה והמסה m נמצאת במרחק R
ממרכז הלוח, במהירות התחלתית v_0,
בכיוון מאונך לרדיוס.
רשום את משוואת שימור האנרגיה והתנע הזוויתי
ומצא משוואה דיפרנציאלית התלויה רק בגודל r,
מרחק המסה m ממרכז השולחן.



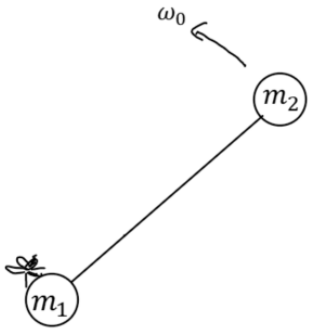
7) מומנט הכוח לא תלוי בנקודת הייחוס

הוכיחו כי אם הכוח השקול על קבוצת גופים מתאפס אז מומנט הכוח על קבוצת
הגופים אינו תלוי בנקודת הייחוס.

8) תנע זוויתי לא תלוי בנקודת ייחוס

הוכיחו כי אם התנע הקווי של קבוצת גופים מתאפס אז התנע הזוויתי שלהם לא
תלוי בנקודת הייחוס.

9) זבוב הולך על מוט*



שתי מסות נקודתיות m_1 ו-m_2 מחוברות באמצעות מוט חסר מסה באורך d.
על המסה m_1 נמצא זבוב בעל מסה m_3.
כל המערכת נמצאת על שולחן אופקי ומסתובבת סביב מרכז המסה שלה במהירות זוויתית קבועה ω_0.
ברגע מסוים הזבוב מתחיל ללכת על המוט במהירות v ביחס למוט ונעצר כאשר הוא מגיע למרכז המסה של שלושת הגופים (שימו לב שהמוט לא מחובר לשולחן).
מהי המהירות הזוויתית של המערכת כאשר הזבוב נעצר?

תשובות סופיות:

1) א. $-\frac{1}{2}gt^2v_0m\cos\alpha\hat{z}$ ב. $-mgv_0\cos\alpha t\hat{z}$ ג. שאלת הוכחה.

2) $u=\frac{m_1r_1v_0}{r_2\left(m_1+m_2\right)}$

3) א. $\omega'=\frac{2v_0}{d}$ ב. $\omega''=\frac{8v_0}{d}$

4) א. $\sum\vec{\tau}=-mgl\sin\alpha$ ב. $\dot{L}=lmv\left(-\hat{z}\right)$

5) $\left(2gH+v_0^2\right)h_{max}^2+2gh_{max}^3+v_0^2H^2$

6) $a+br+\frac{c}{r^2}=$ אקסי

7) שאלת הוכחה.

8) שאלת הוכחה.

9) $\omega'=\frac{\left(m_1+m_3\right)\left(m_1+m_2\right)}{m_1\left(m_1+m_2+m_3\right)}\omega_0$

תנע זוויתי ביחס למרכז מסה:

רקע

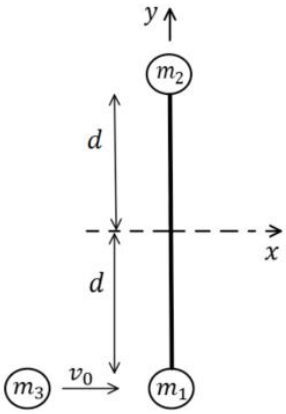
$$\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.} + \vec{L}_{c.m.}$$

$\vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.}$ - התנע הזוויתי של מרכז המסה כאילו הוא גוף נקודתי שהמסה שלו היא מסת כל המערכת

$\vec{L}_{c.m.}$ - התנע הזוויתי ביחס למערכת מרכז המסה, כלומר מה התנ"ז של כל גוף במערכת ביחס לצופה הנע בנקודת מרכז המסה.

שאלות:

1) מסה מתנגשת במוט עם שתי מסות



שתי מסות נקודתיות m_1 ו-m_2 מחוברות באמצעות מוט חסר מסה באורך $2d$. המערכת נמצאת במנוחה על שולחן אופקי חסר חיכוך (שתי המסות על השולחן, המוט אופקי). מסה שלישית m_3 נעה במהירות v_0 ומתנגשת התנגשות פלסטית במסה m_1 .

נסמן את רגע ההתנגשות ב-$t = 0$.

$d = 3m\,, v_0 = 6\frac{m}{sec}\,,\ m_1 = m_2 = m_3 = 0.2kg$.

א. חשבו את מיקום מרכז המסה ברגע $t_1 = 0.5sec$ ביחס לראשית הנמצאת במרכז המוט בהתחלה ואינה נעה עם המוט.

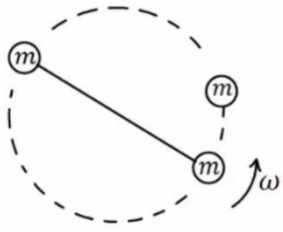
ב. חשבו את התנע הזוויתי של המערכת ביחס לראשית הצירים ברגע t_1.

ג. חשבו את התנע הזוויתי של המערכת ביחס למרכז המסה שלה ברגע t_1.

ד. מצאו את המהירות הזוויתית של המוט ביחס למרכז המסה לאחר ההתנגשות.

ה. מהי המהירות הקווית של m_1 ומהי המהירות הקווית של m_2 מיד לאחר ההתנגשות?

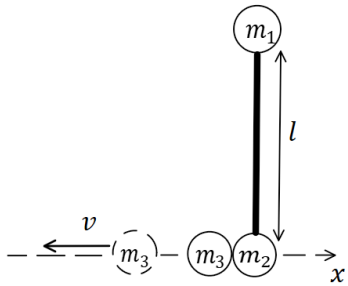
2) שתי מסות מחוברות מסתובבות ומתנגשות בשלישית



שתי מסות זהות m מחוברות במוט חסר מסה באורך d ומסתובבות סביב מרכז המסה שלהן במהירות זוויתית קבועה ω. אחת המסות מתנגשת התנגשות פלסטית במסה זהה נוספת הנמצאת במנוחה.
מצא את מהירות מרכז המסה של שלושת המסות המחוברות לאחר ההתנגשות ואת המהירות הזוויתית שלהן סביב מרכז המסה של שלושתן.

3) מסה נפרדת ממוט עם שתי מסות

שלוש מסות m_1 ,m_2 , m_3 נתונות ומחוברות לקצה של מוט באורך l.



המסות m_2 , m_3 מחוברות בקצה התחתון באויר והמסה m_1 בקצה העליון.
המוט נמצא על שולחן חסר חיכוך (באויר המבט מלמעלה) ובמנוחה.
ברגע מסוים יש פיצוץ בין המסות m_2 , m_3 והמסה m_3 מתנתקת מהמוט וממשיכה במהירות v נתונה (ביחס לשולחן) ובמאונך למוט.
המסה m_2 נשארת מחוברת למוט.
נתון כי: $m_3 = 3M$, $m_2 = M$, m_1.

א. מצא את מהירות מרכז המסה של המוט (עם המסות המחוברות).
ב. מצא את המהירות הזוויתית של המוט סביב מרכז המסה שלו.

תשובות סופיות:

1) א. $\vec{r}_{cm}(t_1) = (1_m - 1_m)$. ב. $L = 3.6kg \cdot \frac{m^2}{sec}$. ג. $L_{c.m.} = 4.8kg \cdot \frac{m^2}{sec}$.
ד. $\omega = 1\frac{rad}{sec}$. ה. $V_1 = 4\frac{m}{sec}\hat{x}$, $V_2 = -2\frac{m}{sec}\hat{x}$.

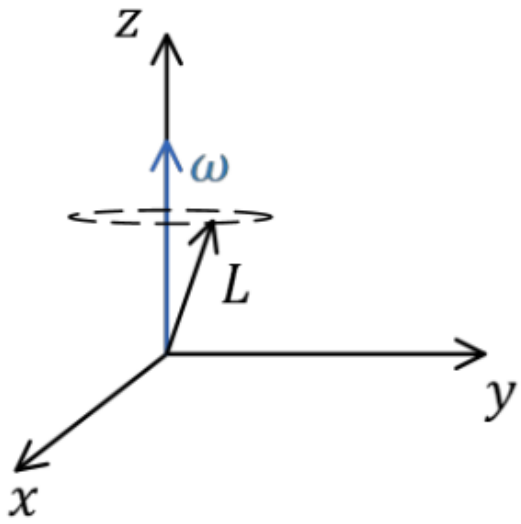
2) $\omega' = \frac{3}{4}\omega$, $u_{1,2,3_{c.m}} = 0$.

3) א. $v_{1,2_{c.m.}} = \frac{3}{2}v$ ב. $\omega = \frac{3v}{l}$

תרגילים בפרסציה:

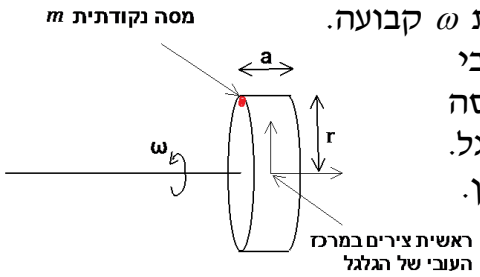
רקע:

בפרסציה לתנע הזוויתי יש רכיב במישור xy שמסתובב סביב ציר z . נגזרת בזמן של הרכיב הזה נותנת לנו את מומנט הכוח שפועל על המערכת.



שאלות:

1) נקודה על גלגל

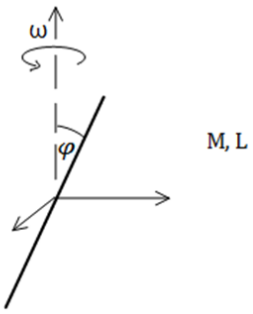


נתון גלגל בעל רדיוס r המסתובב במהירות זוויתית ω קבועה. לגלגל עובי a וראשית הצירים נמצאת במרכז העובי של הגלגל. אל הקצה העליון של הגלגל מחוברת מסה נקודתית m (ראה ציור) המסתובבת ביחד עם הגלגל.

א. הראה כי התנע הזוויתי של המסה תלוי בזמן.

ב. הראה כי שינוי התנע הזוויתי ניתן ע"י מומנט הכוח של הכוח הצנטריפטלי.

2) מוט מסתובב בזווית עם הציר האנכי



מוט בעל אורך l ומסה M מונח בזווית φ ביחס לציר ה- z .

המוט מסתובב סביב ציר ה- z במהירות זוויתית קבועה ω .

מצא את מומנט הכוח שפועל על המוט.

תשובות סופיות:

1) שאלת הוכחה.

2) $\sum \vec{\tau} = -\frac{\omega^2 Ml^2 \sin\varphi}{3}\hat{\theta}$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 16 - גוף קשיח

תוכן העניינים

1. הגדרות, ציר סיבוב ותנע קווי 219
2. תנע זוויתי של גוף קשיח 220
3. אנרגיה סיבובית של גוף קשיח 223
4. ניתוח לפי כוחות ומומנטים וגלגול ללא החלקה 226
5. גלגול עם החלקה 229
6. תרגילים מסכמים 230
7. תרגילים מסכמים כולל פרסציה 237

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

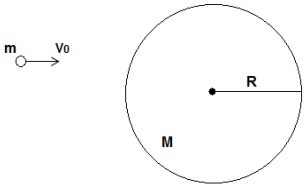
תנ"ז של תנועה משולבת (ציר שזז, כלומר הגוף גם זז וגם מסתובב):

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

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

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

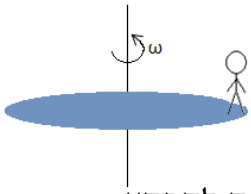
שאלות:



1) כדור מתנגש בדיסקה

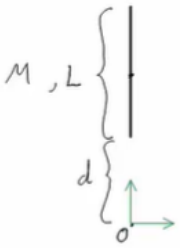
דסקה בעלת מסה M ורדיוס R מחוברת באמצעות ציר העובר במרכזה לשולחן אופקי חסר חיכוך.
כדור פלסטלינה בעל מסה m נע במהירות V_0 לעבר הדסקה.
הכדור פוגע בדסקה משמאלה, ובמרחק d ממרכזה. הכדור נדבק לדסקה ושניהם מתחילים להסתובב יחדיו (סביב הציר במרכז הדסקה). הדסקה נמצאת במנוחה לפני הפגיעה וכוח הכובד אינו משפיע על הגופים (המערכת אופקית).
מצא את המהירות הזוויתית בה יסתובבו הגופים לאחר הפגיעה.

2) אדם קופץ מדיסקה



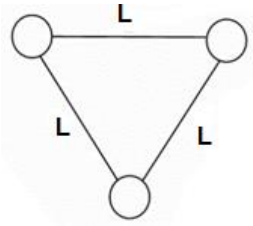
נתונה דסקה בעלת רדיוס R המסתובבת סביב מרכזה במהירות זוויתית קבועה ω. בקצה הדסקה עומד איש נקודתי ומסתובב ביחד עם הדסקה. ברגע מסוים האיש קופץ מהדסקה ונתון כי מהירותו מיד לאחר הקפיצה היא V_0 בכיוון הרדיאלי, ביחס לקרקע.
מצא את המהירות הזוויתית של הדסקה לאחר הקפיצה אם נתונים מסת האיש m ומסת הדסקה M.

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 ω נתונה, סביב מרכז המסה שלו. ברגע מסוים ,כאשר הגוף נמצא במצב המתואר בציור, 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 ω 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:

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

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

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

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

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

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

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:*

$$E_k = \frac{1}{2} m v_o^2 + \frac{1}{2} I_o \omega^2 + m \vec{r}_{c.m.,o} \cdot (\vec{v}_0 \times \vec{\omega})$$

I_o - מומנט ההתמד ביחס לציר

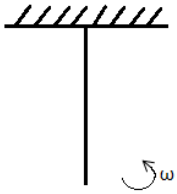
$\vec{v}_0$ - היא מהירות הציר

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

*השימוש בנוסחה מאוד נדיר

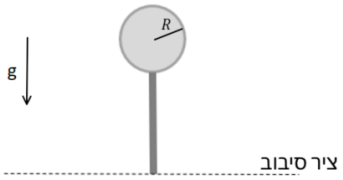
שאלות:

1) מוט מסתובב



מוט באורך L ומסה M מחובר לתקרה באמצעות ציר ויכול להסתובב.
למוט מהירות זוויתית התחלתית ω.
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.

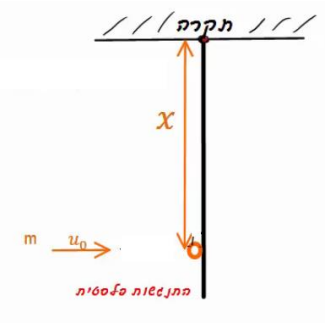
בקצה השני, המוט מחובר לציר אופקי.

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)



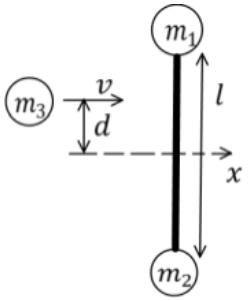
כדור בעל מסה m פוגע במוט שתלוי מהתקרה במרחק x מציר הסיבוב של המוט. המוט בעל אורך L ובעל מסה M. מהירותו ההתחלתית של הכדור היא μ_0 והוא מתנגש פלסטית עם המוט.

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 המחוברות 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 שיישאר במנוחה לאחר ההתנגשות.

תשובות סופיות:

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

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

3) א. $\omega = \frac{mv_0 x}{mx^2 + \frac{ML^2}{3}}$

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

ו-ω מצאנו בסעיף א'.

4) ג. $mu_0 = M\frac{L}{r} + mx$

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

ניתוח לפי כוחות ומומנטים וגלגול ללא החלקה:

רקע:

טבלת השוואה בין תנועה סיבובית לתנועה בקו ישר

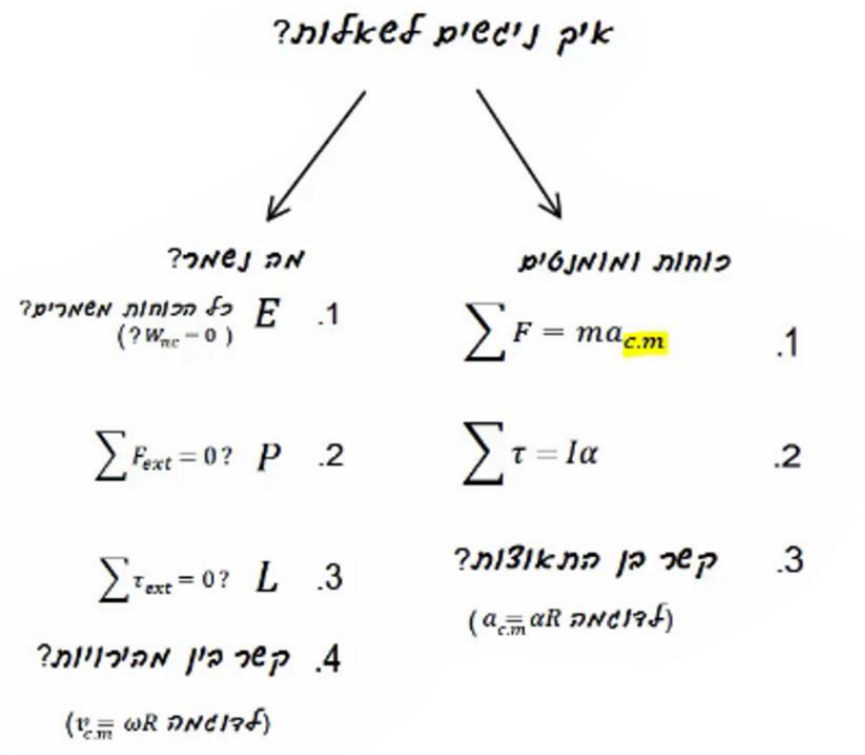
תנועה סיבובית	תנועה בקו ישר
θ	x
$\omega = \dot{\theta}$	$v = \dot{x}$
$\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\theta}$	$a = \dot{v} = \ddot{x}$
I	m
L	p
τ	F

כל הנוסחאות זהות בהחלפת אותיות

גלגול ללא החלקה:
מהירות הנקודה שנוגעת במשטח שווה לאפס

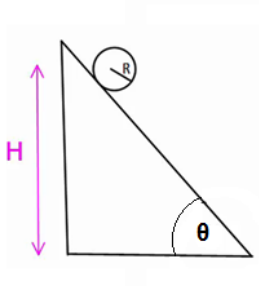
$$v_{c.m.} = \omega R$$
$$a_{c.m.} = \alpha R$$

בגלגול ללא החלקה החיכוך הוא סטטי ולכן אין איבוד אנרגיה.



שאלות:

1) דוגמה - כדור על מדרון משופע

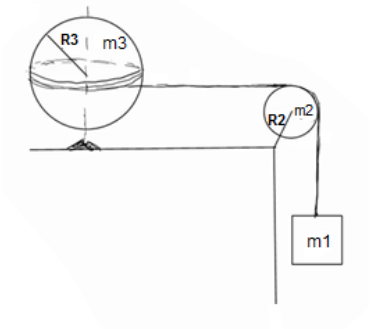


כדור בעל רדיוס R מונח בגובה H על מדרון משופע בעל זווית α. הכדור מתחיל להתגלגל ללא החלקה.

א. מצאו את מהירות הכדור בתחתית המדרון.

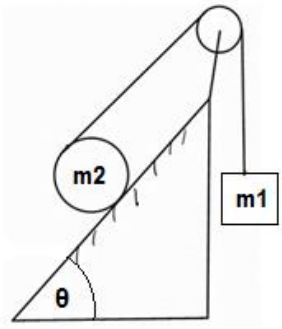
ב. מצאו את תאוצת הכדור.

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 θ.
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.

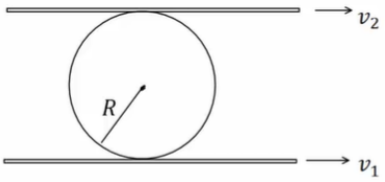
כעת המוט נופל עד להגיעו למצב מאונך לקרקע.

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

2) ראה סרטון.

3) ראה סרטון.

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

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

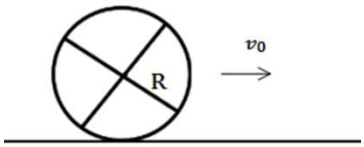
ד. $\alpha=0$, $a_y=a_r=-\omega^2\frac{L}{2}$, $a_\theta=0=a_{x_{c.m.}}$, $\sum F_y=ma_{y_{c.m.}}$, $\sum F_x=ma_{x_{c.m.}}$

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

גלגול עם החלקה:

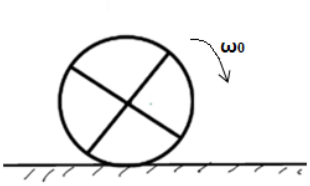
שאלות:

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 ω_0.
הכדור מונח על הרצפה בעודו מסתובב.
מצא את מהירותו הסופית אם נתון מקדם החיכוך הקינטי μ_k.

תשובות סופיות:

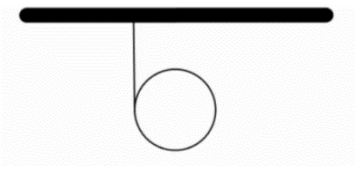
1) $V_{final} = \frac{5}{7}V_0$

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

תרגילים מסכמים:

שאלות:

1) חישוק מתגלגל מחבל

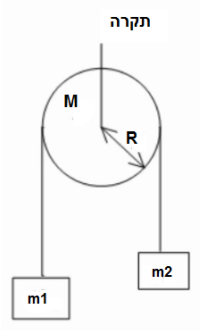


חבל מלופף סביב חישוק בעל רדיוס R ומסה m.
(החבל מחובר לתקרה).

א. מהי תאוצת מרכז המסה של החישוק?

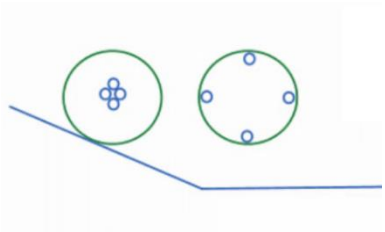
ב. לאחר כמה זמן ירד החישוק גובה של h אם התחיל תנועתו ממנוחה?

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.

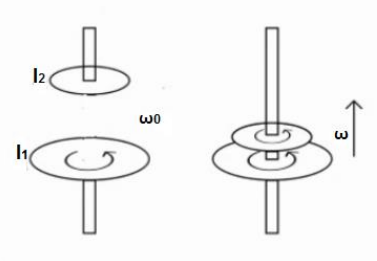
א. מה תהיה מהירותו לאחר שנפל מגובה h?
מה תהיה תאוצתו? כמה זמן תארך הנפילה?

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) מצמד

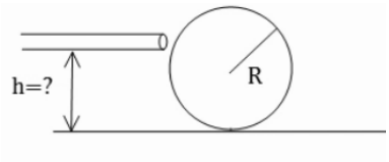


בכלי עבודה רבים קיים מנגנון הקרוי מצמד (קלאצ'). תפקיד המצמד הוא להעביר את הכוח המניע אל החלק המונע בצורה הדרגתית (למשל להעביר את כוח המנוע ברכב אל הגלגלים מבלי לגרום לתנועה פתאומית בגלגלים). המצמד מופעל ע"י הצמדת דסקה מסתובבת אל דסקה נייחת והעברת אנרגיה מזו לזו בעזרת כוח החיכוך.
לפניך מצמד הבנוי משתי 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

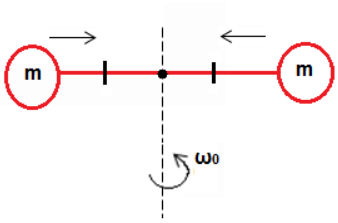
חוט מלופף מסביב לגליל המונח על מישור שאינו חלק. רדיוס הגליל הוא R ומסתו M.
כוח F נתון מושך את הגליל.
מצא את תאוצת הגליל במקרים הבאים אם ידוע שהגליל מתגלגל ללא החלקה:

א. הכוח פועל בכיוון אופקי.

ב. הכוח פועל בזווית θ 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.

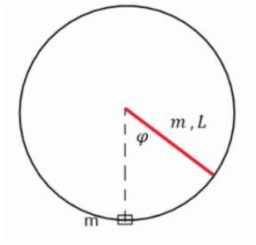
א. מה תהיה מהירות הסיבוב החדשה?

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 לולייניים בטרפז

בקרקס ישנו מכשיר הקרוי טרפז. על הטרפז נתלה לוליין המחזיק בידיו לוליין אחר. נתון כי צמד הלולייניים 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?

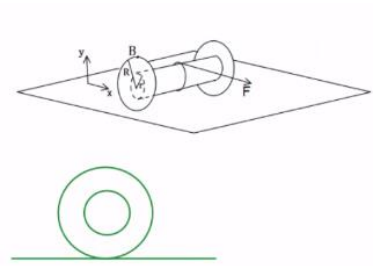
ג. מהי המהירות הזוויתית לאחר שסגר את גופו?

12) מוט מתגלש - מציאת מהירות

מוט בעל מסה m ואורך l מונח על רצפה וקיר חלקים בזווית נתונה θ_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 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.

14) עיפרון נופל*

עיפרון באורך L ניצב אנכית על משטח.
ברגע מסוים הוא מתחיל ליפול ימינה.
כאשר הזווית בינו לבין האנך למשטח מגיעה ל-θ_1 העיפרון מתחיל להחליק.

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

i. מצאו את המהירות הזוויתית של העיפרון ω.

ii. מצאו את התאוצה הזוויתית של העיפרון α.

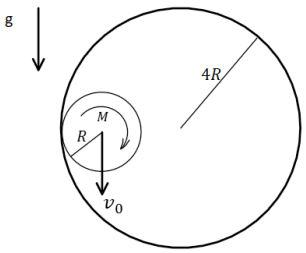
iii. מצאו את התאוצה הקווית של מרכז המסה של העיפרו

iv. מצאו את גודלו וכיוונו של כוח החיכוך.

v. מצאו את הכוח הנורמלי.

ב. מצאו את מקדם החיכוך הסטטי μ_s.

15) גליל בתוך גליל*



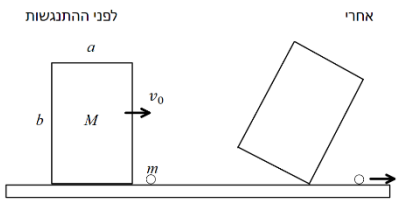
גליל מלא ברדיוס R ומסה M המפולגת אחידה מתגלגל ללא החלקה בתוך גליל גדול ודק שרדיוסו $4R$.
הגליל הגדול מקובע במקומו.

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 גלגול ללא החלקה אם מקדם החיכוך μ_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 הגלגול כבר לא חייב להיות ללא החלקה.
מצא את מהירות מרכז הגליל (לא מרכז המסה) לאחר הפגיעה.

16) תיבה מתנגשת באבן*

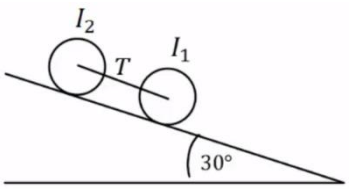


תיבה דו מימדית בגודל $a\times b$ ומסה M נעה על משטח אופקי חלק במהירות v_0.
ברגע מסוים התיבה מתנגשת התנגשות אלסטית באבן עם מסה m הנמצאת במנוחה על המשטח.
כתוצאה מההתנגשות התיבה ממשיכה בתנועה ימינה אך גם מתחילה להסתובב.
ניתן להניח שהפינה הימנית תחתונה של התיבה כל הזמן נוגעת בקרקע.

א. מה התנאי על v_0 כך שהתיבה לא תתהפך?

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

17) שני גלילים מחוברים בחוט על מדרון משופע*



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

תשובות סופיות:

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

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

3) ראה סרטון.

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

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

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

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

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

9) ראה סרטון.

10) ראה סרטון.

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

12) $\sqrt{\frac{3}{4}gls\sin\theta_0}$

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

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

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

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

ב. $f_{s_{max}}(\theta_1)=\mu_sN(\theta_1)$

15) א. $f_s=\frac{mg}{3}$, $v_0\geq\sqrt{\frac{Rg}{\mu_s}}$ ב. $v_1=\sqrt{v_0^2+4gR}$ ג. $v_0=\frac{1}{2}v_1$

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

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

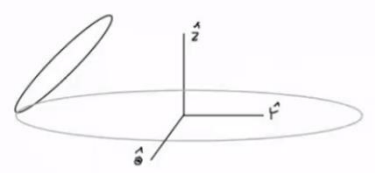
ב. $v_0 = 0$

17) $T \approx 0.22N$

תרגילים מסכמים כולל פרסציה:

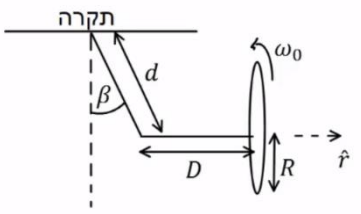
שאלות:

1) מטבע בזווית



נתונה דסקה המתגלגלת ללא החלקה במעגל ברדיוס R במהירות זוויתית ω.
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 β 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 β.

הנח שהזווית קטנה וניתן להשתמש בקירוב של זוויות קטנות: $\cos\beta \approx 1$, $\sin\beta \approx \beta$.
התייחס לגלגל כחישוק.

תשובות סופיות:

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

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

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 17 - כבידה וכוח מרכזי

תוכן העניינים

1. תנועה תחת כוח מרכזי וכוח הכובד 238
2. חוקי קפלר 246
3. בעיית שני הגופים ומסה מצומצמת ..... (ללא ספר)
4. תרגילים נוספים 248

תנועה תחת כוח מרכזי וכוח הכובד:

רקע:

כוח מרכזי:

כוח מהצורה:

$$\vec{F}(r) = f(r)\hat{r}$$

כלומר הוא תלוי רק ב r ובכיוון רדיאלי בלבד.

כוח מרכזי הוא כוח משמר (אנרגיה).
כוח מרכזי לא מפעיל מומנט כוח ולכן הוא משמר גם תנע זוויתי.

האנרגיה הפוטנציאלית של הכוח תלויה רק ב r, ואם הראנו שהאנרגיה הפוטנציאלית תלויה רק ב r אז זו הוכחה שהכוח מרכזי.

כוח הכובד:

$$\vec{F} = -\frac{GMm}{r^2}\hat{r}$$

כאשר:

$$G = 6.67384.10^{-11}m^{-3}kg^{-1}s^{-2}$$

קרוב לכדה"א:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{GM_Em}{{R_E}^2} \approx mg$$

באשר:

$$r \approx R_E \approx 6400km$$

$$M_E \approx 5.97 \cdot 10^{24}kg$$

$$g = \frac{GM_E}{{R_E}^2}$$

האנרגיה הפוטנציאלית של כוח הכובד:

$$U(r) = -\frac{GMm}{r}$$

הצורה הזו של האנרגיה היא צורה כללית שיש לכוחות נוספים והרבה פעמים רושמים אותה כ:

$$U(r) = -\frac{\alpha}{r}$$

כאשר α קבוע כלשהו.

המסלול של גוף תחת השפעת כוח הכובד:

$$r(\theta) = \frac{r_0}{1 + \varepsilon \cos\theta}$$

$$r_0 = \frac{L^2}{m\alpha}$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{m\alpha^2}}$$

E היא האנרגיה הכוללת של הגוף ו- L הוא התנ"ז.

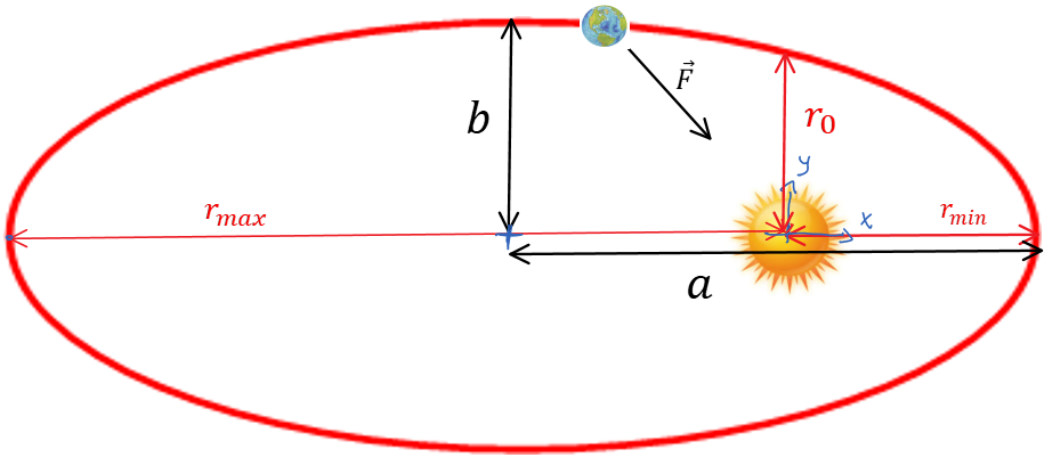
צורת המסלול מתחלקת ל-3 מקרים:

מקרה 1 - מעגל $\varepsilon = 0$

במקרה הזה ניתן להשוות את הכוח ל- $\frac{mv^2}{r}$ ולקבל ש:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

מקרה 2 - אליפסה $0 < \varepsilon < 1$



מקור הכוח נמצא באחד ממוקדי האליפסה:

$$v(r_{min}) = v_{max} \qquad v(r_{max}) = v_{min}$$

ובד"כ נמצא את המהירויות באמצעות שימור אנרגיה ותנ"ז:

$$r_{min} = \frac{r_0}{1+\varepsilon}$$

$$r_{max} = \frac{r_0}{1-\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{r_{max} - r_{min}}{r_{max} + r_{min}}$$

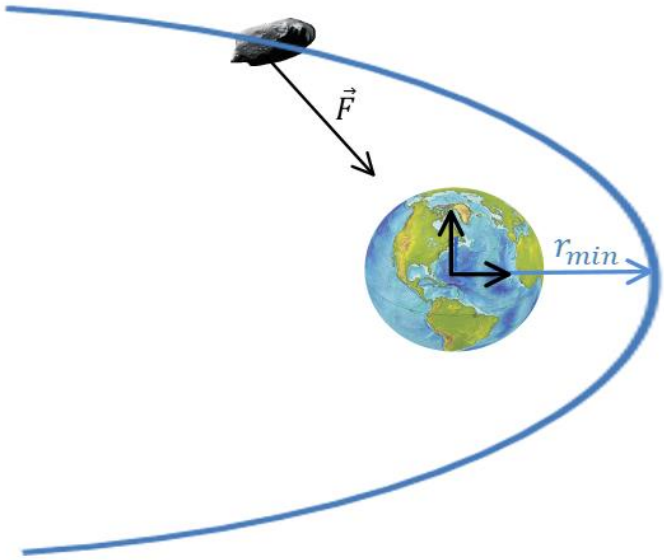
$$a = \frac{r_{min} + r_{max}}{2} = \frac{r_0}{1-\varepsilon^2} = -\frac{\alpha}{2E}$$

$$b = \frac{r_0}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}$$

שטח האליפסה:

$$S = \pi ab$$

מקרה 3 - היפרבולה $\varepsilon \geq 1$ (פרבולה כאשר $\varepsilon = 1$)



$$v(r_{min}) = v_{max}$$

מהירות מילוט:

המהירות הדרושה להגיע לאינסוף.

$$v_{escape} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

אנרגיה פוטנציאלית אפקטיבית:

בבעיות שבהן האנרגיה הפוטנציאלית תלויה רק ב r.
ניתן לרשום את האנרגיה הכוללת של הגוף כתלות במשתנה r בלבד.

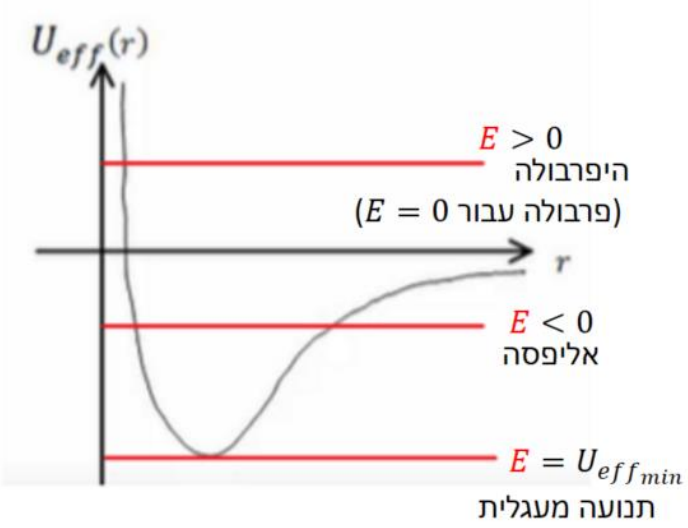
$$E = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + U_{eff}(r)$$

כאשר:

$$U_{eff}(r) = \frac{L^2}{2mr^2} + U(r)$$

עבור:

$$U(r) = -\frac{\alpha}{r}$$



שאלות:

1) טיל יוצא מכדה"א וחוזר

טיל נורה מכדור הארץ.
הטיל מתרחק מכדור הארץ וחוזר אליו בחזרה.
נתון שבאיזושהי נקודה במסלול המרחק של הטיל מכדה"א הוא R_1.

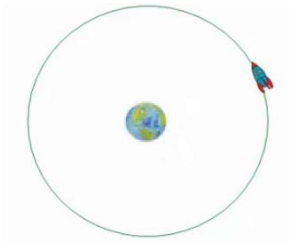
נתונה הזווית בין R_1 למהירות באותו הרגע v_1 היא 30 מעלות.

רדיוס כדה"א הוא R_E וזווית הפגיעה של הטיל בכדה"א היא θ.

א. מצא את: v_2 , v_1 , v_0 , θ_0. (v_2 מהירות פגיעת הטיל בכדה"א).

ב. חשב את: R_{max} (המרחק המקסימלי של הטיל מכדה"א)
ו- v_{min} (המהירות באותה נקודה).

2) חלק עף במהירות מילוט



חללית בעלת מסה m סובבת את כדה"א במסלול מעגלי ברדיוס R. ברגע מסוים החללית מתפצלת לשני חלקים.
אחד החלקים בעל מסה של שליש m עף בכיוון הרדיאלי במהירות המילוט.
מצא את הרדיוס המינימלי והמקסימלי של החלק השני.

3) פוטנציאל אפקטיבי

גוף בעל מסה m נע בתנועה מעגלית תחת השפעת הפוטנציאל: $U(r)=-\frac{A}{\sqrt{r}}$

כאשר A קבוע נתון. נתון גם התנע הזוויתי של הגוף L.

א. מצא את רדיוס המעגל.

ב. מצא את מהירות הגוף.

4) זמן מחזור

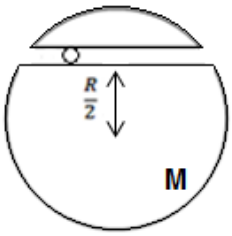
גוף בעל מסה m נע בקו ישר (מימד אחד) תחת הפוטנציאל: $U(x)=B|x|$.

נתון כי המרחק המקסימלי אליו מגיע הגוף הוא A.

א. מצא את ערך האנרגיה הכללית של הגוף.

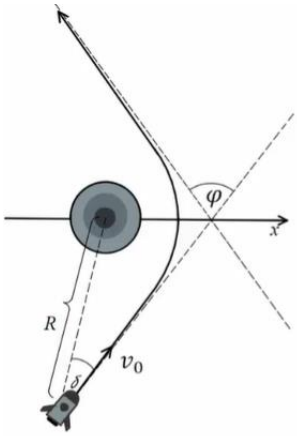
ב. מצא את זמן המחזור.

5) גוף זז במנהרה במרחק מהמרכז



גוף נע במנהרה הנמצאת במרחק $\frac{R}{2}$ ממרכז כדור בעל מסה M.
הגוף מתחיל ממנוחה בקצה המנהרה ואין חיכוך.
מצא את מיקום הגוף כפונקציה של הזמן.

6) מדידת מסה של חור שחור



חור שחור הינו גוף שמימי כבד מאוד.
כדי למדוד את המסה M של חור שחור הנמצא במרחק גדול מאוד R מאתנו ובמנוחה ביחס אלינו, יורים לעברו טיל בעל מסה m הקטנה מאוד ביחס למסת החור.
המהירות ההתחלתית של הטיל היא v_0 והיא מוסטת בזווית δ קטנה מאוד לכיוון המדויק אל החור.
מכשור שנמצא על הטיל יכול להורות לנו מה הזווית φ אליו הוסט הטיל לאחר זמן רב ביחס לזווית ממנה התחיל.
ניתן להניח כי האנרגיה הפוטנציאלית במרחק R זניחה.

א. מהי האקסצנטריות של מסלול הטיל סביב החור השחור?
מהו סוג המסלול? (מעגל, אליפסה או היפרבולה).

ב. מהי הזווית של מהירות הטיל לאחר שהתרחק מאוד מהחור ביחס לציר ה-x?

ג. מצא קשר בין הזווית של סעיף ב' ל-φ ובטא את מסת החור באמצעות: φ , δ , v_0 , R , m.

תשובות סופיות:

1) ראה סרטון.

2) ראה סרטון.

3) א. $r_0=\left(\frac{2L^2}{mA}\right)^{\frac{2}{3}}$ ב. $v=\frac{L}{m\left(\frac{2L^2}{mA}\right)^{\frac{2}{3}}}$

4) א. $E\left(x_{max}\right)=0+B\cdot A$ ב. $T=8A\sqrt{\frac{2B}{m}}$

5) $x(t)=-\frac{\sqrt{3}}{2}R\cos\left(\sqrt{\frac{GM}{R^3}}t\right)$

6) א. היפרבולה, $\varepsilon=\sqrt{1+\left(\frac{v_0^2R\sin\delta}{GM}\right)^2}$ ב. $\cos\theta=-\frac{1}{\varepsilon}$

ג. $M=\frac{1}{G}v_0^2R\sin\delta\tan\frac{\varphi}{2}$

חוקי קפלר:

רקע:

החוק הראשון של קפלר:

צורת המסלול של כל כוכב לכת סביב השמש היא אליפסה, שהשמש נמצאת באחד ממוקדיה.

החוק השני של קפלר - חוק השטחים השווים:

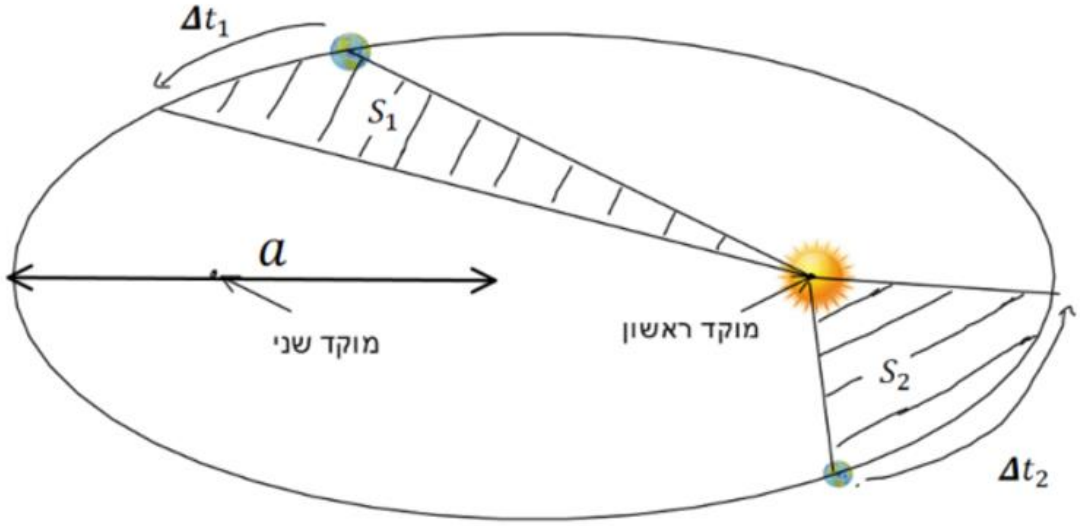
הקו שמחבר את כוכב הלכת עם השמש (רדיוס המקום) מכסה שטחים שווים במרחקים שווים.

מעבר לכך ניתן להגיד שגם אם הזמנים לא שווים היחס של השטח חלקי הזמן קבוע.

$$\frac{S_1}{\Delta t_1} = \frac{S_2}{\Delta t_2} = \frac{S_T}{\mathrm{T}}$$

S_T - שטח כל האליפסה

T - זמן המחזור



החוק השלישי של קפלר- החוק ההרמוני:

ריבוע זמן המחזור של כוכב לכת פרופורציוני לחזקה השלישית של מחצית הציר הראשי של האליפסה (semimajor axis).

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = \frac{a^3}{GM}$$

a - מחצית הציר הראשי של האליפסה

M - מסת הכוכב שבמוקד

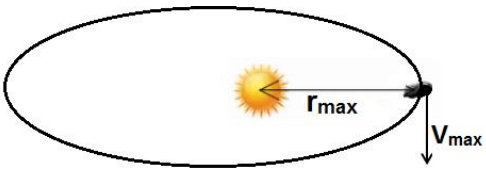
במקרה של מערכת בינארית שבה שני הכוכבים זזים הנוסחה היא:

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = \frac{a^3}{G(m1+m2)}$$

שאלות:

1) מציאת זמן מחזור

גוף נע סביב השמש במסלול אליפטי כך שמהירותו המקסימאלית ומרחקו המינימלי מהשמש נתונים.
נתון גם שטח האליפסה שעושה הגוף.
מצא את זמן המחזור של הגוף.

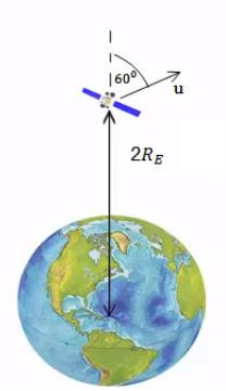


תשובות סופיות:

1) $T = \left(\frac{r_{min} v_{max}}{2S}\right)^{-1}$

תרגילים נוספים:

שאלות:

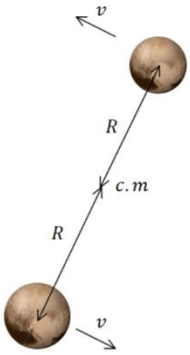


1) לווין נכנס למסלול אליפטי

לווין נורה אנכית מפני כדה"א.
הלווין מגיע לשיא גובה של $2R_E$.
ברגע זה ניתנת לו מהירות בכיוון 60 מעלות עם האנך לכדור הארץ שגודלה u.
(התעלם מסיבוב ותנועת כדור הארץ).

א. מצא תנאי על המהירות u כך שהלווין ישאר במסלול סגור.

ב. מצא תנאי נוסף על u כך שהלווין לא יפגע בכדור הארץ.



2) כוכב כפול

תצפית על כוכב כפול מסויים מראה כי לשני הכוכבים מהירות כמעט זהה ושווה ל 180 ק"מ לשניה.
זמן המחזור של הסיבוב הוא 17 ימים.
מכיוון שהמהירות כמעט זהה ניתן להסיק שהמרחק ממרכז המסה כמעט זהה ומכאן שהמסות כמעט זהות.
חשבו את המרחק ממרכז המסה ואת המסה של כל כוכב.

3) יקום דו מימדי

ביקום דו מימדי פועל כוח שמרכזו בנקודה $(x_0\ ,\ y_0)$

וגודלו: $\frac{k}{\left((x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right)^{\frac{3}{4}}}$. כיוון הכוח הוא תמיד לכיוון מרכזו.

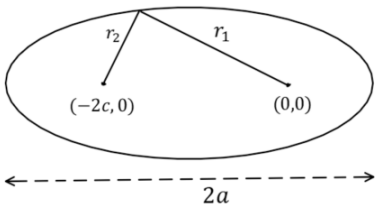
א. האם הכוח הוא כוח משמר? אם כן, מצא את האנרגיה הפוטנציאלית של הכוח.
חשב את העבודה שמבצע הכוח על מסה M אשר נעה בין הנקודה $(x_1\ ,\ y_1)$ לבין הנקודה $(x_2\ ,\ y_2)$.

ב. מסה M נמצאת במיקום $(Bx_0\ ,\ By_0)$ ויש לה מהירות: $\vec{v}=A(\hat{x}+\hat{y})$.
מה תהיה מהירות המסה כשהמרחק בינה לבין מרכז הכוח יהיה d?
($A\ ,\ B,\ d$ גדולים מאפס).

ג. מסה M נמצאת במרחק r_1 ממרכז הכוח.
למסה מהירות v_1 וידוע שהמסה נמצאת בשיווי משקל בכל זמן.
מצא קשר בין v_1 לבין r_1.

ד. פצצה בעלת מסה M מסתובבת סביב מרכז הכוח וברגע שגודל המהירות שלה הוא v_2 והמרחק שלה הוא r_2, כיוון המהירות מאונך לכיוון המיקום שלה ביחס למרכז הכוח. באותו הרגע הפצצה מתפוצצת לשני חלקים אחד בגודל m והשני בגודל $M-m$.
החלק $M-m$ ממשיך באותו כיוון מהירות כמו לפני הפיצוץ.
מה צריכה להיות מהירות החלק m על מנת שהחלק $M-m$ יהיה במרחק קבוע ממרכז הכוח לאחר הפיצוץ והלאה?

4) פיתוח משוואת האליפסה



$r_1+r_2=2a$

באליפסה סכום המרחקים של כל נקודה משני המוקדים של האליפסה הוא קבוע ושווה ל- $2a$ (רוחב האליפסה).
נתונה אליפסה שהמוקדים שלה נמצאים בנקודות $(0,0)$ ו- $(-2c,0)$.

הראו כי משוואת האליפסה היא: $r(\theta)=\frac{r_0}{1+\varepsilon\cos\theta}$ כאשר $\varepsilon=\frac{c}{a}$

ו- $r_0=\frac{(a^2-c^2)}{a}$.

תשובות סופיות:

1) א. $|u|<\sqrt{\frac{GM}{R_E}}$ ב. $\sqrt{\frac{GM}{2R_E}}<|u|<\sqrt{\frac{GM}{R_E}}$

2) $R=4.2\cdot10^{10}m,\quad M=8\cdot10^{31}kg$

3) א. משמר, $U(r')=-2kr'^{-\frac{1}{2}}$ כאשר $r'=\left((x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right)^{\frac{1}{2}}$,

$$W=2k\left[\left((x_2-x_0)^2+(y_2-y_0)^2\right)^{-\frac{1}{4}}-\left((x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2\right)^{-\frac{1}{4}}\right]$$

ב. $v=\left(2A^2-\frac{4k}{m}\left[d^{-\frac{1}{2}}-(B-1)^{-\frac{1}{2}}\cdot\left(x_0^2+y_0^2\right)^{-\frac{1}{4}}\right]\right)^{\frac{1}{2}}$ ג. $v_1=\sqrt{\frac{k}{m}}\,r_1^{-\frac{1}{4}}$

ד. אחורה $u_2=\frac{1}{m}(M-m)\sqrt{\frac{k}{m}}r_1^{-\frac{1}{4}}-\frac{M}{m}v_1$

4) הוכחה.

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 18 - יחסות פרטית

תוכן העניינים

1. טרנספרמציית לורנץ למיקום והזמן 251
2. טרנספורמציית לורנץ למהירות 256
3. תרגילים לטרנפרמציית מיקום ומהירות 257
4. דינמיקה יחסותית 260
5. תרגילים לדינמיקה יחסותית 265
6. תרגילים נוספים 267

טרנספרמציית לורנץ למיקום והזמן:

רקע:

תורת היחסות הפרטית עוסקת בתיאור של מאורעות מנקודת המבט של צופים הנמצאים במערכות ייחוס שונות.

מערכות הייחוס תמיד יהיו מערכות אינרציאליות (צופים שזזים במהירות קבועה ביחס למערכת הכוכבים).

הגדרת מאורע:

מאורע הוא אירוע פיזיקאלי המוגדר בזמן ובמרחב.
כל מאורע ניתן לתאר ע״י ארבע קואורדינטות (x, y, z, t).

עקרונות יסוד בתורת היחסות:

חוקי הפיזיקה זהים בכל המערכות האינרציאליות.

האור אינו צריך תווך בשביל לעבור בו.

מהירות האור קבועה וזהה בכל מערכות הייחוס.

אף גוף אינו יכול לנוע יותר מהר ממהירות האור בוואקום. כתוצאה מכך מדידת הזמן שונה בין מערכות הייחוס.
הזמן הופך לקואורדינטה רביעית (ביחד עם x, y, z) שעוברת טרנספורמציה.

טרנספורמציית לורנץ למיקום והזמן:

$$x' = \gamma_o(x - v_o t)$$

$$t' = \gamma_o\left(t - \frac{v_o x}{c^2}\right)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$\beta = \frac{v_o}{c}$$

$$\gamma_o = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_o}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

טרנספורמציה הפוכה:

$$x = \gamma_o\left(x' + v_o t'\right)$$

$$t = \gamma_o\left(t' + \frac{v_o x'}{c^2}\right)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

תנאים לשימוש בטרנספורמציית לורנץ:

הצירים של המערכות מקבילים.

בזמן: $t = t' = 0$ הראשיות מתלכדות.

המערכת העצמית:

מערכת עצמית היא מערכת בה המאורע הנצפה נמצא במנוחה.

זמן עצמי τ - מוגדר להיות הפרש הזמנים בין שני מאורעות כפי שהוא נמדד במערכת העצמית שלהם.

אורך עצמי - האורך של גוף כפי שנמדד במערכת בו הגוף נמצא במנוחה.

התכווצות האורך:

$$l = \frac{l_0}{\gamma_0}$$

l_0 - האורך העצמי

התארכות הזמן:

$$\Delta t = \gamma_0 \tau > \tau$$

שינוי זווית במדידת אורך:

$$tan\,\theta = \gamma_0\, tan\,\theta'$$

θ' - זווית במערכת העצמית

אפקט דופלר היחסותי:

זמן המחזור של הגל:

$$T = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}\tau$$

אורך הגל:

$$\lambda = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}\lambda'$$

λ' - אורך הגל במערכת העצמית

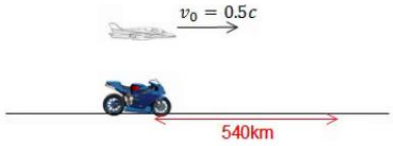
תדירות הגל:

$$f = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} f'$$

f' - תדירות במערכת העצמית

שאלות:

1) מציאת מהירות ומיקום אופנוע

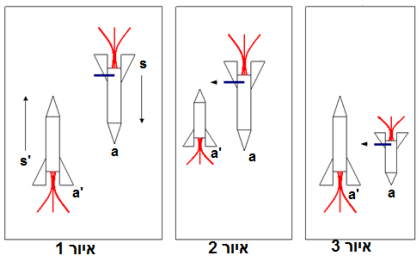


אופנוע נוסע במהירות קבועה בקו ישר.
צופה על הקרקע מודד כי האופנוע נסע מרחק של 540km.
צופה הנע במטוס ממש מהיר $v = 0.5c$, בכיוון נסיעת האופנוע, מודד כי משך זמן נסיעת האופנוע היה 0.01 שניה.

א. מצא את מהירות האופנוע במערכת כדה"א.

ב. מצא את המרחק שעבר האופנוע כפי שמדד הצופה במטוס.

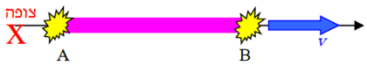
2) בדיקת ירי



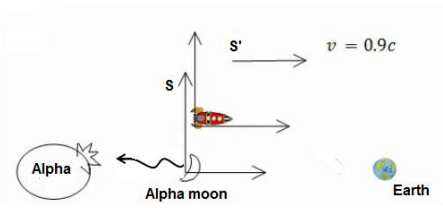
שתי חלליות בעלות אורך מנוחה זהה, עוברות זו במקביל לזו במהירות גבוהה.
בזנב החללית S מצוי תותח המכוון בניצב לכיוון תנועת החללית ולעבר מסלול התנועה של החללית 's (איור 1).
בחללית S מתבצעת בדיקת ירי בתותח ברגע שהנקודה a בראש החללית מתלכדת עם הנקודה 'a (זנב 's).
מכיוון שאורך החללית 's קצר מהאורך העצמי בחללית ב-s מניחים כי הטיל יפספס את החללית השנייה (איור 2).
אולם במערכת 's אורך החללית S קצר מהאורך העצמי ולכן כאשר a ו-'a מתלכדות האסטרונאוט S יפגע (איור 3).
ישב/י את הפרדוקס.

3) מוט פולט אור לסירוגין

מוט בעל אורך l_0 נע במהירות V נתונה ביחס לכדה"א.
נתון כי ב- $t=0$ הקצה השמאלי של המוט נמצא ב- $x=x'=0$.
ברגע זה המוט פולט אור מקצהו הימני.
לאחר זמן τ המוט פולט אור מקצהו הימני.
מצא את הפרש הזמנים כפי שרואה אותם צופה מכדה"א
(הפרש הזמנים בין הגעת האור משני המאורעות לראשית).



4) פיצוץ בכוכב אלפה



החללית אנטרייז יוצאת מכוכב אלפה חזרה לכדה"א.
בדרך היא עוברת ליד הירח של כוכב אלפה ורואה
פולס אלקטרו מגנטי חזק יוצא לכיוון הכוכב.
ידוע שבירח ישנה קבוצת חייזרים תוקפניים בשם
ה"קליגונים". 1.3 שניות מאוחר יותר היא רואה
פיצוץ בכוכב. המרחק בין הכוכב לירח שלו
הוא 500 מיליון מטרים כפי שנמדד במערכת החללית.
מהירות החללית ביחס לכוכב ולירח היא $0.9c$.

א. מהו מרווח הזמן בין גילוי הגל לפיצוץ במערכת הכוכב והירח?

ב. מה משמעות הסימן בהפרש הזמן?

ג. האם הפולס גרם לפיצוץ או להיפך?

תשובות סופיות:

1) א. $v=5.65\cdot10^7\frac{m}{sec}$ ב. $x'_2=-10.32\cdot10^5 m$

2) ראה סרטון.

3) $\Delta t=\gamma_0(1+\beta)\left(\tau-\frac{l_0}{c}\right)$

4) א. $t_3=-3.525sec$ ב. הפיצוץ היה לפני הגעת הגל לכוכב וגם לפני ירי הגל.

ג. לא יכול להיות שהפיצוץ גרם לירי של הפולס, $x_2=11.47\cdot10^8\cdot m>10.575\cdot10^8 m$

טרנספורמציית לורנץ למהירות:

רקע:

$$v_x' = \frac{v_x - v_0}{1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}}$$

$$v_y' = \frac{v_y}{\gamma_0\left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}\right)}$$

$$v_z' = \frac{v_z}{\gamma_0\left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}\right)}$$

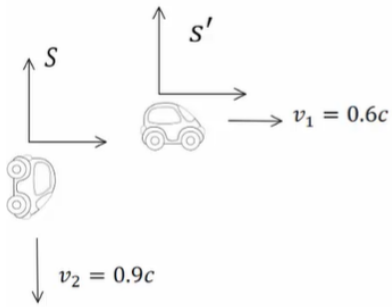
אברציה - שינוי זווית המהירות:

$$tan\,\theta' = \frac{sin\,\theta}{\gamma_0\left(cos\,\theta - \frac{v_0}{c}\right)}$$

שאלות:

1) מהירות יחסית בין מכוניות

שתי מכוניות נוסעות האחת במאונך לשנייה כך שמהירות המכונית הראשונה היא 0.6c ומהירות המכונית השנייה היא 0.9c.
מצא את המהירות היחסית.



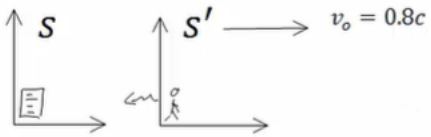
תשובות סופיות:

1) $v'_{2_x} = -0.6c$, $v'_{2_y} = -0.72c$

תרגילים לטרנספרמציית מיקום ומהירות:

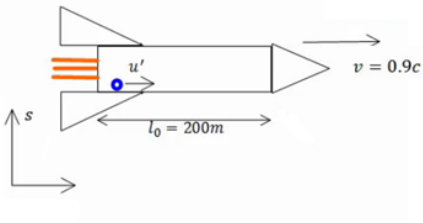
שאלות:

1) דודה יוצאת לטיול



המבחן בפיזיקה התחיל בשעה 9:00 והמשגיחה יצאה לטייל במהירות $0.8c$ (דודה זריזה במיוחד). לאחר שעה לפי שעונה היא שולחת לסטודנטים אות רדיו לסיים את הבחינה.
כמה זמן ארכה הבחינה עבור הסטודנטים?

2) כדור מתגלגל בחללית



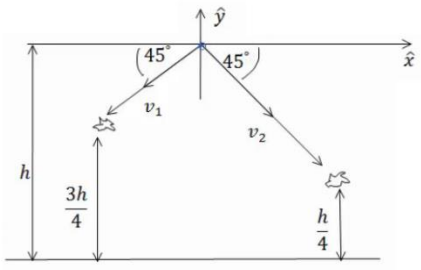
חללית בעלת אורך עצמי של 200 מטר נעה במהירות $0.9c$ ביחס למערכת אינרציאלית S.
כדור קטן מתגלגל לאורכה במהירות $u' = 0.04c$ בכיוון ציר x, כפי שנמדד ע"י צופה בחללית.

א. מהי מהירות הכדור כפי שנמדדת ע"י צופה ב-S?
(הבא את התשובה ביחידות של c).

ב. מהו הזמן שייקח לכדור לעבור מקצה לקצה של החללית כפי שנמדד ב-s?
(הבא את התשובה במיליוניות שנייה).

ג. איזה מרחק עבר הכדור לפי צופה במערכת s? (ביחידות של ק"מ).

3) חלקיקים נוצרים בגובה ומתפרקים



שני חלקיקים נוצרים בגובה h מעל הקרקע.
אחד נפלט בזווית 225 מעלות עם ציר ה-x
והשני בזווית 45– מעלות עם ציר ה-x.
החלקיק הראשון מתפרק לאחר זמן T בגובה $\frac{3h}{4}$
והחלקיק השני מתפרק לאחר זמן T_2 בגובה $\frac{h}{4}$.
התעלם מהכבידה בבעיה.

א. הבע את מהירויות החלקיקים באמצעות h ו-T.

ב. מצא את זמן החיים העצמי של כל חלקיק (זמן החיים במערכת המנוחה).

ג. מצא מערכת s' הנעה בכיוון החיובי של ציר ה-x בה ההתפרקויות מתרחשות באותו הזמן.

ד. מה המרחק בין ההתפרקויות במערכת s'?

4) מיואון מתפרק ליד אלקטרון

מיואון (μ) נוצר ברגע מסוים ונע במהירות $0.7c$ ביחס לקרקע.
המיואון מתפרק לאחר שנע 3 ק"מ ממקום היווצרו.

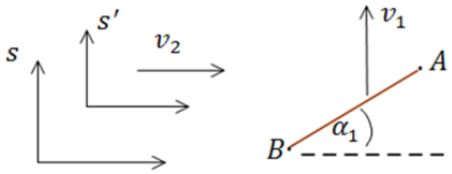
א. כמה זמן חי המיואון במערכת העצמית שלו?

אלקטרון נע במקביל למיואון ובמהירות $0.5c$ ביחס למעבדה.

ב. מהי מהירות המיואון ביחס לאלקטרון?

ג. איזה מרחק נע המיואון ביחס לאלקטרון.

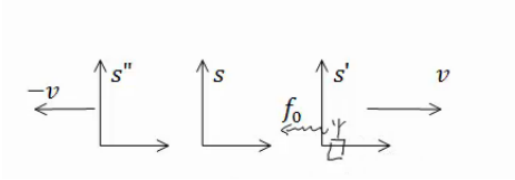
5) זווית של מוט נע



מוט בעל אורך l (לא נתון) נע במהירות v_1 בכיוון ציר ה- y ביחס לצופה הנמצא במעבדה.
הצופה במעבדה מודד זווית α_1 של המוט ביחס לציר ה- x.

איזו זווית ימדוד צופה הנע במהירות $v_2\hat{x}$ ביחס למעבדה?

6) תדר יחסי



במערכת s' הנעה במהירות v ביחס למערכת המעבדה S, נמצא משדר רדיו הפולט אותות בתדירות f_0 ?

א. מה תהיה התדירות שתיקלט במעבדה?

ב. מה תהיה התדירות שתיקלט במערכת s" הנעה במהירות $\vec{v}=-v\hat{x}$ ביחס למעבדה?

תשובות סופיות:

1) $\Delta t = 1.08\cdot 10^4 \sec$

2) א. $v_x = 0.907c$ ב. $t_1 = 39.62\mu s$ ג. $x_1 = 10.78km$

3) א. $v_1 = \frac{h}{2\sqrt{2}T}$, $v_2 = \frac{3h}{4\sqrt{2}T}$ ב. $\tau_1 = T\sqrt{1-\frac{h^2}{8T^2c^2}}$, $\tau_2 = 2T\sqrt{1-\frac{9h^2}{64T^2c^2}}$

ג. $v_0 = \frac{c^2T}{h}$ ד. $d'^2 = \frac{\frac{5h^4}{4} - 3c^2T^2h^2 + c^4T^4}{h^2 - c^2T^2}$

4) א. $\tau = 10^{-5} \sec$ ב. $V_{12} = 0.31c$ ג. $\Delta x_{12} = 0.98km$

5) $\tan\alpha' = \gamma_2\left(\tan\alpha_1 + \frac{v_1v_2}{c^2}\right)$

6) א. $f_s = \sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}}\, f_0$ ב. $f'' = \sqrt{\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right)^2}\, f_0$

דינמיקה יחסותית:

רקע:

תנע ואנרגיה יחסותיים:

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$
$$E = \gamma m c^2$$

הגודל γ קשור עכשיו למהירות הגוף עבורו נרצה לחשב את התנע ואינו קשור למעבר בין מערכות אינרציאליות שונות.

נוסחאות נוספות:

$$E^2 = |p|^2 c^2 + m^2 c^4$$
$$|p| = \sqrt{\gamma^2 - 1} \cdot mc$$

אנרגיית מנוחה:

$$E_0 = mc^2$$

אנרגיה קינטית:

$$E_k = E - E_0 = mc^2(\gamma - 1)$$

עבור חלקיקים מסוימים מסת המנוחה היא אפס (פוטון, ניוטרינו).

$$E = |p|c = \mathrm{h}\nu$$

ν – תדירות

קבוע פלאנק:

$$\mathrm{h} = 6.626 \cdot 10^{-34} j \cdot s$$

טרנספורמציה של התנע והאנרגיה:

$$E' = \gamma_0(E - v_0 p_x)$$
$$p_x' = \gamma_0(p_x - v_0 E/c^2)$$
$$p_y' = p_y$$
$$p_z' = p_z$$

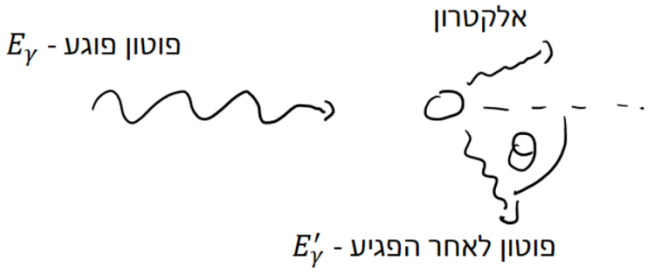
וקטור תנע אנרגיה:

$$\left(p_x, p_y, p_z, \frac{E}{c}\right)$$
$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \left(\frac{E}{c}\right)^2 = const$$

- הקבוע זהה בכל מערכות הייחוס.
- הנוסחה נכונה גם עבור מערכת עם יותר מגוף אחד כאשר התנע והאנרגיה הם התנע והאנרגיה של כל המערכת.
- עבור גוף יחיד הקבוע הוא: m^2c^2.

פיזור קומפטון:

פוטון הפוגע באטום הנמצא במנוחה, לאחר הפגיעה נפלט אלקטרון וכיוון התנועה של הפוטון משתנה.



$$\frac{1}{E_\gamma'} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)$$

E_γ - אנרגיית הפוטון לפני הפגיעה

E'_γ - אנרגיית הפוטון אחרי הפגיעה

m_e - מסת אלקטרון

θ - זווית התנועה של הפוטון ביחס לכיוון הפגיעה.

יחידת האלקטרון וולט:

$$1\ \text{eV} = 1.602\,176\,462 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

Object	Mass (kg)	Energy Equivalent	
Electron	$\approx 9.11 \times 10^{-31}$	$\approx 8.19 \times 10^{-14}$ J	(≈ 511 keV)
Proton	$\approx 1.67 \times 10^{-27}$	$\approx 1.50 \times 10^{-10}$ J	(≈ 938 MeV)
Uranium atom	$\approx 3.95 \times 10^{-25}$	$\approx 3.55 \times 10^{-8}$ J	(≈ 225 GeV)

ניתן גם לרשום את היחידות של התנע של גופים כ - $\frac{eV}{c}$.

שאלות:

1) הגעת נויטרון ממרחקים

מצא את האנרגיה הדרושה לנויטרון להגיע לכדור הארץ ממרחק של 5 שנות אור בהינתן שזמן החיים של נויטרון הוא 881 שניות והמסה שלו היא: $M_n = 940\text{Me}\frac{V}{c^2}$.

2) התנגשות בסיסית

חלקיק בעל מסה m מתנגש בחלקיק בעל מסה $3m$.

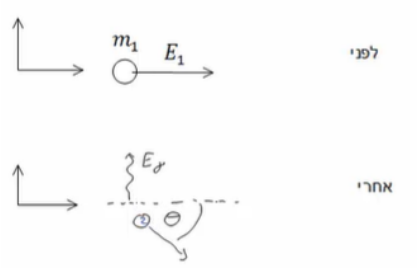
לחלקיק הראשון אנרגיה כוללת לפני ההתנגשות $5mc^2$ ונתון כי התנע הכולל שלהם במערכת המעבדה הוא אפס. כתוצאה מההתנגשות שני החלקיקים מושמדים ונוצר חלקיק חדש הנמצא במנוחה.

א. מצאו את האנרגיה הקינטית של החלקיק הראשון.

ב. מצאו את פקטור לורנץ של החלקיקים לפני ההתנגשות ואת האנרגיה הקינטית של החלקיק השני.

ג. מצאו את מסת החלקיק הנוצר לאחר ההתנגשות.

3) חלקיק מתפרק לפוטון וחלקיק נוסף



חלקיק בעל אנרגיה כוללת E_1 ומסת מנוחה m_1 נע במעבדה בכיוון החיובי של ציר ה- x.
ברגע מסוים מתפרק החלקיק לפוטון ולחלקיק נוסף.
אנרגיית הפוטון נתונה E_y וידוע כי הפוטון נע בציר ה- y, בכיוון החיובי.

א. מהו התנע של החלקיק הראשון לפני ההתפרקות?

ב. מהי הזווית של התנע של חלקיק 2 ביחס לציר ה- x?

ג. מצא מערכת ייחוס חדשה S' שבה הפוטון יפלט בכיוון נגדי לכיוון תנועתו של חלקיק מס' 2.
מה מהירותה של מערכת זו ביחס למערכת המעבדה?

4) פוטון פוגע בפרוטון ויוצר פיון

פוטון פוגע בפרוטון הנמצא במנוחה במערכת המעבדה.
נתונות מסת הפרוטון והפיון M_p, M_π.
מהי האנרגיה המינימלית הדרושה לפוטון על מנת שלאחר ההתנגשות ייווצרו פרוטון ופיון (π)?

5) דוגמה - חישוב תנע ואנרגיה קינטית של אלקטרון ופרוטון

חשבו את התנע והאנרגיה הקינטית של פרוטון ואלקטרון בעלי אנרגיה של 1GeV במערכת המעבדה.

6) דוגמה - גמה וביטה של אלקטרון

מסת האלקטרון היא: $9.10938188 \times 10^{-31}\ \text{kg}$ ומהירות האור היא: $299792458\ \text{m/sec}$.
מצאו בדיוק של 6 ספרות את γ ו-β של אלקטרון שהאנרגיה הקינטית שלו היא: $K = 100.000\text{MeV}$ במערכת המעבדה.

7) בטה של מיואונים מתפרקים

מסת מיואון היא פי 207 ממסת האלקטרון.
זמן מחצית החיים הממוצע של מיואון הוא $2.20\mu s$.
מיואונים נעים ביחס למעבדה בניסוי כלשהו.
זמן החיים הנמדד של המיואונים ביחס למערכת המעבדה הוא: $6.90\mu s$.
מהם β, התנע והאנרגיה הקינטית של המיואונים ביחידות $\frac{\text{MeV}}{\text{c}}$?

תשובות סופיות:

1) $E_n = 1.69 \cdot 10^8 \text{MeV}$

2) א. $E_{k_1 = 4mc^2}$ ב. $\gamma_1 = 5 \; , \; \gamma_2 = \sqrt{\frac{11}{3}} \; , \; E_{k_2} = 3mc\left(\sqrt{\frac{11}{3}} - 1\right)$ ג. $m_3 = 6.91m$

3) א. $\vec{p}_1 = \sqrt{\left(\frac{E_1}{c}\right)^2 - m_1^2 c^2} \cdot \hat{x}$ ב. $\tan\theta = -\frac{E_\gamma}{\sqrt{E_1^2 - m_1^2 c^4}}$

ג. $v_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{m_1 c^2}{E_1}\right)^2} \cdot c$

4) $E_\gamma = \frac{1}{2m_p}\left(m_\pi^2 + 2m_\pi m_p\right)c^2$

5) אלקטרון: $K = 0.999\text{GeV} \; , \; P = 1\frac{\text{GeV}}{c}$

פרוטון: $K = 0.062\text{GeV} \; , \; P = 0.347\frac{\text{GeV}}{c}$

6) $\gamma = 196.695 \; , \; \beta = 0.999987$

7) $\beta = 0.898 \; , \; P = 314\frac{\text{MeV}}{c} \; , \; K = 226\text{MeV}$

תרגילים לדינמיקה יחסותית:

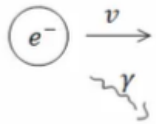
שאלות:

1) חלקיק מתפרק לשני חלקיקים

חלקיק בעל מסה m הנמצא במנוחה מתפרק לשני חלקיקים בעלי מסות מנוחה m_1 , m_2.

מה יהיו האנרגיה והתנע של החלקיקים שנוצרו? (כל המסות נתונות).

2) אלקטרון חופשי פולט פוטון



הראו כי אלקטרון חופשי הנע בואקום אינו יכול לפלוט פוטון בודד.

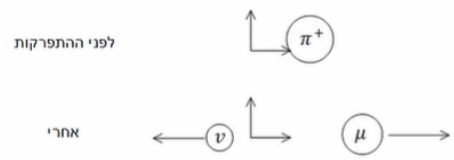
3) התנגשות חלקיקים זהים ויצירת חלקיקים

חלקיק בעל מסת מנוחה m פוגע בחלקיק זהה לו הנמצא במנוחה.

כתוצאה מההתנגשות נוצרים שני חלקיקים בעלי מסות מנוחה m_1 , ו-m_2.

מצא את אנרגיית הסף ליצירת ריאקציה זו. (הנח ש: $(m_1+m_2)>2m$).

4) פיון מתפרק



פיון (π^+) מתפרק למיואון חיובי ($M_\mu = 160Me\frac{V}{c^2}$)

וניטרינו חסר מסה.

מצא את מסת המנוחה של הפיון אם למיואון אנרגיה קינטית של $5MeV$.

5) פוטון מתנגש אלסטית באלקטרון

אלקטרון נע במהירות v ומתנגש בפוטון בעל אנרגיה E_γ הנע לקראתו.

מצא את הערך של v אם ידוע כי הפוטון מוחזר באותה אנרגיה בה פגע.

הנח כי מסת האלקטרון ידועה.

תשובות סופיות:

1) $E_1 = m_1c^2\gamma_1 = \frac{c^2}{2m}\left(m^2 + m_1^2 - m_2^2\right)$, $p_1 = c\sqrt{\frac{1}{2m}\left(m^2 + m_1^2 - m_2^2\right)^2 - 1}$,

$E_2 = m_2c^2\gamma_2 = \frac{c^2}{2m}\left(m^2 + m_2^2 - m_1^2\right)$, $p_2 = m_2c\sqrt{\gamma_2^2 - 1} = c\sqrt{\frac{1}{2m}\left(m^2 + m_2^2 - m_1^2\right)^2 - 1}$

2) שאלת הוכחה.

3) $E_{min} = \frac{1}{2m}c^2\left(\left(m_1 + m_2\right)^2 - 2m^2\right)$

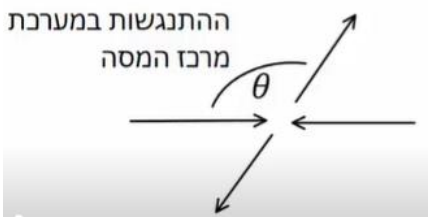
4) $M_\pi = 144\frac{MeV}{c^2}$

5) $v = c\left|1 - \left(\left(\frac{E_\gamma}{m_ec^2}\right)^2 + 1\right)^{-1}\right|^{\frac{1}{2}}$

תרגילים נוספים:

שאלות:

1) פוטון מתנגש ומעבר למרכז מסה



פוטון עם אנרגיה E_0 מתנגש אלסטית עם חלקיק בעל מסה m הנמצא במנוחה (במערכת המעבדה).

א. מצא את מהירות מערכת מרכז המסה של המערכת פוטון פלוס חלקיק.

ב. מצא את התנע והאנרגיה של החלקיק והפוטון לפני ההתנגשות במערכת מרכז המסה.
מצא את התנע והאנרגיה של הפוטון והחלקיק אחרי ההתנגשות אם ידוע שהפוטון מפוזר בזווית θ ביחס לכיוון בפגיעה במערכת מרכז המסה (ראה איור).

ג. מהם האנרגיה והערך המוחלט של התנע של הפוטון והחלקיק לאחר ההתנגשות במערכת המעבדה?

ד. מצא את הזווית θ עבורה האנרגיה של הפוטון במערכת המעבדה תהיה מינימלית.

2) שאלה 1

נתונים שני גופים הנעים בניצב זה לזה. ידוע כי מסת הגופים זהה ושווה ל- M, וכן כי התנעים של הגופים הם: p_1 , p_2.
ברגע מסוים, הגופים מתנגשים ומופיעים ארבעה גופים חדשים.
מסות הגופים החדשים שנוצרו הן: m , $2m$, $3m$, $4m$.
מהו m המקסימלי האפשרי?
נתון: $p_1 = 6Mc$, $p_2 = 17Mc$.

3) שאלה 2

נתונים שני חלקיקים בעלי מסה m, וכן נתונות האנרגיות שלהם E_1 , E_2.
החלקיקים נעים זה אל עבר זה, ומתנגשים.
חשבו את מסת החלקיק M הנוצר כתוצאה מהתנגשות החלקיקים.
נתון: $E_1 = 4mc^2$, $E_2 = 7mc^2$.

4) שאלה 3

שתי חלליות יוצאות מאותה נקודה, בכיוון ניצב אחת לשנייה.
חללית א' טסה במהירות v_1 , וחללית ב' טסה במהירות v_2 .
חשבו את וקטור המהירות של חללית ב' ביחס לחללית א'.
נתון: $v_1 = 0.8c(+\hat{x})$, $v_2 = 0.9c(-\hat{y})$

5) שאלה 4

חלקיקים 1,2 נוצרים במעבדה ונמצאים במנוחה.
ידוע לגבי זמני החיים שלהם כי: $t_2 = 0.75t_1$ (במצב מנוחה חלקיק 2 נעלם לפני חלקיק 1).
מהי המהירות אליה יש להאיץ את חלקיק 2, כדי שלא ידעך לפני חלקיק 1?

6) זריקה אופקית יחסותית

מסלולו של חלקיק במערכת S נתון ע"י: $x = vt$, $y = \frac{1}{2}at^2$ כאשר v , a קבועים ידועים.
מצא את תאוצת החלקיק במערכת 'S הנעה במהירות v בכיוון ציר ה-x ביחס ל-S .
תאר את צורת המסלול בשתי המערכות (v אינה זניחה ביחס למהירות האור).

תשובות סופיות:

1) א. $v_{c.m}=\frac{E_0\cdot c}{mc^2+E_0}$

ב. פוטון לפני ההתנגשות: $E'_{pH}=E_0\sqrt{\frac{mc^2}{2E_0+mc^2}}$, $P'_{pH}=\frac{E_0}{c}\sqrt{\frac{mc^2}{2E_0+mc^2}}$

חלקיק לפני ההתנגשות: $E'_m=mc^2\left(\frac{mc^2+E_0}{\sqrt{m^2c^4+2E_0mc^2}}\right)$, $P'_{m_x}=\frac{-mE_0c}{\sqrt{m^2c^4+2E_0mc^2}}$

פוטון אחרי ההתנגשות: אותו דבר כמו לפני ההתנגשות.

חלקיק אחרי ההתנגשות: אותו דבר כמו לפני ההתנגשות.

כיוון התנע: $\vec{P}_{pH}=\left(P\left(-\cos\theta\right),P\sin\left(\theta\right),0\right)$, $\vec{P}_m=-\vec{P}_{pH}=\left(P\cos\theta,P\sin\theta,0\right)$

ג. $E'_m=mc^2\left(\frac{mc^2+E_0}{\sqrt{m^2c^4+2E_0mc^2}}\right)$, $\left|P_m\right|=\sqrt{\left(\frac{E_m}{c}\right)^2-m^2c^2}$

ד. $\theta=\frac{\pi}{2}$

2) $m_{max}\approx 1.45M$

3) $M\approx\sqrt{112}m$

4) $\vec{v}'=\left(-0.8c,-0.54c,0\right)$

5) $v\approx 0.66c$

6) $x'=0$, $y'=\frac{1}{2}a\gamma_0^{\,2}t'^2$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 19 - הידרו-סטטיקה והידרו-דינמיקה

תוכן העניינים

1. הידרוסטטיקה והידרודינמיקה ..... (ללא ספר)

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 20 - תרגילים ברמת מבחן

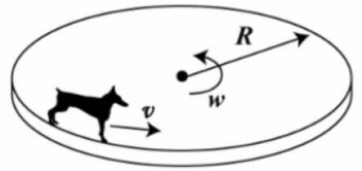
תוכן העניינים

1. שאלות הבנה קצרות 270
2. תרגילים ברמת מבחן 273

שאלות הבנה קצרות:

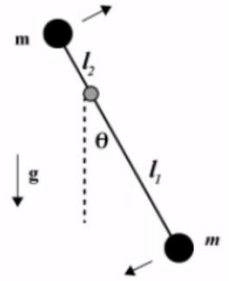
שאלות:

1) עזית הכלבה הצנחנית



עזית הכלבה הצנחנית רצה במהירות v.
כעת עזית מונחת על דיסקה במהירות ω
בעלת רדיוס R.
מהו מקדם החיכוך המינימלי שצריך להיות בין עזית
לדיסקה על מנת למנוע את החלקתה של עזית?

2) זמן מחזור למטוטלת של שתי מסות



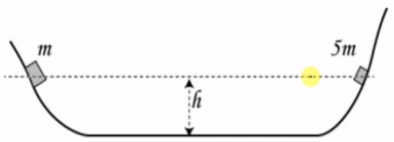
מטוטלת בנויה משתי מסות וציר כמתואר בשרטוט.
מצא את זמן המחזור של המטוטלת.

נתון: $2\pi = \omega T \quad , \quad \omega^2 = mg\frac{c}{I}$

3) שחיין ממהר להגיע לקצה

שחיין מנסה לשחות בין שתי גדות הנהר.
השחיין שוחה במהירות V (ביחס למים כמובן)
והנהר זורם במהירות Z.
לאיזה כיוון השחיין צריך לשחות, על מנת לשמור על כוחותיו
ולהגיע במהירות מירבית לגדת הנהר?

4) שני בולים מתגלשים ומתנגשים

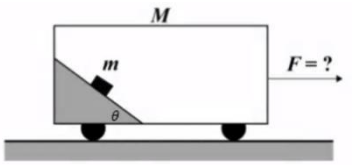


שני הבולים שבשרטוט נעזבים בו זמנית
ומתנגשים התנגשות אלסטית.

א. חשב מה יהיה שיא הגובה של הבולים אם
נתון כי מסת הבול הימני גדולה פי 5 ממסת הבול השמאלי.

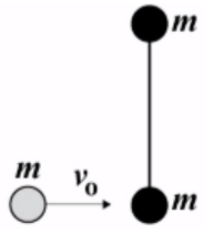
ב. חזור על החישוב במקרה של התנגשות פלסטית.

5) מסה נייחת בכוח מדומה



קרון בעל מסה M נמשך במהירות F.
בתוך הקרון קיים מדרון חלק חסר מסה ועליו
מונחת מסה m.
מצא את הכוח F, אם נתון כי המסה m נייחת ביחס למדרון.

6) תנע זוויתי אלסטי ופלסטי



שלושה כדורים מונחים על גבי שולחן חלק כמתואר בשרטוט.
שני גופים מחוברים ביניהם במוט חסר מסה באורך d,
והמסה השלישית נעה במהירות נתונה אל עבר שני הגופים,
ומתנגשת התנגשות אלסטית.
מה תהיה מהירות הכדור הפוגע לאחר ההתנגשות?
כיצד הייתה משתנה תשובתך אם היה מדובר בהתנגשות פלסטית?

7) נחש יוצא מכד

בתוך כד, נח לו נחש בעל מסה M ואורך L.
ברגע $t_0 = 0$, הנחש מעוניין לצאת מהכד, ומתחיל לעלות במהירות קבועה v.
מהו הכוח הנורמלי שיופעל על הנחש ברגע t_0?

8) פרה ודיסקה במהירות קבועה

על משטח המסתובב במהירות קבועה ω, עומדת פרה בעלת מסה M.
הפרה מעוניינת להגיע לדשא הנמצא בציר הסיבוב של המשטח.
ידוע כי הפרה נמצאת במרחק R מציר הסיבוב.

א. מהי העבודה שמבצע המשטח על הפרה בדרכה לציר הסיבוב?

ב. מהי עבודת קוריוליס על הפרה בדרכה לציר הסיבוב?

תשובות סופיות:

1) $\mu = 1$

2) $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{l_1 - l_2}{l_1^2 + l_2^2}}}$

3) השחיין צריך לשחות לכיוון הגדה השנייה.

4) ראה סרטון.

5) $\tilde{F} = (M+m)\cdot a$

6) ראה סרטון.

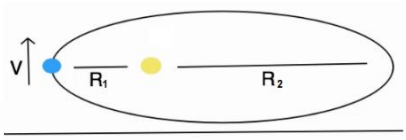
7) $N = Mg + \frac{M}{L}V^2$

8) א. $W = \frac{1}{2}m\omega^2 R^2$ ב. ראה סרטון.

תרגילים ברמת מבחן:

שאלות:

1) ארץ סובב שמש



כדור הארץ סובב סביב השמש בהקפה אליפטית.
נתונים המרחקים בשיא האליפסה (המרחק הקצר ביותר והארוך ביותר).
נתונה גם מהירות כדור הארץ בנקודה הקרובה ביותר.

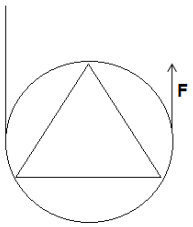
א. מצא את מהירות כדור הארץ בנקודה הרחוקה ביותר.

ב. רשום את משוואת שימור האנרגיה לשתי נקודות אלה.

ג. מצא את מסת השמש, אם נכון קבוע הגרביטציה G.

2) חישוק ומשולש בתוכו

נתון גוף הבנוי מחישוק ברדיוס R בעל מסה M, ובתוכו משולש שווה צלעות שאורך כל צלע 3R ומסתו m. עובי החלקים בגוף זניח וצפיפותם אחידה.



א. מהו מומנט ההתמד של הגוף?

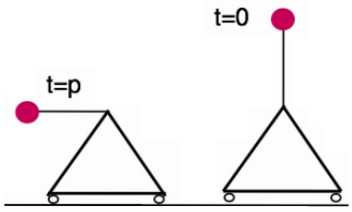
ב. מהו כוח F במצב של שיווי המשקל?

ג. בזמן $t=0$ מתחיל לפעול הכוח F, כך ש- $F=(m+M)3g$. הטבעת מתגלגלת מעלה ללא החלקה.

ד. מצאו את התאוצה הזוויתית של הטבעת.

ה. מהי האנרגיה הקינטית של הגוף כפונקציה של הזמן?

3) מסה נופלת על משולש



נתון משולש שווה צלעות בעל מסה M (צפיפותו אחידה) ועליו מוט חסר מסה ובסופו מסה m.
גודל כל האורכים בשרטוט הוא L.
המשולש מחובר בבסיסו לשני גלגלים קטנים כך שהוא חופשי לנוע לצדדים.
המסה מתחילה ליפול ממנוחה כך שברגע p היא נמצאת מאוזנת לקרקע.
שלושת הסעיפים מתייחסים לרגע זה.

א. מצא את מרכז המסה של העגלה.

ב. מצא את מהירות המסה m.

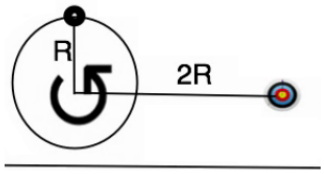
ג. מצא את הנורמלים שמפעילים שני הגלגלים על העגלה.

4) מתנועה מעגלית לפגיעה במטרה (מבט מלמעלה)

חוט מסובב מסה ממנוחה עם תאוצה זוויתית.
המתיחות המקסימלית בחוט היא p ומעבר למתיחות זו החוט נקרע.

א. מה צריכה להיות התאוצה על מנת שהמסה תפגע במטרה?

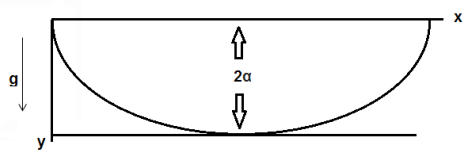
ב. מה תהיה מהירות הפגיעה?



התייחס לנתונים כפי שמופיעים בשרטוט.
השרטוט מתאר את רגע תחילת התרגיל.
על המסה להשתחרר לפני שהיא מסיימת הקפה אחת של המעגל.

5) תנועה תחת פיי

גוף נקודתי בעל מסה m נע במסלול ציקלואידי המתואר ע"י: $x=\alpha(\theta-\sin\theta)$, $y=\alpha(1-\cos\theta)$.



כאשר α קבוע ו-θ הינו משתנה של הבעיה.
הגוף מתחיל את תנועתו ממנוחה מנק' (0,0),
נע בשדה גרביטציה g כמתואר בשרטוט.
נקודת החוט לאנרגיה הפוטנציאלית תהיה בתחתית המסלול (בנקודה בה: $y=2\alpha$).

א. מהי מהירותו של הגוף בתחתית המסלול?

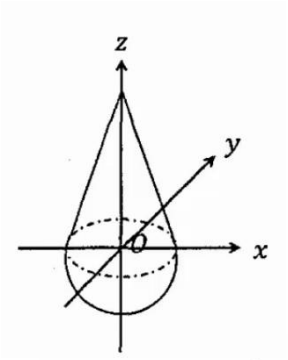
ב. כתבו את משוואת התנועה עבור הגוף θ לאורך המסלול.
יש לבטא את משוואת התנועה וקבועי השאלה $(g\ ,\ \alpha)$.

ג. פתור את משוואת התנועה של סעיף ב' על פי תנאי ההתחלה
עבור: $x(t)\ ,\ y(t)\ ,\ \theta(t)$.

ד. הראו שהגוף יבצע תנועה מחזורית עם זמן מחזור המתאים למטוטלת מתמטית בעלת אורך l.
מהו l המתאים לבעיה הנ"ל?

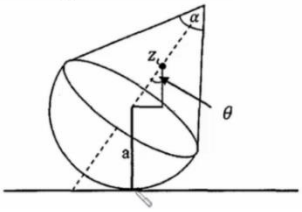
6) נחום תקום, מבחן ת"א

גוף מורכב מחרוט בעל זווית מפתח α, בסיס הרדיוס a וגובה h היושב על חצי כדור בעל רדיוס דומה כמתואר בשרטוט.
לחצי חרוט ולכדור צפיפות מסה אחידה וזהה p.



א. חשב את מרכז המסה של החרוט ביחס לראשית 0 הנמצאת על משטח החיבור בין הגופים.
(ראה ציור עם הגדרת ראשית הצירים).

ב. חשב את מרכז המסה של כל המערכת בהינתן מרכז המסה של חצי כדור: $Z_{c.m}=\frac{-3a}{8}$.



ג. מטים את הגוף הנ"ל בזווית θ ביחס לאנך.
מהי האנרגיה הפוטנציאלית כתלות בזווית זו?

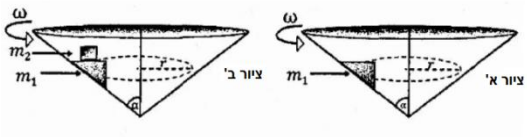
ד. מצאו תחת אילו תנאים (נתונים גיאומטריים $h\ ,a\ ,\alpha$) המערכת תהיה ב:

i. שיווי משקל אדיש $\left(E_p=\text{const}\right)$.

ii. שיווי משקל יציב המאפשר תנודות קטנות.

iii. שיווי משקל לא יציב.

7) מסות על חרוט, מבחן ת"א



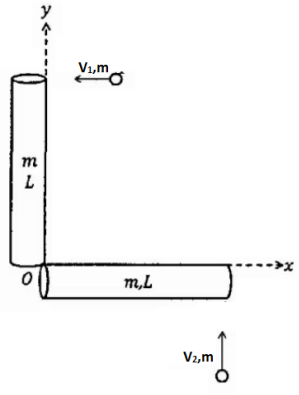
מסה m_1 נמצאת בתוך קונוס, בעל זווית מרכזית α, המסתובבת במהירות קבועה ω. המסה מחוברת במסילה לקונוס, הגורמת לה להסתובב יחד איתו במהירות קבועה. בנוסף המסה יכולה לנוע מעלה ומטה על הדופן של הקונוס ללא חיכוך.

א. מהו רדיוס הסיבוב r שבו m_1 תהיה בשיווי משקל, כלומר המסה המסתובבת לא תנוע מעלה או מטה על גבי דופן הקונוס? (כמתואר בשרטוט א').

ב. כעת מניחים על גבי מסה m_1 מסה נוספת, m_2 (כמתואר בשרטוט ב'). מקדם החיכוך הסטטי בין המסות הוא μ_s. מהירות הסיבוב של מסה m_1 אינה משתנה כתוצאה מהוספת המסה m_2 למערכת, ובנוסף המסה החדשה אינה מחליקה על גבי מסה m_1.
האם רדיוס התנועה, שבו נמצאת המערכת בשיווי משקל, ישתנה? הסבר.

ג. מהו ערכו המינימלי של מקדם החיכוך הסטטי μ_s שימנע החלקה בין המסות? הנח כי החלק העליון של m_1 הוא אופקי.

8) כדורים פוגעים במוטות, מבחן ת"א



שני מוטות דקים וארוכים במנוחה, בעלות מסה m ואורך L כל אחד מחוברים בזווית ישרה בנק' O, ראשית הצירים, כמתואר בשרטוט.
שתי המסות m נעות בניצב למוטות ומתנגשות בקצה המוטות במהירות: $\vec{v}_1=-v_0\hat{x}\ ,\ \vec{v}_2=v_0\hat{y}$.
נתון כי בזמן $t=0$ המסות נצמדות למוטות בבת אחת.

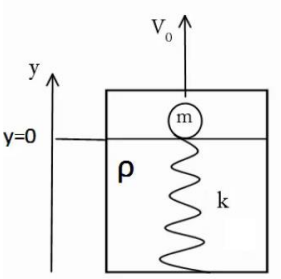
א. מצאו את וקטור המיקום של מרכז המסה $\vec{r}_{c.m}(t)$ עבור $t=0$.

ב. מצאו את וקטור המיקום של מרכז המסה $\vec{r}_{c.m}(t)$ עבור $t>0$, ביחס למיקום מרכז המסה בזמן $t=0$ (ברגע הצמדות המסות למוטות):
$\vec{r}_{c.m}(t>0)-\vec{r}_{c.m}(t=0)=?$

ג. מהי המהירות הזוויתית $\omega(t)$ של המערכת בתנועה הסיבובית ביחס למרכז המסה שחושב בסעיף ב' $\vec{r}_{c.m}(t)$?

ד. מצאו את וקטור המיקום $\vec{r}(t)$ של הנקודה O, ביחס למיקומה בזמן $t=0$.

9) מצוף בתנועה הרמונית, מבחן ת"א



נתונים מסה כדורית קטנה m שרדיוסה R וקפיץ אנכי, אידיאלי וחסר מסה, בעל קבוע קפיץ k.
הקפיץ ממוקם בתוך נוזל צמיגי שצפיפותו ρ וצמיגותו η.
המצב הרפוי של הקפיץ הוא כאשר הוא בגובה פני הנוזל, כמתואר בשרטוט.
זכרו כי ערכי כוח העילוי וכח סטוקס הם: ρVg
(כאשר V הוא נפח הכדור) ו- $-6\pi\eta R\dot{y}$, בהתאמה.

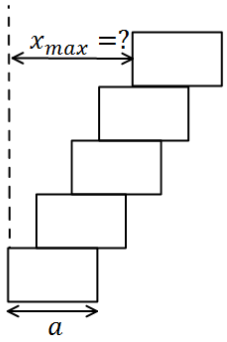
א. כאשר המסה ממוקמת על שפת הנוזל, כמתואר בשרטוט, מעניקים לה מהירות התחלתית v_0 כלפי מעלה, מה יהיה הגובה המקסימלי אליו תגיע המסה?

ב. מהי משוואת התנועה של המסה, כאשר היא נעה בתוך הנוזל?
הניחו כי מרגע נגיעת המסה בפני הנוזל כשהכדור נכנס במלואו לנוזל (יש להתעלם משלבי כניסת המסה לנוזל).
כמו כן יש להניח כי פני הנוזל לא השתנו בשל כניסת הכדור לנוזל.
רמז: לפישוט המשוואה, יש לבצע החלפת משתנים.

ג. בהנחת ריסון חלש, מהו הפתרון הכללי של משוואת התנועה בתוך הנוזל?
מהם תנאי ההתחלה של התנועה?
את התשובות הסופיות יש להציג במונחי המשתנה בו השתמשתם לפני החלפת המשתנים.
רמז: בפתרון המד"ר יש להעזר בדף הנוסחאות הנתון.

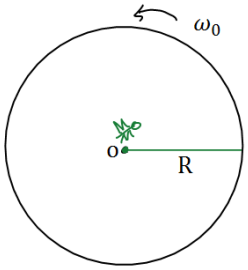
ד. כעבור כמה זמן, מרגע כניסת המסה למים, תחזור המסה לפני המים (המצב המתואר בתחילת סעיף ב')?

10) מגדל קוביות



דני מנסה לבנות מגדל מ-5 קוביות זהות בעלות פאה באורך a.
מהו המרחק המקסימאלי הניתן להניח את הקובייה העליונה ביותר כך שהמגדל לא ייפול?
(מדוד את המרחק בין הצלע השמאלית של הקובייה הראשונה לצלע השמאלית של הקובייה העליונה).
רמז: התחל את החישוב מהקובייה העליונה.

11) זבוב על דיסקה



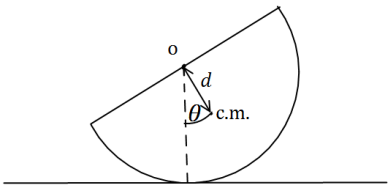
דיסקה עגולה שטוחה שמסתה M ורדיוסה R מסתובבת במהירות זוויתית התחלתית ω_0 סביב מרכזה הנמצא במנוחה על גבי שולחן חסר חיכוך (הדיסקה אינה מחוברת לשולחן!). מתחת למרכז הדיסקה, על השולחן מצוירת נקודה ירוקה (להלן הנקודה O). במרכז הדיסקה ישן זבוב נקודתי ירוק שמסתו m. על הדיסקה קו רדיאלי ירוק.

א. ברגע $t=0$ מתעורר הזבוב והוא מתחיל ללכת על גבי הקו הרדיאלי.
מצאו את מיקום הנקודה O (שעל השולחן) ביחס לזבוב כפונקציה של המרחק h בין הזבוב למרכז הדיסקה.
הניחו כי הזבוב נמצא בראשית, ציר x שלו מכוון בכיוון מרכז הדיסקה וציר y מאונך לו במישור הדיסקה.

ב. מצאו את המהירות הזוויתית של הדיסקה כאשר הזבוב מגיע לשפתה.
בדקו את תשובתכם לסעיף ב' עבור $m << M$ ו- $m >> M$.

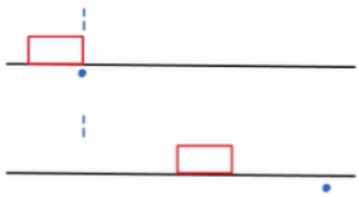
ג. אם הזבוב נע במהירות קבועה V_0 ביחס לדיסקה, מהו כוח החיכוך בין הזבוב לדיסקה רגע לפני שהזבוב הגיע לשפת הדיסקה?

12) חצי כדור בתנועה הרמונית



חצי כדור ברדיוס R ומסה M מונח על משטח.
מסיטים את החצי כדור בזווית קטנה ממצב שיווי המשקל ומשחררים ממנוחה.
מצא את תדירות התנודות הקטנות אם הכדור מתגלגל ללא החלקה (מרכז המסה של חצי כדור נמצא במרחק: $d=\frac{3}{8}R$ ממרכז הכדור המלא).

13) אנרגיה אבודה בהחלקה



על מסוע בעל מקדם חיכוך קינטי נתון מונחת מסה m.
כוח חיצוני מושך את המסוע במהירות קבועה u.
נתון כי המסה הונחה בזמן $t=0$ במנוחה.

א. מהו הכוח המופעל על המסוע?

ב. מהי תאוצת המסה?

ג. כמה זמן תמשך ההחלקה?

ד. מהו המרחק אותו עבר המסוע בזמן זה?

ה. מהו המרחק אותו עברה המסה בזמן זה?

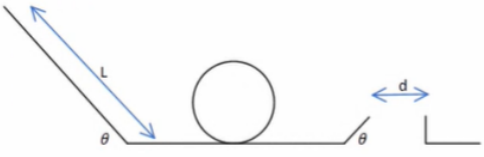
ו. כמה עבודה השקיע הכוח החיצוני?

ז. כמה עבודה השקיע כוח החיכוך?

ח. כמה אנרגיה עבדה לחום?

14) גולש על סקייטבורד

גולש על סקייטבורד נכנס למסלול כמתואר בשרטוט.
רדיוס המעגל R, גובהה האנכי של המקפצה גם כן R ואורך הקפיצה הוא d.



א. מהו הגובה המינימלי של L על מנת שהפעלולן ישלים סיבוב במעגל?

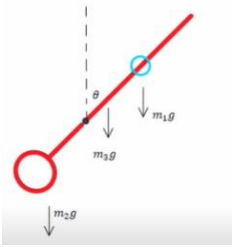
ב. מהו הגובה המינימלי של L על מנת שהגולש יחצה בשלום את המקפצה?
כעת נתון כי הגולש יכול לקפוץ מהסקייטבורד בעודו באוויר במהירות אופקית של p יחסית לסקייטבורד, בהנחה שהוא מתחיל מהגובה שמצאנו בסעיף א'.

ג. כמה זמן לאחר הקפיצה הגולש צריך להתחיל את הקפיצה על מנת להגיע בדיוק לקצה התעלה?

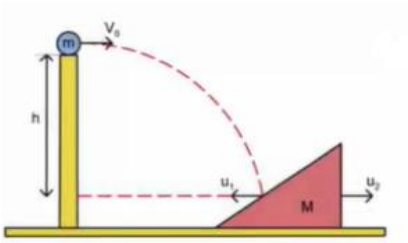
ד. מהו המרחק המקסימלי אותו הגולש יחצה בשלום?

15) מטרונום

מצא את תדירות המטרונום שבשרטוט המשתנה על פי מיקום המסה הנעה על גביו.
נתון כי ציר המטרונום נמצא רבע אורך מעל קצהו התחתון.



16) התנגשות במשולש על רצפה



מסה m נזרקת במהירות אופקית v_0 מראש מגדל.
אחרי שעברה גובה h מנקודת הזריקה, המסה מתנגשת בגוף משולש שנמצא במנוחה ומסתו M.
נתון כי ההתנגשות בין שתי המסות לא אלסטית ובמהלך ההתנגשות אובדת שליש מהאנרגיה הקינטית.
נתון גם כי לאחר ההתנגשות המסה m נעה במהירות אופקית שמאלה u_1 והגוף M נע במהירות אופקית ימינה u_2.

א. מצא את מהירות הפגיעה של המסה m בגוף M, יש למצא גודל וכיבים בשני הצירים.

ב. מצא את גודל המהירויות של המסות לאחר ההתנגשות (u_1 , u_2).
ידוע כי זמן ההתנגשות הוא Δt.

ג. מצא את הגודל של הכוח הנורמלי הממוצע שמפעילה הקרקע במהלך ההתנגשות.

17) לווין יורה זנב בכיוון התנועה

לווין שמסתו M נע במסלול אליפטי סביב כדור הארץ כך שמרחקו המינימלי ממרכז כדור הארץ הוא R_A ומרחקו המקסימלי הוא R_B.

הלווין נע בכיוון השעון (ניתן לראות בשרטוט המצורף).
כאשר הלווין נמצא בנקודה A הלווין מתפרק לשניים ויורה את זנבו בכיוון משיק למסלולו.
מסת הזנב הנורה היא m.
לאחר הירי החלק שנותר מהלווין נכנס למסלול מעגלי סביב כדור הארץ.

$$U_g = -G\frac{m_1 m_2}{r}$$

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

M_E - מסת כדור הארץ.

R_E - רדיוס כדור הארץ.

א. הביעו את מהירות הלווין בנקודה A לפני הירי.

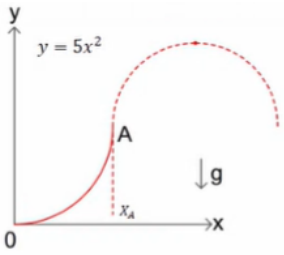
ב. הביעו את מהירות שארית הלווין (החלק ללא הזנב) לאחר הירי.

ג. האם הלווין יורה את זנבו ימינה או שמאלה, לאורך המשיק למסלול בנקודהA? נמקו!

ד. הביעו את מהירות זנב החללית מיד לאחר הירי.

18) עבודה לאורך דרך במסילה

חרוז בעל מסה m מושחל על מסילה חלקה.
המסילה נמצאת במישור XY.
כוח הכובד פועל בכיוון השלילי.
צורת המסילה מתוארת בסרטוט.



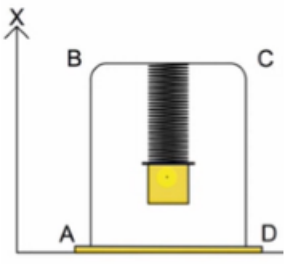
א. מהי המהירות ההתחלתית המינימלית שיש להעניק לחרוז בראשית הצירים כדי שיוכל להגיע לנקודה A?

ב. נותנים לחרוז מהירות התחלתית v_0.
מהו שיא הגובה שאליו יגיע החרוז אם נתון כי החרוז עבר את הנקודה A?

ג. כעת, במקום כוח הכובד מופעל על החרוז כוח: $F = \left(x\ ,\ e^{x^2}\right)$
והחרוז משוחרר ממנוחה בראשית הצירים.
מה תהיה מהירות החרוז בקצה המסילה?

19) מסה וקפיץ בתוך מסגרת

בציור הבא מתואר מתקן ניסוי-מסגרת ABCD ומטוטלת קפיץ שמחוברת למסגרת. קבוע הקפיץ K ומסת המשקולת m נתונים, מסת הקפיץ קטנה מאוד וזניחה.
כל אלו גורמים למשקולת להתנדנד. ידוע כי כשהמשקולת מגיעה לנקודה העליונה אורך הקפיץ ברגע זה הוא המצב הרפוי.

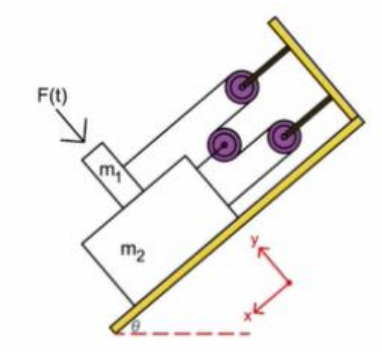


א. מצא את האמפליטודה בתנועה של המשקולת?
בטא את תשובתך בפרמטרים $(K\ ,\ m)$.

ב. תנועת המשקולת מתוארת לפי הפונקציה הבאה: $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.
הכיוון של ציר ה-x מוגדר בשרטוט. הפרמטר A מסמן את האמפליטודה.
רגע תחילת המדידה הוא ב-$t = 0$. ידוע שבתחילת המדידה המשקולת נמצאת בנקודה $x = 0.9A$ ונעה כלפי מטה.
מצא את הפאזה φ_0 כביטוי של הפונקציה $x(t)$? בטא את תשובתך בראדיאנים.

ג. המישור התחתון מפעיל כוח נורמלי על מסגרת ABCD בגלל תנודות המשקולת.
כוח זה הוא לא קבוע אלא משתנה עם הזמן. נתונה מסה m_2 של המסגרת.
מצא את הגודל המינימלי והמקסימלי של הכוח הנורמלי $(N_{min}\ ,\ N_{max})$.
בטא את תשובתך בפרמטרים $(K\ ,\ m\ ,\ m_2)$.

20) שתי מסות גלגלת נעה וכוח חיצוני



שני גופים שמסתם $m_1\ ,\ m_2$ מונחים זה על זה על פני מדרון משופע בזווית θ.
ניתן לראות כמתואר באיור שהגופים תלויים ומחוברים ביניהם בעזרת מערכת גלגלות חסרות מסה.
בין שני הגופים קיים חיכוך בעוד שבין m_2 למדרון אין חיכוך.
נתון כי מקדם החיכוך הקינטי בין שני הגופים הוא μ_k.
ברגע $t = 0$ המערכת משוחררת ממנוחה ומתחילה לנוע כך שהגוף הגדול m_2 יורד במדרון (בכיוון ציר x החיובי).
ברגע זה מתחיל גם לפעול על m_1, כלפי המדרון ובמאונך לו, כוח התלוי בזמן:

$F(t) = \frac{mg}{2}\left(1+\sin(\omega t)\right)$ כאשר ω הוא קבוע חיובי.

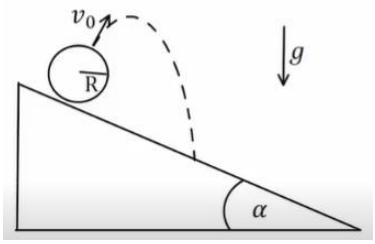
יש להניח ש-m_2 מספיק ארוך כדי ש-m_1 לא יפול ממנו.

א. יש נמק ולהוכיח כי במערכת הנתונה מתקיים הקשר: $a_1 = -3a_2$.

ב. מצאו את תאוצות הגופים: $a_2(t)$, $a_1(t)$ כפונקציה של הזמן.
אין צורך לפתור את המשוואות.

ג. מצאו את השינוי Δx, שחל במרחק שבין הגופים לאורך המדרון, מרגע תחילת התנועה ועד לרגע t כלשהוא.
אין צורך לפתור את המשוואות.

21) כדור נזרק בשיפוע



כדור ברדיוס $R = 20_{c.m}$ העשוי מחומר אחיד ואלסטי נזרק במהירות $v_0 = 20\frac{m}{s}$ בניצב למישור חלק (ללא חיכוך), המשופע בזווית $\alpha = 30^\circ$ לאופק.

א. מצא היכן ייפול הכדור על המישור המשופע.

ב. מצא את וקטור המהירות של הכדור מיד לאחר הפגיעה במישור.

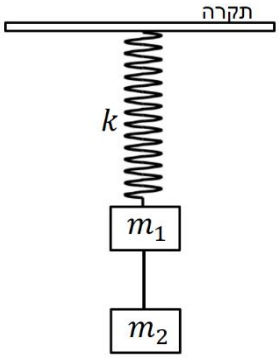
כעת נתון שבין המשטח לכדור יש חיכוך ומקדם החיכוך הוא $\mu_k = 0.2$, נתון כי ההתנגשות בניצב למישור היא עדין אלסטית.

ג. חזור על סעיף ב'.

ד. מהי המהירות הסיבובית של הכדור אחרי הפגיעה?

ה. מהי מהירות נקודת המגע של הכדור עם המישור מיד לאחר הפגיעה?

22) מסה קשורה למסה ולקפיץ אנכי



גוף שמסתו $m_2 = 4kg$ נקשר לגוף נוסף שמסתו $m_1 = 2kg$ בחוט.

הגוף שמסתו m_1 קשור לקפיץ אנכי בעל קבוע קפיץ $k = 100\frac{N}{m}$.

המערכת נמצאת בשיווי משקל ובמנוחה.

ב-$t = 0$ נקרע החוט הקושר בין המסות.

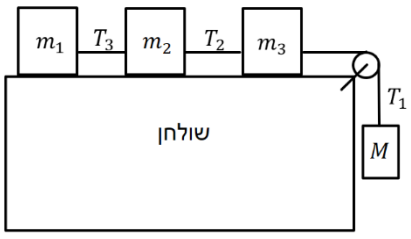
א. מהי משרעת התנודות?

ב. מהו זמן המחזור של התנודות?

ג. מהו הביטוי למיקום כתלות בזמן?

ד. מהי האנרגיה האלסטית האגורה במערכת בנקודת שיא הגובה?

23) מסה תלויה גלגלת ושלוש מסות על שולחן



שלוש מסות: $2m_1 = m_2 = m_3 = 15kg$ נמצאות על שולחן אופקי ומחוברות בחוט דק למסה $M = 20kg$.

החוט עובר דרך גלגלת אחידה בעלת רדיוס $R = 15c.m$ ומומנט התמד $I = 0.7kg \cdot m^2$ כמתואר באיור.

החוט אינו מחליק על הגלגלת ואין חיכוך בין המסות m_1 , m_3 לשולחן.

בין המסה m_2 לשולחן ישנו חיכוך ומקדם החיכוך הוא: $\mu_s = \mu_k = 0.23$.

א. מצא את תאוצת המסה M ברגע שמשחררים את המערכת ממנוחה.

ב. מהו יחס המתיחויות $\frac{T_1}{T_3}$ ברגע שמשחררים את המערכת ממנוחה?

ג. כמה זמן ייקח לגלגלת להשלים סיבוב אחד מרגע שחרור המערכת?

תשובות סופיות:

1 א. $v_2 = v\frac{R_1}{R_2}$ ב. $\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{m\cdot\tilde{M}}{R_1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - G\frac{m\cdot\tilde{M}}{R_2}$

ג. $M = \frac{v^2\cdot R_1}{2G\cdot R_2}\cdot(R_1+R_2)$

2 א. $I_{total} = R^2\left(M+\frac{1}{2}m\right)$ ב. $F = \frac{(m+M)g}{2}$ ג. $a = \alpha R$

ד. $E_{k_{(t)}} = \frac{1}{2}ma^2t^2 + \frac{1}{2}I\alpha^2t^2$

3 א. $x_M = \frac{ml}{M+m}$ ב. $-v_g = \sqrt{2gl}$

ג. $N_1 = M\cdot g - \left(\frac{\sqrt{3}Mg-4mg}{2\sqrt{3}}\right)$, $N_2 = \frac{\sqrt{3}Mg-4mg}{2\sqrt{3}}$

4 א. $\frac{6P}{7\pi Rm}$ ב. $v_\theta = \sqrt{\frac{PR}{m}}$

5 א. $v_F = 2\sqrt{ga}$ ב. $\dot{\phi}^2 = \frac{g}{a}$ ג. $\phi = \sqrt{\frac{g}{a}}t + c$ ד. $l = 4a$

6 א. $Z_{c.m} = \frac{h}{4}$ ב. $Z_{c.m} = \frac{h^2-3a^2}{4h+8a}$ ג. $U(\theta) = m_T g Z_{c.m}\cos\theta$

ד. i. $h = \sqrt{3}a$ ii. $h < \sqrt{3}a$ iii. $h > \sqrt{3}$

7 א. $R = \frac{g}{\tan\alpha\cdot\omega^2}$ ב. r לא משתנה. ג. $\mu_s \geq \frac{1}{\tan\alpha}$

8 א. $\vec{r}_{c.m} = \frac{3}{8}L(1,1)$ ב. $\vec{r}_{c.m} = \frac{v_0 t}{4}(\hat{y}-\hat{x})$ ג. $\omega = \frac{30}{37}\frac{v_0}{l}$

ד. $\vec{r}_O = \frac{v_0 t}{4}(\hat{y}-\hat{x}) + \frac{3l}{8}\sqrt{2}\left(\cos\left(\frac{30}{37}\frac{v_0}{l}t+\frac{5\pi}{4}\right)\hat{x} + \sin\left(\frac{30}{37}\frac{v_0}{l}t+\frac{5\pi}{4}\right)\hat{y}\right)$

9 א. $h = \Delta x = \frac{-mg+\sqrt{(mg)^2+kmv_0^2}}{k}$ ב. $\ddot{z} + \frac{\lambda}{M}\ddot{z} + \frac{k}{M}z = 0$

ג. $z(t) = Ae^{-\frac{\Gamma}{\alpha}t}\cos\left(\left(\sqrt{\frac{k}{M}-\frac{\left(\frac{\lambda}{M}\right)^2}{4}}\right)t+\varphi\right)$, $y(t) = Ae^{-\frac{\Gamma}{\alpha}t}\cos(\omega t+\varphi)+y_0$,

$y(0)=0$, $\dot{y}(0) = -v_0$

ד. $0=\frac{g\left(m-\rho V\right)}{k}\sqrt{1+\left(\frac{\Gamma}{2\omega}+\frac{kv_0}{\omega g\left(m-\rho V\right)}\right)^2}$

$$e^{-\frac{\Gamma}{2}t}\cos\left(\omega t-\tan^{-1}\left(\frac{\Gamma}{2\omega}+\frac{kv_0}{\omega g\left(m-\rho V\right)}\right)\right)-\frac{g\left(m-\rho V\right)}{k}$$

10 $x_{max}=\frac{25a}{24}$

11 א. $x_0=\frac{Mh}{M+m}$ ב. $\omega_p=\frac{\left(M+m\right)^2\omega_0}{3m^2+4mM+M^2}$ ג. ראה סרטון.

ד. $f_s=-\frac{mM\left(M+m\right)^3\omega_0^2R}{\left(3m^2+4mM+M^2\right)^2}\hat{r}+mMv_0\omega_0\left(\frac{\left(M+m\right)2}{3m^2+4mM+M^2}-\frac{4m}{\left(M+3m\right)^2}\right)\hat{\theta}$

12 $\omega_0=\sqrt{\frac{15g}{26R}}$

13 א. $F_{ext}=\mu mg$ ב. $a'=\mu g$ ג. $T=\frac{u}{\mu g}$ ד. $x=u\cdot\frac{u}{\mu g}$

ה. $x'=\frac{1}{2}\mu g\cdot\left(\frac{u}{\mu g}\right)^2$ ו. $W=mu^2$ ז. $W'=\frac{1}{2}mu^2$ ח. $\Delta E=mu^2-\frac{1}{2}u^2$

14 ראה סרטון.

15 $\frac{-\left(-m_1g\left(x-\frac{L}{4}\right)+m_2g\frac{L}{4}-m_3g\frac{L}{4}\right)\theta}{I}=\ddot{\theta}$

16 ראה סרטון.

17 ראה סרטון.

18 א. $\frac{1}{2}mv_i^2=mgh$ ב. $mgh+\frac{1}{2}mv_y^2=mgH$

ג. $\frac{1}{2}x_A^2+5\left(e^{\frac{1}{5}\left(5x_1^2\right)}-e\right)=\frac{1}{2}mv_s^2$

19 א. $\Delta=\frac{mg}{K}=A$ ב. $\varphi_0=\pi-1.12\approx2$

ג. $N_{min}=m_2g$, $N_{max}=m_2g+2m_1g$

20 א. שאלת הוכחה. ב. ראה סרטון. ג. $\Delta=\frac{4}{3}x_{1(t)}$

21 א. $x\left(t\right)\approx53.3\frac{m}{sec}$ ב. $\vec{v}=23.1\frac{m}{sec}\hat{x}+20\frac{m}{sec}\hat{y}$

ג. $u_x=17.1\frac{m}{sec}$ ד. $\omega_F=-75\frac{rad}{sec}$ ה. $v_{Ax}=2.1\frac{m}{sec}$, $v_{Ay}=20\frac{m}{sec}$

22) א. $A=0.4m$ ב. $T\approx 0.89sec$ ג. $y(t)=0.4\cos\left(\sqrt{50}t+0\right)+0.2$

ד. $Uel=2J$

23) א. $a\approx 1.87\frac{m}{sec^2}$ ב. $\frac{T_1}{T_3}\approx 11.63$ ג. $t\approx 1sec$

פיזיקה 1 מכניקה

פרק 21 - חום והחוק הראשון של התרמודינמיקה

תוכן העניינים

1. חום טמפרטורה ואנרגיה פנימית 285
2. קיבול חום ושיטת הקלורימטריה 286
3. חום כמוס 289
4. החוק הראשון וניתוח תהליכים פשוטים 292
5. קיבול חום של גזים ועקרון החלוקה השווה 298
6. הקשר בין לחץ ונפח בהתפשטות אדיאבטית 299
7. הולכה הסעה וקרינה 302
8. סיכום 305

חום טמפרטורה ואנרגיה פנימית:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$E_{int}=\frac{3}{2}nRT$	אנרגיה פנימית של גז אידיאלי מונואטומי n - מספר המולים $R=8.314\frac{J}{mol\cdot k}$ T - טמפרטורה בקלווין	האנרגיה הפנימית של הגז תלויה רק בטמפרטורה
$E_{int}=\frac{5}{2}nRT$	עבור גז אידיאלי דו-אטומי	תלויה רק בטמפרטורה

שאלות:

1) דוגמה - שורפים קלוריות

לאיזה גובה צריך לטפס אדם שמסתו 60 ק"ג בשביל לשרוף 100Cal $(100kilocal)$?

תשובות סופיות:

1) 700m

קיבול חום ושיטת הקלורימטריה:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$Q = mc\Delta T$	c - קיבול חום סגולי ליחידת מסה	

קיבול חום סגולי בטמפרטורה 20° ובלחץ 1 atm		
חומר	$c\ [J/kg \cdot °C]$	$c\ [cal/g \cdot °C]$
אלומיניום	900	0.22
אלכוהול (אתילי)	2400	0.58
נחושת	390	0.093
זכוכית	840	0.20
ברזל / פלדה	450	0.11
עופרת	130	0.031
שיש	860	0.21
כספית	140	0.033
כסף	230	0.056
עץ	1700	0.40
קרח (-5°C)	2100	0.50
מים נוזליים (15°C)	4186	1.00
קיטור (110°C)	2010	0.48
גוף האדם (ממוצע)	3470	0.83
חלבון	1700	0.40

שאלות:

1) דוגמה - מחממים ספל מים

ספל מים שוקל 200 גרם ועשוי מזכוכית.

כמה חום דרוש בשביל לחמם את הספל מטמפרטורת החדר (20^0C) ל- 80^0C אם:

א. הספל ריק ממים.

ב. הספל מכיל 200 גרם מים (הנמצאים גם בטמפרטורת החדר בהתחלה).

2) דוגמה - הקפה מתקרר

מוזגים 200 סמ"ק קפה בטמפרטורה של 90^0C לכוס זכוכית בעלת מסה של 150 גרם הנמצאת בטמפרטורה של 20^0C.

מה תהיה טמפרטורת הקפה בכוס במצב שיווי משקל?

הנח כי המערכת מבודדת בקירוב.

3) דוגמה - מציאת קיבול חום באמצעות קלורימטר

נרצה למצא את קיבול החום של תרכובת מתכות חדשה.

מחממים 100 גרם מהתרכובת ל-$500°C$ ומעבירים אותה במהירות לתוך קלורימטר.

הקלורימטר מורכב ממיכל אלומיניום בעל מסה של $0.200kg$ המכיל $0.500kg$ מים בטמפרטורה של $22.4°C$. הטמפרטורה הסופית הנמדדת על ידי המדחום היא $40.8°C$.

מהו קיבול החום הסגולי של התרכובת?

ניתן להזניח את החום שהולך למדחום והחום שיוצא מהבידוד.

4) תרגיל וניסוי - קומקום מחמם מים

קומקום חשמלי פועל בהספק של 1850 וואט.

כמה זמן ייקח לקומקום לחמם חצי ליטר של מים מטמפרטורה של $22.2°C$ ל-$100°C$?

5) תרגיל וניסוי - קומקום מחמם מים - הפעם עם הקומקום

המשך של התרגיל הראשון, גם הפעם נחמם חצי ליטר מים באותו הקומקום (1850W) אבל הפעם לא נחמם את הקומקום לפני הניסוי ונחשב שוב, כמה זמן ייקח לחמם את המים?

טמפרטורת החדר היא $21.9°C$ מסת הקומקום היא 754 גרם וננית כי הוא עשוי נירוסטה וקיבול החום של נירוסטה הוא: $500\frac{J}{kg\cdot K}$.

תשובות סופיות:

1) א. $10^4\,\mathrm{J}$ ב. $6\cdot10^4\,\mathrm{J}$
2) $81^\circ\mathrm{C}$
3) $911\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{C}}$
4) $90\,\mathrm{sec}$
5) $100\,\mathrm{sec}$

חום כמוס:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$Q = m \cdot L$	L - החום הכמוס	L_F - חום כמוס להתכה (מעבר ממוצק לנוזל או להיפך) L_V - חום כמוס לרתיחה (מעבר מנוזל לגז או להיפך)

חומר	נק' היתוך (°C)	היתוך L_f (kJ/kg)	נק' רתיחה (°C)	איידוי L_v (kJ/kg)
חמצן	-218.8	14	-183	**210**
חנקן	-210.0	26	-195.8	**200**
אתנול	-114	104	78	**850**
אמוניה	-117	33	-33.4	**137**
מים	0	333	100	**2260**
עופרת	327	25	1750	**870**
כסף	961	88	2193	**2300**
ברזל	1808	289	3023	**6340**
טונגסטן	3410	184	5900	**4800**

שאלות:

1) דוגמה - קרח במים

מכניסים קוביית קרח בטמפרטורה של $-15°C$ ומסה של 300 גרם לתוך מיכל מים המכיל $1.5kg$ מים בטמפרטורה של $20°C$.
מה תהיה הטמפרטורה הסופית של התערובת?

2) דוגמה - מציאת חום כמוס של כספית

לוקחים $1kg$ כספית הנמצאת במצב מוצק ובטמפרטורת ההתכה שלה, $-39°C$.
מניחים את הכספית בתוך קלורימטר המורכב ממיכל אלומיניום במסה של $0.40kg$ ומכיל $0.47kg$ מים בטמפרטורה של $20°C$.
הכספית מותכת והטמפרטורה הסופית של התערובת היא $12°C$.
מהו החום הכמוס הסגולי הדרוש להתכת כספית?
קיבול החום הסגולי של כספית במצב הנוזלי הוא: $c = 140\frac{J}{kg\cdot C°}$.

3) תרגיל וניסוי - מתי יגמרו המים בסיר

מחממים $400ml$ מים על הגז בסיר נירוסטה שמשקלו 177 גרם.
מודדים את טמפרטורת המים פעם אחת ורואים שהיא $60.0°C$.
16.68 שניות לאחר מכן הטמפרטורה היא $63.3°C$.
א. מהו קצב מעבר החום למים?
מחממים את המים עד לנקודת הרתיחה $100°C$.
ב. כמה זמן ייקח לכל המים בסיר להפוך לאדים?

4) רוכב אופניים

רוכב אופניים שותה 7 ליטר מים במהלך רכיבה של 3 שעות.
נניח כי בקירוב כל האנרגיה של הרוכב הולכת לאידוי המים דרך זיעה.
כמה אנרגיה בקילו-קלוריות השתמש הרוכב בנסיעה?
(מכיוון שהיעילות של הגוף היא בערך 20% ההערכה שכל האנרגיה הולכת לחום היא לא רחוקה).

5) ברזל בקלורימטר

מחממים חתיכה של 300 גרם ברזל ל-180 מעלות צלזיוס ושמים אותה בקלורימטר העשוי ממיכל אלומיניום בעל מסה של 90 גרם שמכיל 285 גרם גליצרין ב-12 מעלות צלזיוס. הטמפרטורה הסופית של התערובת היא 38 מעלות צלזיוס.
הערך מהו קיבול החום הסגולי של גליצרין.

תשובות סופיות:

1) $2°C$

2) $11\frac{kJ}{kg}$

3) א. $300\frac{J}{sec}$ ב. בערך 40 דקות.

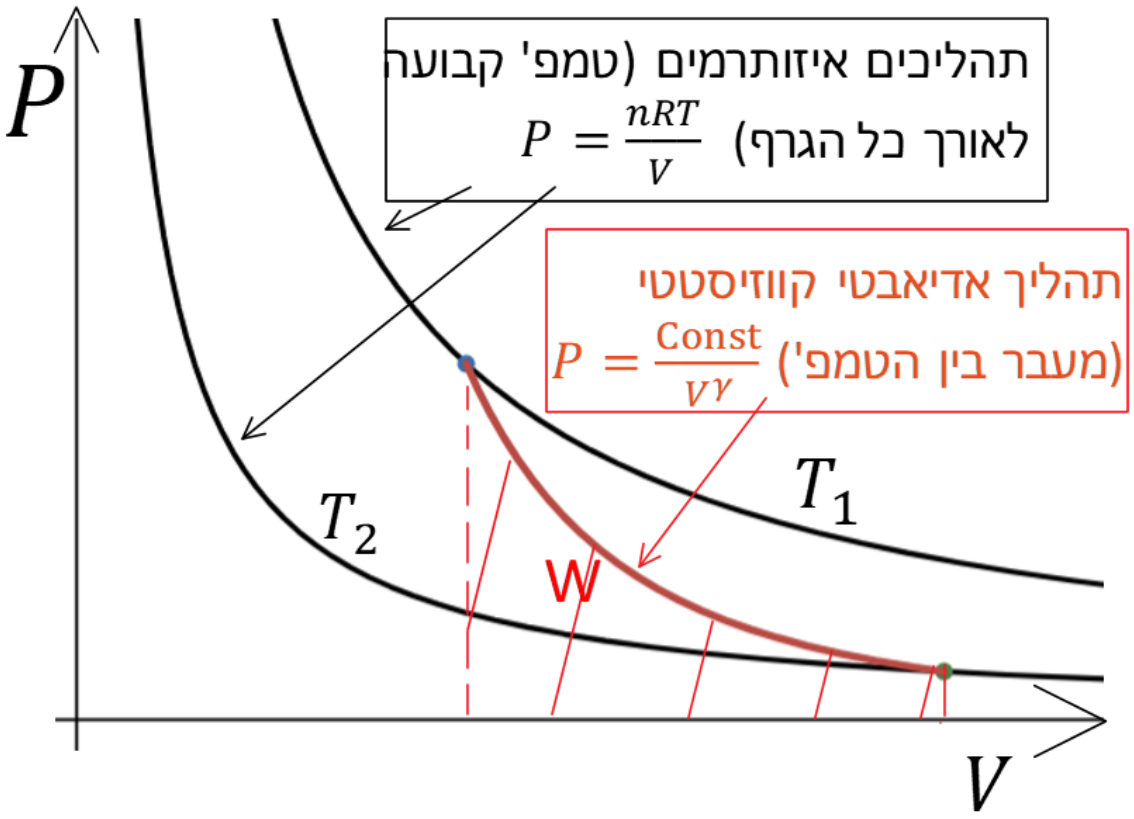
4) $4500kcal$

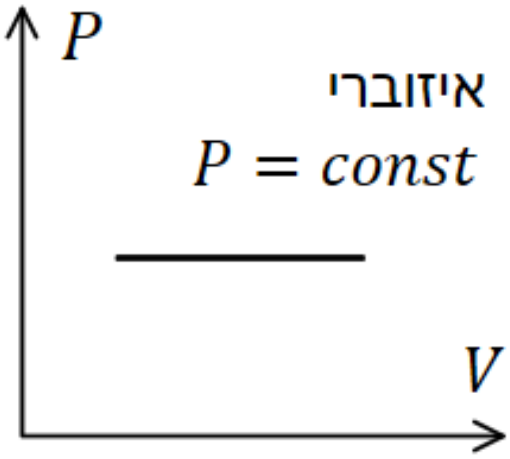
5) $2.3\cdot10^3\frac{J}{kg\cdot C°}$

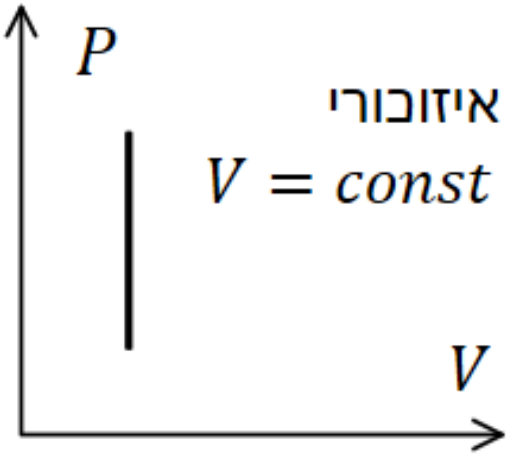
החוק הראשון וניתוח תהליכים פשוטים:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$\Delta E_{int} = Q - W$	החוק הראשון	חום היא אנרגיה שעוברת רק בגלל הפרשי טמפרטורות. עבודה היא אנרגיה שעוברת מכל סיבה אחרת. אם המערכת מבצעת עבודה אז W יהיה חיובי ואם מתבצעת עבודה על המערכת אז W יהיה שלילי. אם חום נכנס למערכת אז Q חיובי ואם חום יוצא מהמערכת אז Q שלילי.
$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_{int} = Q - W$	חוק ראשון נוסחה מורחבת	כולל אנרגיה קינטית ופוטנציאלית של כל המערכת כגוף אחד (או של מרכז המסה שלה). בדרך מתייחס למערכות מכניות כמו גופים קשיחים (אבן שנזרקת לדוגמה).
תהליך איזותרמי - טמפרטורה קבועה	$T = const$, $Q = W$, $\Delta E_{int} = 0$	מתרחש כאשר המערכת צמודה למאגר חום גדול והתהליך הוא קווזיסטטי (מאוד איטי).
תהליך אדיאבטי - $Q = 0$	$\Delta E_{int} = W$	מתרחש אם המערכת מבודדת או אם התהליך מהיר והחום לא מספיק לעבור.
תהליך איזוברי (לחץ קבוע) ואיזוכורי (נפח קבוע)		
$W = \int P\,dV$	W - עבודה שמבצעת המערכת על הסביבה P - לחץ V - נפח	חיובי כאשר הנפח גדל ושלילי כאשר הנפח קטן הנוסחה נכונה לגזים, נוזלים ולמוצקים
התפשטות חופשית - (free expansion)	תהליך שבו גז מתפשט במרחב בצורה אדיאבטית ומבלי לעשות עבודה.	אי אפשר לצייר התפשטות חופשית בדיאגרמת P-V מכיוון שמשתני המצב לא מוגדרים במהלך ההתפשטות.


תהליכים איזותרמים (טמפ' קבועה
לאורך כל הגרף) $P = \frac{nRT}{V}$
תהליך אדיאבטי קוואזיסטטי
(מעבר בין הטמפ') $P = \frac{\text{Const}}{V^{\gamma}}$
T_1
T_2
W
P
V


איזוברי
$P = const$
P
V


איזוכורי
$V = const$
P
V

שאלות:

1) דוגמה - חוק ראשון

מוסיפים למערכת 1500J של חום ועושים על המערכת עבודה של 1000J.
מה השינוי באנרגיה הפנימית של המערכת?

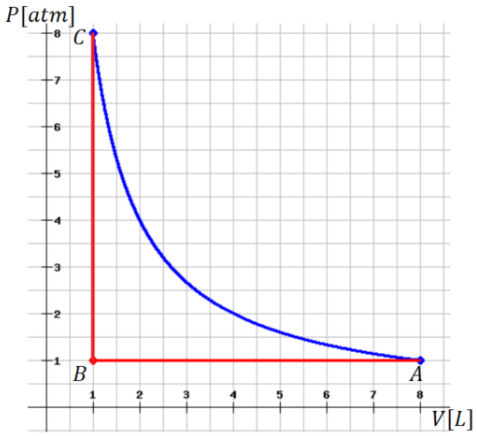
2) דוגמה - אנרגיה קינטית לחום

קליע במסה של 3.0 גרם חודר לתוך עץ במהירות של 300 מטר לשניה.
כמה חום נוסף למערכת קליע ועץ?

3) דוגמה - חישוב חום בתהליך איזוברי ואיזוכורי

גז אידיאלי מתחיל מהמצב המתואר בנקודה A בגרף.
דוחסים את הגז בתהליך איזוברי עד לנקודה B ולאחר מכן מחממים את הגז בתהליך איזוכורי עד לנקודה C.
הגרף המחבר בין A ל-C הוא גרף איזותרמי.

א. מהי העבודה הכוללת שנעשתה בכל התהליך A עד C?
ב. מהו החום שנוסף לגז בכל התהליך?



4) דוגמה - עבודה של גז במנוע

במנוע 0.4 מול של גז אידיאלי מונואטומי מתרחבים במהירות ובצורה אדיאבטית כנגד הבוכנה. בתהליך, הטמפרטורה של הגז יורדת מ- 1100K ל- 400K.
כמה עבודה ביצע הגז?

5) מכונית בולמת

מכונית במשקל 1300 ק"ג נוסעת במהירות 80 קמ"ש.
כמה חום נוצר במהלך הבלימה עד לעצירה מוחלטת?
רשמו את התשובה בגאול ובקילו קלוריות.

6) תהליך נפח קבוע ולחץ קבוע

גז אידיאלי עובר תהליך המורכב משני שלבים.

בשלב הראשון, AB בגרף, מאפשרים לחום לצאת מהגז תוך שמירה על נפח קבוע.

כתוצאה מכך הלחץ של הגז יורד מ-7.5atm ל- 3atm.

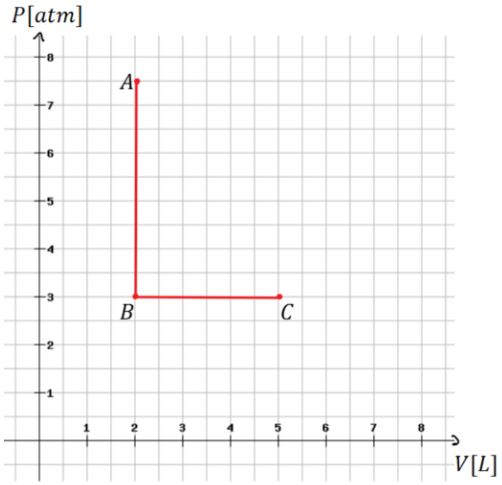
בשלב השני, BC הגז מתרחב בלחץ קבוע מנפח 2.0L לנפח 5.0L ובכך חוזר לטמפרטורה שהייתה לו בתחילת כל התהליך.

חשבו את :

א. העבודה הכוללת שנעשתה על ידי הגז בתהליך.

ב. השינוי באנרגיה הפנימית של הגז.

ג. כמות החום הכוללת שיצאה או נכנסה לגז.



7) גז מתפשט איזותרמית

1.50 מולים של גז אידאלי בנפח $2.50m^3$ ובטמפרטורה $280°K$ מתפשטים איזותרמית עד לנפח $5.00m^3$.

א. מהי העבודה שעושה הגז?

ב. מהו השינוי באנרגיה הפנימית של הגז?

ג. מהו החום שנוסף לגז?

8) גז מתפשט אדיאבטית

שניים וחצי מולים של גז אידיאלי מונואטומי מתפשטים אדיאבטית ומבצעים $1.3 \cdot 10^4$ J של עבודה בתהליך.

מהו השינוי בטמפרטורה של הגז במהלך ההתפשטות?

9) גז בתהליך ריבועי*

גז אידיאלי עובר תהליך כפי שמתואר באיור, התהליך מתחיל במצב A ועושה סיבוב שלם עם השעון עד לחזרה למצב A.

בתהליך אחר שבו הגז עבר מהנקודה D לנקודה C בלחץ קבוע ידוע כי: $W_{D\to C}=38J$.

בתהליך שלישי שהתרחש מהנקודה B לנקודה D ידוע כי: $Q_{B\to D}=-85J$ ו- $W_{B\to D}=-55J$ (סוג התהליך לא ידוע).

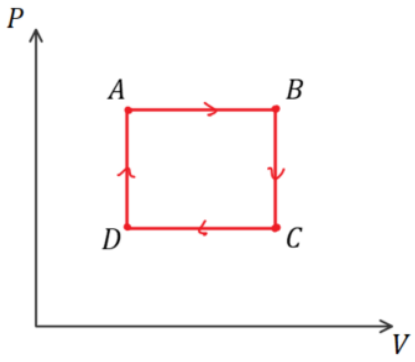
כמו כן ידוע כי: $E_B-E_A=15J$ ו- $P_A=2.2P_D$.

כל התהליכים התרכשו על אותו הגז.

א. תאר במילים כל שלב בתהליך הראשי, מהו סוג התהליך, האם נעשתה עבודה, האם האנרגיה הפנימית גדלה או קטנה, האם נכנס או יצא חום מהמערכת?

ב. מהי העבודה הכוללת שנעשתה על ידי הגז?

ג. מהי הנצילות של התהליך?
נצילות היא העבודה הכוללת שנעשתה חלקי החום שהושקע (כלומר נכנס לגז), כפול 100%.



תשובות סופיות:

1) 2500J

2) 135J

3) א. $-710J$ ב. $710J$

4) 3500J

5) $Q = 3.2 \cdot 10^5 J = 77kcal$

6) א. 910J ב. 0 ג. 910J

7) א. 2420J ב. 0 ג. 2420J

8) $-0.042°K$

9) א. $A \to B$ - תהליך בלחץ קבוע, הגז עושה עבודה על הסביבה, האנרגיה הפנימית גדלה, נכנס חום למערכת.

$B \to C$ - תהליך בנפח קבוע, לא נעשית עבודה, האנרגיה הפנימית קטנה, חום יוצא מהמערכת.

$C \to D$ - תהליך בלחץ קבוע, נעשית עבודה על הגז, האנרגיה הפנימית קטנה, חום יוצא מהמערכת.

$D \to A$ - תהליך בנפח קבוע, לא נעשית עבודה, האנרגיה הפנימית גדלה, חם נכנס למערכת. ב. 46J ג. 40%

קיבול חום של גזים ועקרון החלוקה השווה:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$Q_V = nC_V\Delta T$ $Q_P = nC_P\Delta T$	Q_P/Q_V- כמות החום שעוברת בתהליך בנפח/לחץ קבוע. C_P/C_V - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע (למול)	
$C_V = m_{mol}c_V$ $C_P = m_{mol}c_P$	m_{mol}- מסה מולרית. c_P/c_V - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע (ליחידת מסה)	
$C_P - C_V = R$	ההפרש בין קיבול החום בלחץ קבוע לקיבול החום בנפח קבוע תמיד שווה לקבוע R	

שאלות:

1) אנשים מחממים אולם קולנוע

אולם קולנוע מכיל 1800 מקומות ישיבה. נפח האולם הוא: $2.0 \cdot 10^4 m^3$.

בערב הבכורה של הסרט "תרגיל חם" האולם היה מלא ומערכת האוורור התקלקלה.

בכמה מעלות תעלה הטמפרטורה במשך השעתיים של הקרנת הסרט אם אדם ממוצע פולט חום בקצב של 70 וואט.

הנח שהאוויר הוא גז אידיאלי דואטומי וטמפרטורת החדר היא בערך $20°C$.

2) לחץ לינארי בטמפרטורה*

גז אידיאלי דו אטומי מכיל 3.00 מולים בלחץ של 1.00atm ובטמפרטורה של $430°K$.

הגז עובר תהליך שבו הלחץ שלו גדל לינארית עם הטמפרטורה.

הטמפרטורה הסופית היא $680°K$ והלחץ הסופי הוא 1.80atm.

הנח שבכל התהליך יש 5 דרגות חופש פעילות.

א. מהו השינוי באנרגיה הפנימית של הגז?

ב. מהי העבודה שנעשתה על ידי הגז?

ג. החום שנוסף לגז?

תשובות סופיות:

1) $53°C$

2) א. 15600J ב. –1720J ג. 13900J

הקשר בין לחץ ונפח בהתפשטות אדיאבטית:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$P \cdot V^{\gamma} = const$	הקשר בין לחץ ונפח בתהליך אדיאבטי קווזיסטטי	

שאלות:

1) דוגמה - מכווצים גז אדיאבטית ואיזותרמית

גז אידיאלי מונואטומי עובר תהליך כפי שמתואר בגרף.

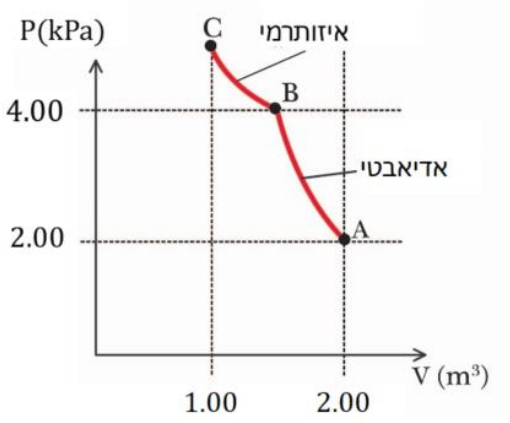
התהליך מתחיל מהמצב A והגז עובר כיווץ אדיאבטי עד למצב B ומשם הוא מכווץ איזותרמית עד לנקודה C.

נתון: $P_A = 2.00kPa\ ,\ V_A = 2.00m^3,\ \ P_B = 4.00\ kPa\ ,\ V_C = 1.00m^3$.

V_B ו-P_C אינם ידועים.

א. מצא את V_B.

ב. מהי העבודה הכוללת שנעשתה על הגז בתהליך?



2) לחץ וטמפרטורה בהתפשטות אדיאבטית

1.00mol של גז מונואטומי אידיאלי בלחץ של 1.00atm ובטמפרטורה של 20°C מתפשט אדיאבטית לנפח הגדול פי 2.25 מנפחו בהתחלה.

מהם הלחץ והטמפרטורה הסופיים של הגז?

3) גז דו אטומי מתפשט אדיאבטית

גז דו-אטומי מתפשט אדיאבטית.

הטמפרטורה בהתחלה היא 15°C והטמפרטורה בסוף היא −25°C.

הנפח בהתחלה הוא: $0.036m^3$.

מהו נפח הגז בסוף התהליך?

4) גז עובר תהליך בשלושה שלבים

1.00mol של גז אידיאלי מונואטומי שנמצא בלחץ 1.00atm עובר את התהליך הבא:

שלב 1 - הגז מתפשט אדיאבטית מ- $T_A = 578°K$ עד ל- $T_B = 388°K$.

שלב 2 - הגז נדחס בלחץ קבוע עד שהטמפרטורה שלו מגיעה ל- T_C.

שלב 3 - הגז חוזר לטמפרטורה והלחץ הראשונים שלו בתהליך של נפח קבוע.

א. שרטטו את התהליך בדיאגרמת $P-V$.

ב. מהו T_C?

ג. חשבו את השינוי באנרגיה הפנימית, את העבודה שביצע הגז ואת החום שנוסף לגז בכל שלב בנפרד ובתהליך כולו.

5) צבר אוויר עולה בגובה **

צבר אוויר הוא אוסף של מולקולות בעלי משתני מצב אחידים (לחץ וטמפ').
כשצבר אוויר עולה בגובה הוא משנה את הלחץ שלו בהתאם ללחץ של האוויר מסביבו, ולפי הנוסחה: $\frac{dP}{dy} = -\rho g$.

כאשר ρ הוא צפיפות המסה של הצבר והוא תלוי בגובה.
במהלך התנועה כלפי מעלה, הנפח גדל, ומכיוון שאוויר הוא מוליך חום גרוע אפשר להניח שההתפשטות היא אדיאבטית.

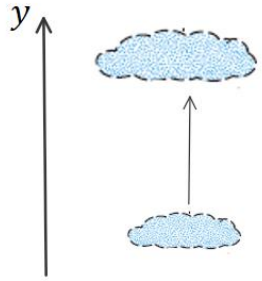
א. הראה שעבור גז אידיאלי שעובר תהליך אדיאבטי: $P^{1-\gamma}T^{\gamma} = const$

ב. הראה כי הקשר בין הלחץ לטמפרטורה של הצבר נתון לפי הנוסחה: $(1-\gamma)(-\rho g) + \gamma\frac{P}{T}\frac{dT}{dy} = 0$.

ג. הראה כי התלות של הטמפרטורה בגובה היא: $\frac{dT}{dy} = \frac{1-\gamma}{\gamma}\frac{mg}{k}$,
כאשר m היא מסה ממוצעת של מולקולה ו-k הוא קבוע בולצמן.

ד. בהינתן שאוויר הוא גז דו אטומי עם מסה ממוצעת של 29u,
הראה ש- $\frac{dT}{dy} = -9.8\,°C/k$.

ה. בקליפורניה ישנם רוחות שמגיעות מההרים של מדבר סיירה בנבדה.
גובה ההרים הוא כ-4000m. הרוחות מגיעות לעמק המוות שגובהו $-100m$,
ביחס לפני הים. אם טמפרטורת הרוח היא $-5°C$ בהרים של נוודה מה תהיה הטמפרטורה של הרוח בעמק?

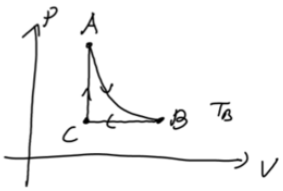


תשובות סופיות:

1) א. $1.32\cdot m^3$ ב. $3.4\cdot 10^3 J$

2) $P = 0.258atm\ ,\ T = -103°C$

3) $0.052m^3$

4) א. 

ב. $214°K$

ג. שלב AB: $Q = 0\ ,\ \Delta Eint = -2370J\ ,\ W = 2370J$

שלב BC: $Q = -2170J\ ,\ \Delta Eint = -2170J\ ,\ W = -1450J$

שלב CA: $Q = 3030J = \Delta Eint\ ,\ W = 0$

כל התהליך: $Q = 920J\ ,\ \Delta Eint = 0\ ,\ W = 920J$

5) א. הוכחה. ב. הוכחה. ג. הוכחה. ד. הוכחה. ה. $35°C$

הולכה הסעה וקרינה:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA\frac{(T_1 - T_2)}{l}$	$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ - קצב הולכת חום k - מוליכות תרמית - תלוי בסוג החומר, מופיע בטבלה. A - שטח חתך. l - אורך.	אם אחד מהמשתנים אינו קבוע אז עוברים לנוסחה דיפרנציאלית $\frac{dQ}{dt} = -kA\frac{dT}{dx}$ המינוס בנוסחה אומר שקצב הולכת החום הוא בכיוון הפוך לגרדיאנט הטמפרטורה (כלומר קצב הולכת החום הוא מהטמפרטורה הגבוהה לנמוכה)
$R = \frac{l}{k}$	R- value	R גבוה אומר מבודד טוב. לשים לב ש-R תלוי גם באורך של החומר ולא רק בסוג.
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon\sigma AT^4$	משוואת סטפן בולצמן - קצב החום הנפלט מגוף ע"י קרינה. $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ קבוע סטפן בולצמן. T - הטמפרטורה של הגוף הפולט. ε - קירון (אמיסיביות) $0 < \varepsilon < 1$	שימו לב שהקצב תלוי בטמפרטורה ברביעית. ε - תכונה של פני הגוף שקורן בגופים שחורים (לדוגמה פחם) $\varepsilon \approx 1$, במתכות מבריקות $\varepsilon \approx 0$.
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon\sigma AT_2^4$	קצב קליטה של קרינה. T_2 - הטמפרטורה של הסביבה.	האמיסיביות זהה לקליטה ופליטה. הקצב של קליטה קשור לטמפרטורה של הסביבה ברביעית.
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4)$	הנטו של קצב פליטת הקרינה (פליטה פחות קליטה) T_1 - הטמפרטורה של הגוף הפולט. T_2 - הטמפרטורה של הסביבה.	
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \left(1000\frac{W}{m^2 \cdot s}\right)\varepsilon A\cos\theta$	כמות החום שסופג גוף כתוצאה מקרינת השמש ביום בהיר	הקבוע הסולרי $1350\frac{W}{m^2 \cdot s}$ האטמוספירה יכולה לספוג עד 70% מהקרינה. ביום בהיר הקבוע בערך $1000\frac{W}{m^2 \cdot s}$

שאלות:

1) דוגמה - איבוד חום דרך חלונות בבית

מקור רציני לאיבוד החום בבית הוא דרך החלונות.

חשבו את קצב איבוד החום דרך חלון זכוכית בגודל $1.0\text{m} \times 1.5\text{m}$ ועובי 2.8mm

אם הטמפרטורה בצד הפנימי של החלון היא $18°\text{C}$ ובצד החיצוני היא $17°\text{C}$.

2) דוגמה - קירור באמצעות קרינה

אדם יושב בחדר לובש בגד ים בלבד.

הקירות של החדר נמצאים בטמפרטורה של $15°\text{C}$.

הערך את כמות החום שהאדם מאבד כתוצאה מקרינה.

הנח שטמפרטורת העור היא בערך $34°\text{C}$ ו-$\varepsilon = 0.70$.

שטח הפנים של האדם שבמגע עם האוויר הוא: 1.5m^2-.

3) דוגמה - הערך את הרדיוס של הכוכב ביטלגוס

כוכב הענק ביטלג'וס פולט קרינה בקצב שהוא פי 10^4 גדול מהקצב של השמש שלנו.

הטמפרטורה על פני הכוכב ביטלג'וס היא בערך חצי מזו של השמש.

הערך את הרדיוס של הכוכב אם $\varepsilon = 1$ עבור השמש וביטלג'וס ורדיוס השמש הוא: $R_s = 7 \cdot 10^8\text{m}$. הנוסחה לשטח פני כדור היא: $4\pi R^2$.

4) מוט נחושת עם טמפרטורות שונות בקצוות

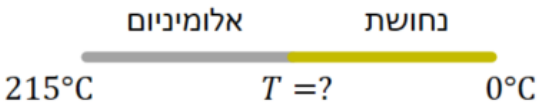
מוט נחושת באורך של 42c.m וקוטר 2.6c.m מוחזק בצד אחד בטמפרטורה של $320°\text{C}$ ובצידו השני המוט טבול במים בטמפרטורה של $20°\text{C}$.

חשבו את קצב מעבר החום במוט.

5) מוט נחושת מחובר למוט אלומיניום

מוט נחושת מחובר בקצה למוט אלומיניום, שני המוטות בעלי אותו שטח חתך ואותו האורך. הקצה השני של האלומיניום נמצא בתוך תנור בטמפרטורה קבועה של $215°\text{C}$ והקצה השני של הנחושת נמצא בתוך קרח בטמפרטורה קבועה של $0°\text{C}$.

חשבו את הטמפרטורה בנקודת החיבור של המוטות.



6) קרח נמס בצידנית

צידנית בגודל $20c.m \times 30c.m \times 50c.m$ עשויה מקלקר.

הקירות של הצידנית הן בעובי $1.5c.m$. ממלאים את הצידנית בקרח ב-$0°C$.
כמה זמן ייקח לקרח להתמוסס אם הצידנית נמצאת בחדר בו הטמפרטורה היא $32°C$?

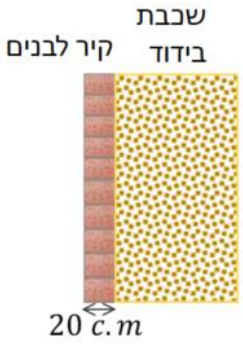
המוליכות התרמית של קלקר היא: $0.033\frac{W}{m\cdot k}$ והצפיפות של קרח היא: $9.17\cdot 10^2\frac{kg}{m^3}$.

7) קרח נמס בשמש

כמה זמן לוקח לשמש להמיס קוביית קרח ביום בהיר אם הקרח נמצא בטמפרטורה של $0°C$ וצורתו היא משטח ישר בגודל $1.0m^2$ ובעובי $1.0c.m$.

הנח שהזווית של הקרניים עם האנך למשטח היא $30°$ והאמסיביות של הקרח היא 0.050.

8) איבוד חום דרך קיר עם שכבת בידוד



בידוד של קיר מורכב משכבה של לבנים ברוחב של $20c.m$ שצמודה לשכבת בידוד נוספת בעלת: $R\text{-value}=3\frac{m^2\cdot s\cdot C°}{J}$.

מהו קצב החום המועבר אם השטח של הקיר הוא $15m^2$ והפרש הטמפרטורות הוא $30°C$.

תשובות סופיות:

1) $450\frac{J}{sec}$
2) $120\frac{J}{sec}$
3) $2.8\cdot 10^{11}m$
4) $140\frac{J}{sec}$
5) $74°C$
6) בערך 58 שעות.
7) בערך 20 שעות.
8) $140\frac{J}{sec}$

סיכום:

טבלאות:

קיבול חום סגולי (Specific Heats) (ב 1 atm ו- 20°C אלא אם מצוין אחרת)		
Substance	Specific Heat,c kcal/kg · C⁰ (= cal/g · C⁰)	J/kg · C⁰
Aluminum	0.22	900
Alcohol(ryhyl)	0.58	2400
Copper	0.093	390
Glass	0.20	840
Iron or steel	0.11	450
Lead	0.031	130
Marble	0.21	860
Mercury	0.033	140
Silver	0.056	230
Wood	0.4	1700
Water		
Ice (-5⁰C)	0.50	2100
Liquid (15⁰C)	1.00	4186
Steam (110⁰C)	0.48	2010
Human body (average)	0.83	3470
Protein	0.4	1700

חום כמוס (בלחץ של 1 atm)						
Substance	Melting Point (⁰C)	Heat of Fusion kcal/kg⁺	kJ/kg	Boiling Point (⁰C)	Heat of Vaporization kcal/kg⁺	kJ/kg
Oxygen	-218.8	3.3	14	-183	51	210
Nitrogen	-210.0	6.1	26	-195.8	48	200
Ethyl alcohol	-114	25	104	78	204	850
Ammonia	-117	8.0	33	-33.4	33	137
Water	0	79.7	333	100	539	2260
Lead	327	5.9	25	1750	208	870
Silver	961	21	88	2193	558	2300
Iron	1808	69.1	289	3023	1520	6340
Tungsten	3410	44	184	5900	1150	4800

קיבול חום של גזים ב 15°C						
Gas	Specific heats $(kcal/\text{kg}\cdot K)$		Molar specific heats $(cal/mol\cdot K)$		$C_V - C_P$ $(cal/mol\cdot K)$	$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$
	c_V	c_P	C_V	C_P		
Monoatomic						
He	0.75	1.15	2.98	4.97	1.99	1.67
Ne	0.148	0.246	2.98	4.97	1.99	1.67
Diatomic						
N_2	0.177	0.248	4.96	6.95	1.99	1.40
O_2	0.155	0.218	5.04	7.03	2.00	1.40
Triatomic						
CO_2	0.153	0.199	6.80	8.82	2.03	1.30
H_2O (100°C)	0.350	0.482	6.20	8.20	2.00	1.32

מוליכויות תרמיות

Substance	Thermal Conductivity,k kcal (s.m.C°)	J (s.m.C°)
Silver	10×10^{-2}	420
Copper	9.2×10^{-2}	380
Aluminum	5.0×10^{-2}	200
Steel	1.1×10^{-2}	40
Ice	5×10^{-4}	2
Glass	2.0×10^{-4}	0.84
Brick	2.0×10^{-4}	0.84
Concrete	2.0×10^{-4}	0.84
Water	1.4×10^{-4}	0.56
Human tissue	0.5×10^{-4}	0.2
Wood	0.3×10^{-4}	0.1
Fiberglass	0.12×10^{-4}	0.048
Cork	01×10^{-4}	0.042
Wood	0.1×10^{-4}	0.040
Goose down	0.06×10^{-4}	0.025
Polyurethane	0.06×10^{-4}	0.024
Air	0.055×10^{-4}	0.023

פיזיקה 1 מכניקה

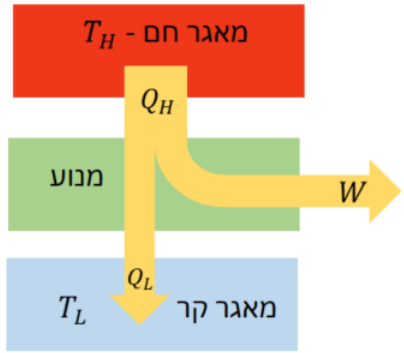
פרק 22 - החוק השני של התרמודינמיקה

תוכן העניינים

1. הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום 307
2. תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו 310
3. מקררים מזגנים ומשאבות חום 313
4. אנטרופיה 315
5. סיכום ..... (ללא ספר)
6. פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני 319

הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
 $Q_H = W + Q_L$	Q_H - כמות החום שיוצאת מהמאגר החם. Q_L - כמות החום שנכנסת אל המאגר הקר. W - העבודה שהמנוע מבצע על הסביבה.	שימו לב לסימנים! כל הסימנים חיוביים! T_H ו-T_L נקראות טמפרטורות העבודה
$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$		

שאלות:

1) דוגמה - נצילות של מנוע מכונית

למנוע של מכונית יש נצילות של 20%. המנוע מפיק 25kJ של עבודה כל שניה.

א. כמה חום דרוש להכניס למנוע כל שניה?

ב. כמה חום נפלט מהמנוע כל שניה?

2) חישוב נצילות של מנוע חום

מנוע חום פולט 6900J של חום כאשר הוא מבצע עבודה של 2300J.

מה הנצילות של המנוע באחוזים?

3) חום שפולטת תחנת כוח

תחנת כוח מייצרת 560MW של הספק חשמלי.

העריכו את החום שנפלט כל שניה אם הנצילות של התחנה היא 35%.

4) מנוע 6 צילינדרים

למנוע עם 6 צילינדרים של אוטו יש נצילות של 24%. המנוע מספק 180J של עבודה בכל מחזור עבור כל צילינדר. המנוע עושה 25 מחזורים בשניה.

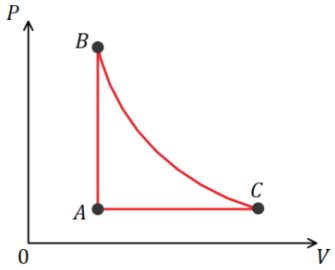
א. מהי העבודה הכוללת שמבצע המנוע בשניה?

ב. מהו החום שנוצר משריפת הדלק כל שניה?

ג. אם האנרגיה הנוצרת מדלק היא 32MJ לליטר, לכמה זמן מחזיק מיכל דלק מלא המכיל 40 ליטר דלק?

5) מנוע הפיך עם גז ארגון

מנוע הפיך מכיל 1.00mol של גז ארגון, גז מונואטומי כמעט אידיאלי.



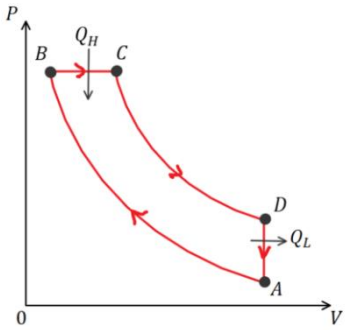
התהליך שעובר המנוע מתואר באיור כאשר הגז בהתחלה בנקודה A ב-STP. הנקודות B ו-C נמצאות על עקומה איזותרמית בטמפרטורה $T = 433K$.

התהליך AB הוא תהליך בנפח קבוע והתהליך AC הוא תהליך בלחץ קבוע.

א. האם המנוע מבצע את התהליך באיור עם כיוון השעון או נגד השעון?

ב. מהי הנצילות של המנוע?

6) מנוע בנזין אידיאלי



אפשר לתאר את הפעולה של מנוע דיזל בקירוב על ידי התהליך המחזורי באיור.

אוויר נשאב לצילינדר בפעימת יניקה (לא חלק מהמחזור באיור).

האוויר נדחס אדיאבטית, שלב AB.

בנקודה B דלק דיזל מוזרק לתוך הצילינדר.

הדלק נשרף ישר כי הטמפרטורה מאוד גבוהה.

הבעירה היא יחסית איטית ובמהלך החלק הראשון של פעימת העבודה הגז מתפשט כמעט בנפח קבוע, שלב BC.

בשלב השני של פעימת העבודה, אחרי שהבעירה מסתיימת, הגז מתפשט אדיאבטית, שלב CD.

שלב DA מתאר את פעימת הפליטה.

א. הראה שעבור מנוע שעובר את התהליך הנ"ל עם גז אידיאלי הנצילות האידיאלית היא: $\eta = 1 - \frac{(V_A/V_c)^{-\gamma} - (V_A/V_B)^{-\gamma}}{\gamma[(V_A/V_c)^{-1} - (V_A/V_B)^{-1}]}$.

V_A/V_B נקרא יחס הדחיסה ו-V_A/V_c נקרא יחס התרחבות "expansion ratio".

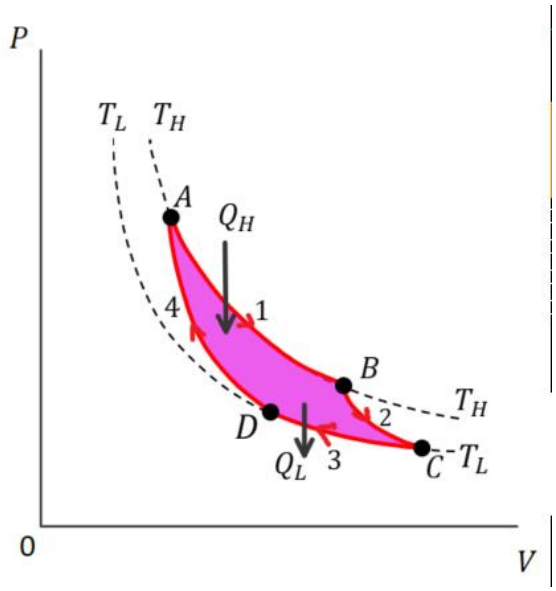
ב. חשב את הנצילות אם הגז הוא דו אטומי, $V_A/V_B = 16$ ו-$V_A/V_c = 4.5$.

תשובות סופיות:

1) א. 125kJ ב. 100kJ
2) 25%
3) 1000J
4) א. 27000J ב. 110000J ג. 3.2hr
5) א. עם השעון. ב. 9%
6) א. הוכחה. ב. 55%

תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו:

סיכום כללי:

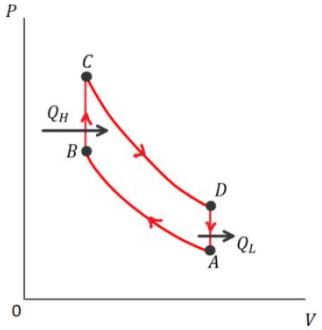
הנוסחה	תיאור	הערות
	מחזור קרנו	השטח שסגור בתוך הלולאה שווה לעבודה נטו שנעשית על ידי המנוע. מורכב מתהליכים הפיכים ולכן לא קיים במציאות, ניתן רק לשאוף אליו.
$\eta_{\text{קרנו}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	נצילות במנוע קרנו	נקראת גם נצילות אידיאלית או מקסימאלית

שאלות:

1) דוגמה - טענה לא הגיונית

יצרן רכב טוען כי במנוע שייצר קצב הכניסה של החום הוא 9.1kJ בטמפרטורה של 162°C וקצב הפליטה של החום הוא 4.1kJ בטמפרטורה של 22°C.
האם אתם מאמינים ליצרן?

2) דוגמה - נצילות של מנוע בעירה



המחזור של מנוע בעירה מתואר באיור.
הניחו שחומר העבודה הוא גז אידיאלי.

א. הראו כי הנצילות של המנוע היא: $\eta = 1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{1-\gamma}$.

ב. חשבו את הנצילות של המנוע אם יחס הדחיסה הוא: $\frac{V_A}{V_B} = 7.0$ והגז הוא דואטומי בדומה ל-O_2 או N_2.

3) מנוע חום עם חנקן נוזלי

זה לא הכרחי שהמאגר החם של מנוע חום יהיה יותר חם מהסביבה. חנקן נוזלי זול בערך כמו בקבוק מים והטמפרטורה שלו היא בערך $77K$.
מה תהיה הנצילות המקסימאלית של מנוע הפועל בין הטמפרטורה של חנקן נוזלי לטמפרטורת החדר $293K$?

4) מנוע 1100W

מנוע קרנו פועל בטמפרטורות $190°C$ ו- $25°C$. ההספק של המנוע הוא $1100W$.
כמה חום פולט המנוע כל שניה?

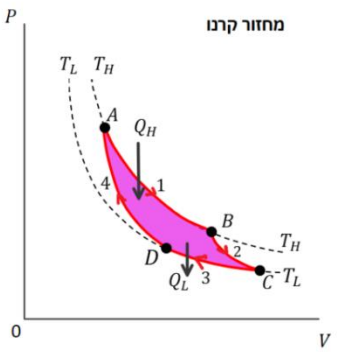
5) מטפס הרים

הניחו שאדם ששוקל $70kg$ צריך $4.3 \cdot 10^3 kcal$ של אנרגיה בשביל יום אחד של פעילות.
העריכו את הגובה המקסימאלי שאותו אדם יכול לטפס על הר עם כמות זו של אנרגיה.
כהערכה גסה אפשר להתייחס לאדם כמנוע הפועל בין טמפרטורות הגוף $37°C$ לטמפרטורת הסביבה $20°C$.

6) טמפרטורת עבודה בנסיעה

מכונית מייצרת עבודה בקצב של בערך $7\frac{kJ}{sec}$ כאשר היא נוסעת במהירות קבועה של $25\frac{m}{sec}$ בכביש אופקי, זוהי עבודה כנגד כוח החיכוך.
המכונית יכולה לנסוע $14km$ לכל ליטר דלק.
מה הערך המינימלי של T_H אם $T_L = 25°C$ והאנרגיה הזמינה מליטר אחד של דלק היא: $3.2 \cdot 10^7 J$?

7) חישובים במחזור קרנו



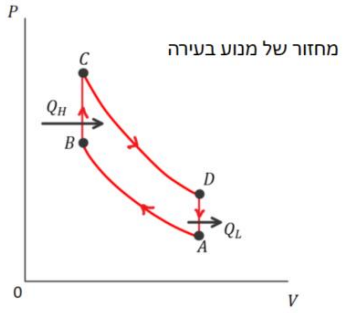
מול אחד של גז מונואטומי עובר תהליך של מחזור קרנו,
כאשר $T_H = 380°C$ ו- $T_L = 180°C$.
הלחץ ההתחלתי הוא $7.8atm$.
במהלך ההתרחבות האיזותרמית הנפח מוכפל.

א. מהם הלחץ והנפח בנקודות: A, B, C, D?
ב. מצאו את Q , W ו-ΔE_{int} עבור כל שלב בתהליך.
ג. חשבו את הנצילות של המנוע באמצעות
המשוואות: $\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$ ו- $\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$.

8) **יחס דחיסה במנוע בעירה**

במנוע שמתנהג בקירוב כמו המחזור של מנוע בעירה הדלק מוצת בסוף שלב הדחיסה האדיאבטית.

טמפרטורת ההצתה של דלק מסוג אוקטן 95 היא 280°C ובהנחה שחומר העבודה הוא גז שמגיע מהאוויר (דו אטומי בטמפרטורה 25°C) קבעו מהו יחס הדחיסה המירבי $\frac{V_A}{V_B}$.



תשובות סופיות:

1) לא.
2) א. הוכחה. ב. 54%
3) 74%
4) 5000J
5) 1400m
6) 400°K
7) א. $P_A = 7.9\cdot10^5 Pa$, $V_A = 0.69\cdot10^{-2} m^3$, $P_B = 4\cdot10^5 Pa$, $V_B = 1.4\cdot10^{-2} m^3$, $P_C = 1.6\cdot10^5 Pa$, $V_C = 2.4\cdot10^{-2} m^3$, $P_D = 3.2\cdot10^5 Pa$, $V_D = 1.2\cdot10^{-2} m^3$

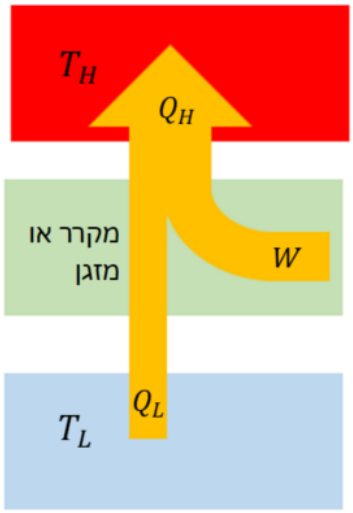
ב. $\Delta Eint_{AB} = 0$, $Q_{AB} = W_{AB} = 3800J$, $\Delta Eint_{BC} = -2500J$, $Q_{BC} = 0$, $W_{BC} = 2500J$, $\Delta Eint_{CD} = 0$, $Q_{CD} = W_{CD} = -2600J$, $\Delta Eint_{DA} = 2500J$, $Q_{DA} = 0$, $W_{DA} = -2500J$

ג. $\eta = 31\%$

8) 7.1

מקררים מזגנים ומשאבות חום:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$COP = \frac{Q_L}{w} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$	מקדם היעילות של מקרר או מזגן	
$COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$	עבור מקרר או מזגן אידיאלי (לא מושלם)	
$COP = \frac{Q_H}{W}$	מקדם היעילות של משאבת חום	תמיד גדול מאחד

שאלות:

1) דוגמה - מכינים קרח

למקפיא יש מקדם יעילות של 3.6 והוא עובד בהספק של 200W.
כמה זמן ייקח למקפיא להקפיא מגש קוביות קרח אם המגש הוכנס למקרר המכיל 400gr מים ב-0°C?

2) דוגמה - משאבת חום

למשאבת חום מקדם יעילות של 3.0 והספק של 1200W.

א. כמה חום היא מוסיפה לחדר כל שניה?

ב. אם הופכים את פעולת המשאבה בקיץ כך שתשמש כמזגן, מה תצפו שיהיה מקדם היעילות שלה?

3) מקדם יעילות של מקרר אידיאלי

מקרר אידיאלי מחזיק את הטמפרטורה בתוכו ב-$4°C$ כאשר הטמפרטורה בבית היא $25°C$. מהו מקדם היעילות של המקרר?

4) מנוע קרנו עובד הפוך

למנוע אידיאלי (מנוע קרנו) יש נצילות של 37%.
אם היה אפשר להפעיל את המנוע הפוך כך שיעבוד בתור משאבת חום, מה היה מקדם היעילות של המנוע?

5) מקרר קרנו אידיאלי מקפיא מים

"מקרר קרנו" (מנוע קרנו שעובד הפוך) מוציא חום מתא ההקפאה הנמצא בטמפרטורה של $-15°C$ ופולט אותו לחדר בטמפרטורה של $25°C$.

א. הראו כי אם מקדם היעילות של מקרר מוגדר לפי: $COP = \frac{Q_L}{W}$
אז מקדם היעלות של מקרר קרנו הוא: $COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$.

ב. כמה עבודה מבצע המנוע לשנות $0.6kg$ של מים ב-$25°C$ לקרח ב-$-15°C$?
אם ההספק של המדחס במנוע הוא $160W$, מהו הזמן המינימלי הדרוש להקפיא מים מטמפרטורה של $25°C$ לקרח ב-$0°C$?

6) משאבת חום לא אידיאלית

משאבת חום פועלת כמזגן ושומרת את הטמפרטורה בתוך הבניין על $24°C$ כאשר הטמפרטורה בחוץ היא $40°C$.
בשביל לבצע זאת המשאבה שואבת $3 \cdot 10^7 J$ חום בשעה מתוך הבניין ביעילות של 25% מהיעילות האידיאלית (זו של מקרר קרנו).

א. מהו מקדם היעילות של המשאבה?

ב. מהו ההספק של המדחס במשאבה? רשום תשובה בכוח סוס.

תשובות סופיות:

1) בערך 3 דקות.

2) א. $4600J$ ב. 2

3) 13

4) 2.7

5) א. הוכחה. ב. $4.4 \cdot 10^4 J$

6) א. 4.6 ב. $2.4HP$

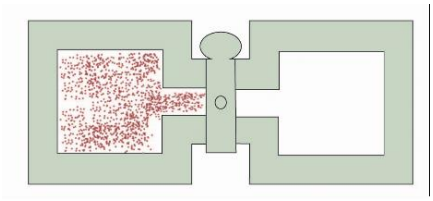
אנטרופיה:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$\Delta S = \frac{Q}{T}$	Q - כמות החום שנכנסת למערכת	רק בטמפרטורה קבועה ובתהליך הפיך T - בקלווין!
השינוי באנטרופיה לא תלוי בתהליך	האנטרופיה היא משתנה מצב של המערכת	

שאלות:

1) **דוגמה - שינוי באנטרופיה כשמערבבים מים**
מערבבים $5kg$ מים ב-$20°C$ עם $5kg$ מים ב-$24°C$.
א. מה תהיה הטמפרטורה הסופית של המים המעורבבים?
ב. העריכו את השינוי באנטרופיה של כל המערכת.

2) **דוגמה - שינוי באנטרופיה בהתפשטות חופשית**

גז מתפשט בצורה אדיאבטית וחופשית (כפי שמתואר בפרק הקודם בסרטון התפשטות חופשית) מנפח V_1 לנפח V_2.
א. חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז.
ב. מהו השינוי באנטרופיה של הסביבה?
ג. הערך את השינוי באנטרופיה עבור $n = 1.00$ ו-$V_2 = 2.00V_1$.

3) **דוגמה - נחושת חמה נזרקת לתוך אגם**
גוש נחושת חם בעל מסה של $2.00kg$ בטמפרטורה של $T_1 = 840°K$ נזרק לאגם גדול בטמפרטורה של $T_2 = 280°K$.
הניחו כי האגם מספיק גדול כך שהטמפרטורה שלו לא משתנה באופן מהותי.
מהו השינוי באנטרופיה של:
א. הנחושת.
ב. האגם.
ג. הכולל.

4) דוגמה - קוביית קרח נמסה

קוביית קרח במסה של $1.00kg$ ובטמפרטורה של $0°C$ נמצאת במגע עם מאגר חום גדול שהטמפרטורה שלו היא מעט מעל $0°C$.
כתוצאה מכך הקרח נמס מאוד לאט למים.
מה השינוי באנטרופיה של:

א. הקרח.

ב. המאגר.

5) שינוי באנטרופיה של מים שהופכים לאדים

מהו השינוי באנטרופיה של $150gr$ של מים ב-$100°C$ שהופכים לאדים ב-$100°C$?

6) קופסה מחליקה על משטח עם חיכוך

קופסה בעלת מסה של $6.5kg$ מחליקה על משטח אופקי לא חלק (קיים חיכוך קינטי).
חשבו את השינוי באנטרופיה של היקום מתחילת תנועתה של הקופסה במהירות $5\frac{m}{sec}$ ועד לעצירתה. הניחו שכל הגופים נמצאים בטמפרטורת החדר $293K$.

7) מים מתקררים ממאגר קרח

$1.0L$ של מים ב-$0°C$ נמצאים במגע עם כמות גדולה של קרח ב-$-10°C$.
כתוצאה מכך המים קופאים ומתקררים גם ל- $-10°C$.
חשבו את השינוי הכולל באנטרופיה.

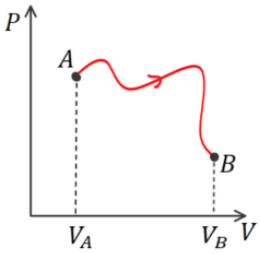
8) מוט ברזל נזרק למים

מוט ברזל בעל מסה של $1.8kg$ ובטמפרטורה של $43°C$ נזרק למיכל מים המצופה בקלקר.
המיכל מכיל $1.2kg$ מים בטמפרטורת החדר ($20°C$).
מהו השינוי הכולל באנטרופיה?

9) גז אידיאלי מתפשט איזותרמית

גז אידיאלי מתפשט איזותרמית $T = 350°K$ מנפח $2.30L$ ולחץ $6.9atm$ ללחץ $1.0atm$.
מהו השינוי באנטרופיה של הגז?

10) גז אידיאלי עובר תהליך מוזר



גז אידיאלי המכיל n מולים עובר את התהליך המתואר באיור.
הטמפרטורה בנקודות A ו-B זהה.
חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז בעקבות התהליך.
nV_B , V_A נתונים.

11) שני גזים מתערבבים

1.00mol של גז חנקן ו-1.00mol של גז חמצן נמצאים בתאים נפרדים, זהים בגודלם, באותה הטמפרטורה ומבודדים מהסביבה.
מחברים בין התאים והגזים (האידיאלים) מתערבבים.
מהו השינוי באנטרופיה של:

א. כל המערכת?
ב. של הסביבה?
ג. חזור על סעיף א' אם התא של אחד הגזים גדול פי שניים מהתא של השני.

12) קיבול חום מולרי משתנה

קיבול החום המולרי של אשלגן בטמפרטורות נמוכות משתנה עם הטמפרטורה לפי $C_V = \alpha T + \beta T^3$ כאשר $\alpha = 2.08\frac{mJ}{mol\cdot K^2}$ ו- $\beta = 2.57\frac{mJ}{mol\cdot K^4}$.
מצאו את השינוי באנטרופיה של 0.25mol של אשלגן כאשר הטמפרטורה שלו יורדת מ-4.0K ל-2.0K בתהליך בנפח קבוע.

תשובות סופיות:

1) א. $22°C$ ב. $1\frac{J}{k}$

2) א. $\Delta S = nR\ln\frac{V_2}{V_1}$ ב. $\Delta S = 0$ ג. $5.76\frac{J}{k}$

3) א. $-857\frac{J}{K}$ ב. $1560\frac{J}{K}$ ג. $703\frac{J}{K}$

4) א. $-1220\frac{J}{K}$ ב. $1220\frac{J}{K}$

5) $910\frac{J}{K}$

6) $0.28\frac{J}{K}$

7) $48\frac{J}{K}$

8) $2.2\frac{J}{K}$

9) $8.8\frac{J}{K}$

10) $nR\ln\frac{V_B}{V_A}$

11) א. $5.8\frac{J}{K}$ ב. 0 ג. $13\frac{J}{K}$

12) $-11\frac{mJ}{K}$

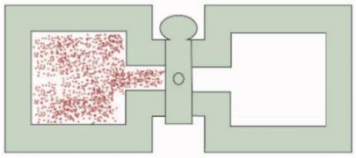
פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$S = k \ln \Omega$	k - קבוע בולצמן Ω - פונקציית המצבים המיקרוסקופיים	

שאלות:

1) דוגמה - התפשטות חופשית גישה סטטיסטית



השתמשו במשוואה של בולצמן לאנטרופיה וחשבו את השינוי באנטרופיה במקרה של התפשטות חופשית של מול אחד של גז אידיאלי מנפח V לנפח 2V.

הניחו ש-Ω אומרת את מספר המיקומים האפשריים של כל המולוקלות. השוו לחישוב שנעשה בדוגמה הקודמת של התפשטות חופשית באמצעות הנוסחה של קלאוזיוס.

2) אנטרופיה להטלת 4 מטבעות

השתמשו בפונקציית המצבים Ω וחשבו מה האנטרופיה בכל אחד מהמצבים המיקרוסקופיים שתוארו בדוגמה של הטלת 4 מטבעות.

המצב המיקרוסקופי	המצבים המיקרוסקופים המתאימים (H-ראש , T-זנב)	מספר המצבים המיקרוסקופים
4 ראש	HHHH	1
3 ראש, 1 זנב	THHH , HTHH , HHTH , HHHT	4
2 ראש, 2 זנב	TTHH , THTH , HTTH , THHT , HTHT , HHTT	6
1 ראש, 3 זנב	HTTT , THTT , TTHT , TTTH	4
4 זנב	TTTT	1

3) הטלת 5 מטבעות

דני לקח 5 מטבעות והטיל אותם בצורה אקראית על השולחן.

א. רשמו טבלה ובה את מספר המצבים המיקרוסקופים המתאימים לכל מצב מקרו.

ב. מהי ההסתברות שבהטלה יצאו 3 מטבעות ראש ו-2 זנב?

ג. מהי ההסתברות שכל המטבעות יפלו על זנב?

ד. מהי ההסתברות שבהטלה יפלו לפחות 3 מטבעות על זנב?

4) שינוי באנטרופיה בסידור 10 מטבעות

על שולחן ישנם 10 מטבעות כאשר 9 מתוכם נמצאים עם הראש כלפי מעלה ואחד עם הזנב כלפי מעלה. הופכים 3 מטבעות שהיו עם הראש כלפי מעלה.
מה השינוי באנטרופיה של המערכת?
השווה לשינוי באנטרופיה של מערכת תרמודינמית מאחד הדוגמאות הקודמות.

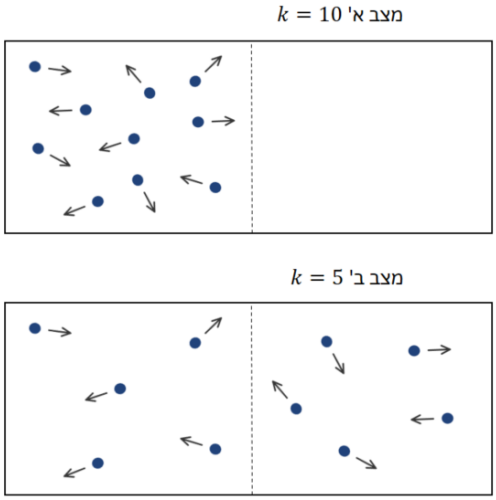
ניתן לחשב את פונקציית המצבים גם באמצעות מקדמי הבינום של ניוטון: $\frac{n!}{k!(n-k)!}$
כאשר n הוא מספר המטבעות ו-k מספר המטבעות עם הזנב (או הראש) כלפי מעלה.

5) גז עם 10 אטומים בתיבה

נניח שישנה מערכת דמויית גז המכילה $n = 10$ אטומים במהירויות זהות.
ה"גז" נמצא בתוך תיבה. נסמן את מספר האטומים הנמצאים בחציה השמאלי של התיבה ב-k. מספר האפשרויות לסדר את האטומים כך ש-k אטומים יהיו בחצי השמאלי הוא: $\frac{n!}{k!(n-k)!}$.
נניח כי כל ערך של k מסמל מצב מיקרוסקופי של המערכת.
במצב א' שבאיור כל 10 האטומים בצד שמאל של התיבה $(k = 10)$
ובמצב ב' שבאיור 5 בחצי הימני ו-5 בשמאלי $(k = 5)$.

א. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב א' למצב ב'?
האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?

ב. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב ב' למצב א'?
האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?



תשובות סופיות:

1) $R\ln(2)$

2)

המצב המיקרוסקופי	אנטרופיה
4 ראש	0
3 ראש, 1 זנב	$1.91\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$
2 ראש, 2 זנב	$2.47\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$
1 ראש, 3 זנב	$1.91\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$
4 זנב	0

3) א.

פונקציית המצבים Ω	המצבים המיקרוסקופיים	מצב מקרוסקופי
1	HHHHH	5-H , 0-T
5	HHHHT , HHHTH , HHTHH , HTHHH , THHHH	4-H , 1-T
10	HHHTT , HHTHT , HTHHT , THHHT , HHTTH HTTHH , THTHH , TTHHH , HTHTH , THHTH	3-H , 2-T
10	כמו 2-T , 3-H רק להחליף H ב-T	2-H , 3-T
5	כמו 1-T , 4-H רק להחליף H ב-T	1-H , 4-T
1	כמו 0-T , 5-H רק להחליף H ב-T	0-H , 5-T

ב. 31.25% ג. 3.125% ד. 50%

4) $4.2\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$

5) א. $7.63\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$, כן. ב. $-7.63\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$, לא.