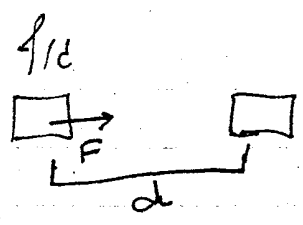


✓



עבודה / W

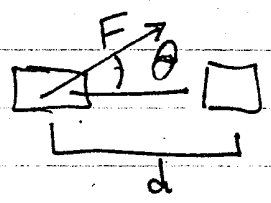
$$W = Fd$$

כאשר הכוח הוא
 כיוון התנועה
 העבודה היא מקסימלית

עבודה:

עבודה היא
 כוח קבוע

כאשר הכוח הוא
 כיוון שונה



$$W = (F \cos \theta) d = F(d \cos \theta)$$

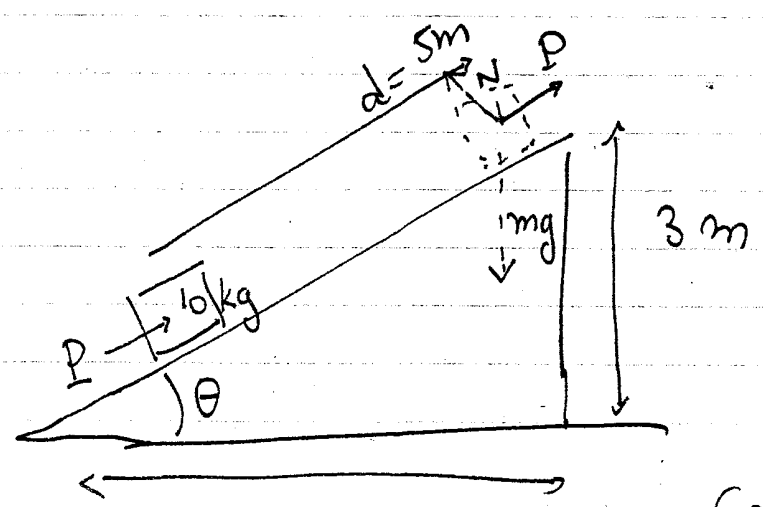
$$W = \vec{F} \cdot \vec{d}$$

או בקורה כלומר
 במקרה כזה כמות האנרגיה
 המועברת היא שונה

בתיאור כאמור עבודה יש וידיעה

ניוטון-מטר = ג'אול
 joule

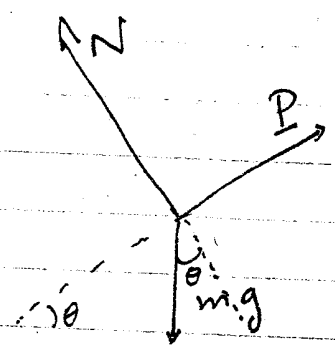
עבודה היא כמות האנרגיה המועברת
 עבודה היא כמות האנרגיה המועברת
 כמות האנרגיה המועברת



עבודה: W

כאשר הכוח הוא
 כיוון התנועה
 העבודה היא מקסימלית

עבודה



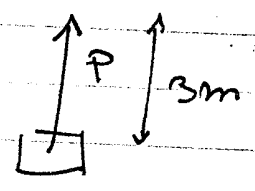
$$P - mg \sin \theta = 0$$

$$P = mg \sin \theta = 10 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/sec}^2 \cdot \frac{3}{5}$$

$$= 6 \cdot 9.8 \text{ nt} = 58.8 \text{ nt}$$

$$W = Pd = (58.8 \text{ nt}) (5.0 \text{ m}) = 294 \text{ joules}$$

למה?
 כוחות המושך והמשוך
 כוחות המושך והמשוך
 כוחות המושך והמשוך
 כוחות המושך והמשוך



כמה עבודה יעשה הכוח הזה?

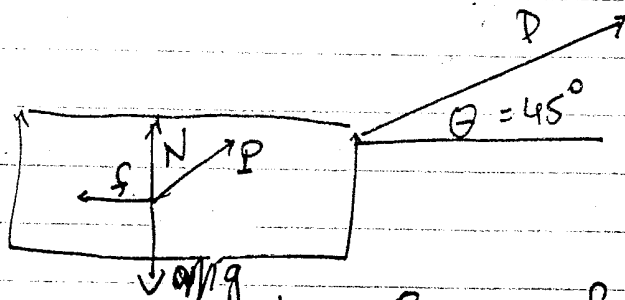
$$P = mg = 10 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/sec}^2 = 98 \text{ nt}$$

$$W = Pd = (98 \text{ nt}) (3 \text{ m}) = 294 \text{ joules}$$

כמה עבודה! (ההיא)

כוח המשיכה לא משתנה אם כוח העבודה

כוח המשיכה
 כוח המשיכה
 כוח המשיכה
 כוח המשיכה



10 kg - סתם כובד
 $\mu = 0.2$ - מקדם השחיקה

$$W = Pd \cos \theta$$

$$(1) \quad P \cos \theta - f = 0$$

$$(2) \quad P \sin \theta + N - mg = 0$$

$$(3) \quad f = \mu_k N$$

P, N, f - נעזרים עליהם

$$P \cos \theta = f = \mu_k N$$

~~$N = \frac{P \cos \theta}{\mu_k}$~~

$$P \sin \theta + \frac{P \cos \theta}{\mu_k} = mg$$

$$P = \frac{mg}{\left(\sin \theta + \frac{\cos \theta}{\mu_k} \right)} = \frac{\mu_k mg}{\mu_k \sin \theta + \cos \theta} \approx 23.1$$

$\mu_k = 0.2$

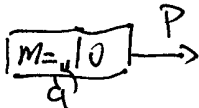
$\mu_k \sin \theta + \cos \theta$

$$W = Pd \cos \theta = 163.3 \text{ J}$$

$$= 23.1 \times 10 \times \frac{\sqrt{2}}{2}$$

הרכיב האנכי לא עושה עבודה

שאלה נוספת: (המשק) איננה בהיילוקבאציה.



מהו כמות העבודה
הנעשית במקרה כזה?

$$\mu_k = 0.2$$

$$P = f = 0.2 \times 98 = 19.6$$

$$N = mg = 98 \quad P = \mu_k N = 19.6$$

$$d = 10$$

$$W = P \cdot d = (19.6)(10) = 196$$

העבודה איננה שווה בשני המקרים!

15
נאמרת: עבודה הנעשית ע"י כוח נשקפת

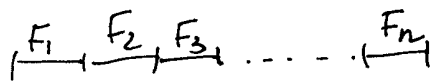
צאנו פשוטה: שני כוחות מאותו נקודת מוצא

$$W = F_1 d_1 + F_2 d_2$$

$$W = \sum_{i=1}^n F_i d_i \quad \text{הרכה כוחות}$$

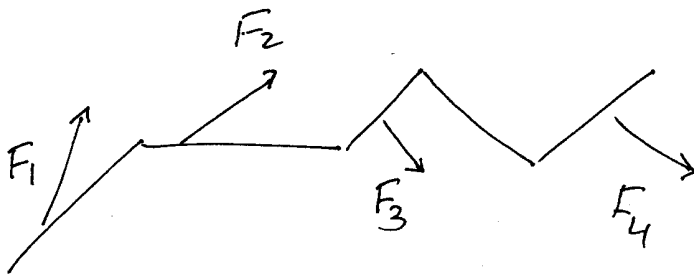
אבסורב בעבור הרכה

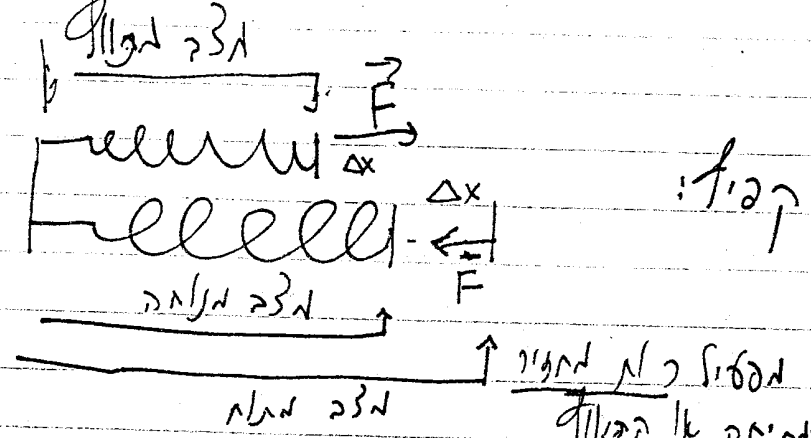
$$W = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad \text{במילומטר}$$



$$W = \int_{\vec{r}_i} \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

גאלן כלפי
במילומטר לקולומ (3, 2)





הקביל מסתיו כאל למעיו
 טאט התמיהה אל התולד
 ק'א'ק, ק'ד'ה'ה:
 א'ק ה'ו'ק

$$F = -k\Delta x$$

ק נקטא קבול הקביל א'ל'ה 33

ע'ז'א'ו'ל'ת

$$x=0 \text{ מזבב של'ה'ה'ק'ה}$$

$$F = -kx$$

ק'ק'ק' זכ'ו'ק א'כ'ס'ו'ל כ'ל ס'ל ס'ו (א'ק'ו'ל'ת ס'ל 1kg) כ'ז'י א'ל'מ'ה ק'ב'יל
 כ'כ ס'ו ס'ו

$$k \sim 100 \frac{\text{ני'ו'ל'ת}}{\text{מ'ט'ר}}$$

ק נקב'ה ע'י מ'כ'ו'ל'ת ה'ת'ר'ת א'ז'ו'ת הקב'יל

כ'כ'ה ס'ל א'ז'ו'ל ו'ת'ר הקב'יל ו'ת'ר "א'ז'ק" ק'ט'ל

ש'א'ל'ה: א'ל'ת'ר'ת קב'יל א'ל'ת'ר ה'ת'ר'ת ס'ל כ'כ ס'ק'ו'ז'ת
 ה'ק'ב'ה ז'כ'ה X מ'ט'ר א'ת'ו ה'ע'כ'ו'ז'ה ש'א'ל'ת
 ש'ל'ש'ת'ר?

$$W = \int_0^x +kx \, dx = \frac{1}{2} kx^2$$

$$F = +kx$$

כ'ז'י א'ת'ר'ת'ר א'ל ה'כ'ל'ת ה'ת'ר'ת'ר

$$\left[\frac{\text{ני'ו'ל'ת}}{\text{מ'ט'ר}} \right] \cdot \left[\text{מ'ט'ר}^2 \right] = \text{ש'א'ל'ת}$$

$$= \text{מ'ט'ר}^2$$

כעת נרוא בעבודה הנעשית בזמן שבו
שבו כל שקום $\neq 0$ על מרחק s

(קצב שקום המרחק במרחב)

לקחה טאול : כא קדוש , טאול קבוע
3NC 3dnd

$$v = v_0 + at$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$
$$= v_0 t + \frac{1}{2} \frac{v - v_0}{t} t^2$$
$$= \frac{v + v_0}{2} t$$

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad * \neq 2$$

$$x = \frac{v + v_0}{2} t$$

$$W = Fx = max =$$

$$= m \frac{v - v_0}{t} \cdot \frac{v + v_0}{2} t$$

$$= \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2)$$

הערה: מילוי קינטית

$$K = \frac{1}{2} mv^2$$

הערה: הכא הקול

$$W = K - K_0 = \Delta K$$

הערה: עבודה-אנרגיה

$$W = \int_{x_0}^x F(y) dy = \int_{x_0}^x m a(y) dy$$

$$a(y) = \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} \frac{dy}{dt} = \frac{dv}{dy} \cdot v$$

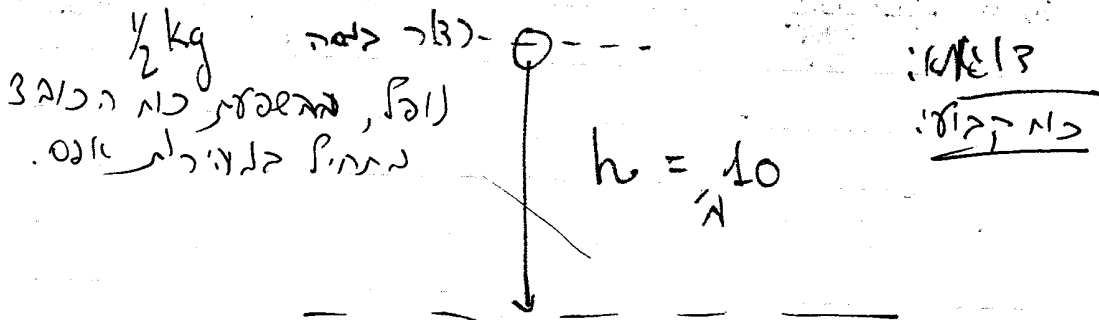
$$= \frac{1}{2} \frac{d}{dy} (v^2)$$

שקול 16

$$W = \int_{x_0}^x \frac{1}{2} m \frac{d}{dy} (v^2) dy$$

$$= \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

$$= K - K_0 = \Delta K$$



חשבון על הכדור
 כוח הכובד F

$$W = Fy \quad Fy = mgh$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = mgh = 49$$

K

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$v_0 = 0$$

1/20

עבודה ואסטר:

כיצד גרסה חצי' אף אף הארץ גובה

למי האנרגיה הקינטיק? 0.04g

למי האנרגיה האסטר? האנרגיה! (במיקום האנרגיה)

U אסטרולוג = וחס אנרגיה קינטיק
כיחס האסטר

אנרגיה פוטנציאל:

$$W = \int_{y=h}^{y=0} F(x) dx = -mgx \Big|_h^0 = +mgh$$

↑
 $F(x) = -mg$

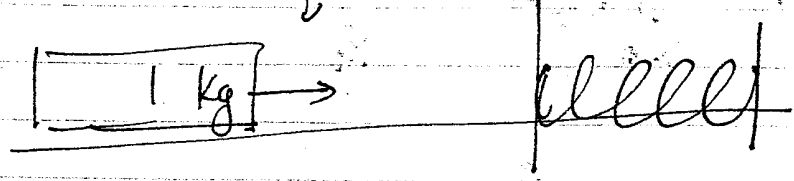
$$\Delta K = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

$$\Delta K = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 9.8 \times 10 = 49$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = mgh, \quad v = \sqrt{2gh}$$

עבודה מלאה

$$v = \frac{110}{3.6} = \frac{110}{36} \text{ m/s}$$



$$k = \frac{100 \text{ N}}{1 \text{ m}} = 100 \text{ N/m}$$

מה תהיה עבודה פשוט (אם יש) ?

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

$$W = \frac{1}{2} k x^2$$

$$\frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} m v^2$$

$$x = \sqrt{\frac{m v^2}{k}} = \sqrt{\frac{1 \cdot \left(\frac{110}{3.6}\right)^2}{100}} = \sqrt{\frac{100}{100}} = 1 \text{ m}$$

$$m = \frac{100}{3.6^2}$$

$$= 1 \text{ m}$$

ע"מ (ע"מ) פ"מ ל' א"מ

$$F(x) = -kx$$

למ"מ ← 0

$$W(d) = \int_d^0 F(x) dx = -\frac{1}{2} kx^2 \Big|_d^0 = +\frac{1}{2} kd^2 \quad x_0=0$$

$$W = \Delta K = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 = +\frac{1}{2} m v^2$$

$$v^2 = \frac{kd^2}{m}, \quad v = d \sqrt{\frac{k}{m}}$$

א"מ א"מ א"מ

$x(t), v(t), a(t)$

$$F(x) = -kx$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx$$

$$x(t) = A \cos \omega t$$

$$v(t=0) = 0$$

$$x(t=0) = A$$

$$\frac{dx}{dt} = -\omega A \sin \omega t$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

הקצב של העבודה P (ק"מ)

$$P = \frac{dW}{dt}$$

כאשר מקצב P הוא העבודה הנעשית (ק"מ) / ש"ש

$$W = P \cdot t$$

אזי צריך הספק P של כמה זמן

$$\frac{\text{זמן}}{\text{ש"ש}} = \text{Watt}$$

כח"י ואם יאמר רמת השרשרת קו"מ / ש"ש
= 1000 ש"ש

$$\text{אנרגיה} = 746 \text{ וואט} = 1 \text{ קילוואט}$$

$$W(t) = \int F(t) \cdot v(t) dt$$

$$\frac{dW}{dt} = F(t) \cdot v(t) = P(t)$$

שאלה: $P = 100$ ק"מ / ש"ש
מה האנרגיה הנעשית במהלך 30 ש"ש?
מה האנרגיה הנעשית במהלך 100 ש"ש?

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot x}{t} = F \cdot v$$

$$F = \frac{P}{v} = \frac{75000 \text{ וואט}}{25 \text{ מ"ש}} = 3000 \text{ ניוטון}$$

$$P = 100 = \frac{W}{t} \cdot \frac{3}{2} = 25$$

$$100 = 100 \cdot 75 = 75000$$

$$x(t) = A \cos \omega t$$

17/1/620 p 8

13

$$x(t=0) = A, v(t=0) = 0$$

$$A = d$$

$$x(t) = d \cos \omega t$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$v(t) = -\omega d \sin \omega t = -\sqrt{\frac{k}{m}} d \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

$$x = 0$$

2 e 6

$$\omega t = \frac{\pi}{2}$$

$$t = \frac{\pi}{2\omega}$$

$$v(t = \frac{\pi}{2\omega}) = -\sqrt{\frac{k}{m}} d \cdot 1$$

$$v^2(t = \frac{\pi}{2\omega}) = \frac{k}{m} d^2 \quad \checkmark$$

$$W = \int_d^0 F(x) dx = m \int_d^0 a(x) dx = m \int_d^0 \frac{dv}{dt} dx = m \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} \frac{dv}{dt} \frac{dx}{dt} dt$$

$$= m \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} -\frac{k}{m} d \cos \omega t \cdot -\sqrt{\frac{k}{m}} d \sin \omega t dt =$$

$$= \frac{k \sqrt{\frac{k}{m}} d^2}{m} \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} dt \sin 2\omega t = \frac{k \sqrt{\frac{k}{m}}}{m} \cdot d^2 \cdot \frac{1}{2\omega} \cos 2\omega t \Big|_0^{\frac{\pi}{2\omega}} = \frac{1}{2} k d^2 \quad \checkmark$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx = m \int_{x_1}^{x_2} \frac{dv}{dt} dx =$$

13 folio

$$= m \int_{t_1}^{t_2} \frac{dv}{dt} \frac{dx}{dt} dt = m \int_{t_1}^{t_2} a(t) v(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} F(t) v(t) dt$$

$x(t) = 3t - 3t^3$ מהירות של גוף

המהירות של הגוף היא הפונקציה $x(t)$

$x(t) = 3t - 3t^3$

$v(t) = 3 - 9t^2$

$a(t) = -18t$

$F(t) = -18t$

$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx = m \int_{v_i}^{v_f} \frac{dv}{dt} dx = m \int_{t_i=0}^{t_f=1} \frac{dv}{dt} \frac{dx}{dt} dt$

$= m \int_0^1 a(t)v(t) dt$

$m \int_0^1 (-18t) \cdot (3 - 9t^2) dt = m \int_0^1 (-54t + 162t^3) dt$

$= \left(-27t^2 + \frac{162}{4}t^4 \right) \Big|_0^1$

$= -27 + \frac{162}{4} = -27 + 40.5 = 13.5$

$v^2(1) = (3 - 9)^2 = 36$

$v^2(0) = 9$

$\frac{1}{2}(v^2(1) - v^2(0)) = \frac{27}{2} = 13.5$ ✓

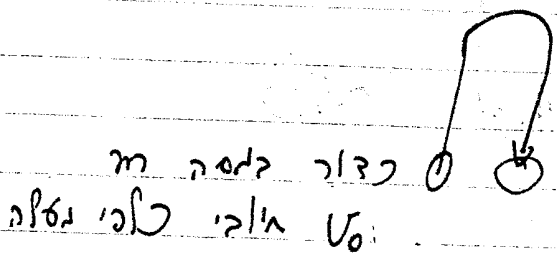
$\Delta K = W$

$W = \int_{t_i}^{t_f} \frac{dW}{dt} dt = \int_{t_i}^{t_f} F(t)v(t) dt = m \int_{t_i}^{t_f} a(t)v(t) dt$

$\frac{\Delta W}{\Delta t} = F(x) \frac{\Delta x}{\Delta t} = F(t)v(t)$

כוחות המשיכה... (1) ...

שיעור 8
 שינוי אנרגיה = עבודה = שינוי כוח על כדור הארץ

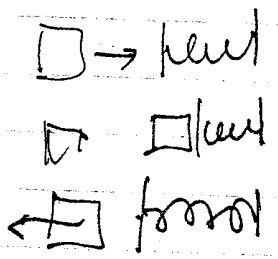


אנליזה
 $W = \Delta K$

אנליזה גאומטרית
 עבודה למיכל
 $mgh = \frac{1}{2} m v_0^2$

עבודה של כדור הארץ
 $\frac{1}{2} m v^2 = mgh$

$v = -v_0$



$K = K_0$

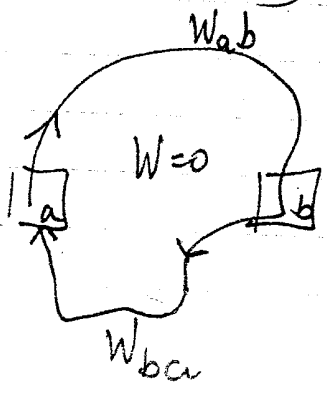
קולומב ואוסטין: עבודה המכונה אנרגיה
 כוחות שונים למעשה:



קולומב עושה עבודה: כוח חיובי

כוח המשיכה כולו כוח המשיכה
 שני צדדים שווים עובדה כוחות האות (עבודה)

העבודה האנליטית
 (2)

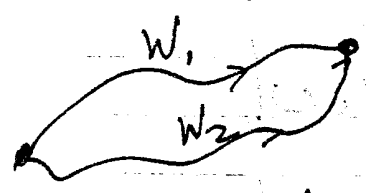


$W_{ab} = -W_{ba}$

$W_{ab} + W_{ba} = 0$

כוחות המשיכה כולו כוח המשיכה
 עובדה שני צדדים שווים עובדה כוחות האות (עבודה)
 (2)
 $W = \Delta K$

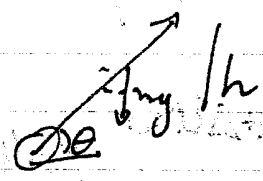
3) כוח משמך הוא כוח שהעבודה שלו
על גוף גלוי כך בקואורנט הקצה
ולא בצדק ביניהם



$$W_1 = W_2$$

$$\Rightarrow W_1 + (-W_2) = 0$$

באנליזה של צורה
היא כוחות וצורה
(צורה)



$$W_1 = mgh$$

$$W_2 = mg \sin \theta \cdot \frac{h}{\sin \theta} = mgh$$

(אם צריך את הצורה עם הנוסחה)

התוצאה המיומנת היא
הקואורנט

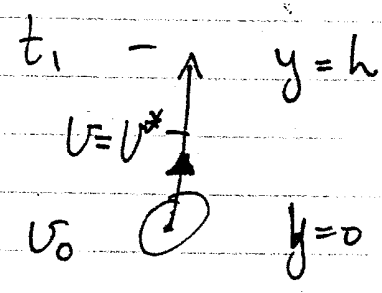
$$W = 0 \text{ בנסוף סגור}$$

$$\Delta \neq 0 \text{ בנסוף פתוח}$$

אנרגיה פוטנציאלית
 : נתון (הגובה) כאשר
 צוים בכלומר להמרות.

אנרגיה פוטנציאלית

הכבוד הנצרך



$$t=0 \quad K = \frac{1}{2} m v_0^2$$

$$t=t_1 \quad v=0 \quad K = 0$$

$$U = +mgh$$

סלק יחזוק החזרה

אנרגיה פוטנציאלית

או אלו פאק אנרגיה

קוטר רבנו דהמרת

$$mgh = \frac{1}{2} m v_0^2$$

$$U = mgy$$

$$\boxed{\Delta K + \Delta U = 0}$$

כ"ן
 כאלו הכלומר
 להמרות

$$v = v^* \quad y = y^*$$

$$\frac{1}{2} m (v^*)^2 + mgy^* = \frac{1}{2} m v_0^2$$

אנרגיה פוטנציאלית - אנרגיה הקינטיקה
 הנתונה

ציון נוסף: קבוע עם אלו

→ $\int u \, dx$

$\int u \, dx$

← $\int u \, dx$

מקב המערכת לשלז (u) - ג/כיה
בא/כיה - א/כיה בקיה

$\Delta K + \Delta U = 0$: כאלו הלי . לולאר מולק

$\Delta K = W$

$\Delta U = -W$: כאלו הלי . לולאר מולק

כאלו הלי . לולאר מולק

כאלו הלי . לולאר מולק

כאלו הלי . לולאר מולק

כאלו הלי . לולאר מולק

כאלו הלי . לולאר מולק



כאשר $\Delta K + \Delta U = 0$ משתדלים באותו כיוון

(*) $K + U = \text{קבוע}$

ציון חשוב באנליזה מס' (3) למעלה

$$W = \Delta K = -\Delta U$$
 ↑
 עבודה שבוצעה על ידי

$$\Delta K + \Delta U = 0$$
 כיוון זה

$$\Delta U = -W = -\int_{x_0}^x F(x) dx$$
 (בגודל)

$F(x)$ כוח משתנה

(!) $\Delta U = \Delta U(x)$ $\Rightarrow U = U(x_0) + \Delta U(x)$
 כלל אינטגרציה $F(x) = -\frac{\partial U(x)}{\partial x}$

(*) $\Rightarrow \frac{1}{2} m v^2 + U(x) = E$
 אנרגיה
 מכאנית
 קבועה

$$\frac{1}{2} m v^2 + U(x) = \frac{1}{2} m v_0^2 + U(x_0)$$

↑
 כלל אינטגרציה
 (כוח כפול למשתנים)
 משתנה

אנרגיה בהשפעת כבידה

למשל:

$$U(y) = - \int_0^y F(y) dy + U(0)$$

$$F(y) = -mg \Rightarrow \int_0^y mg dy = mgy$$

$$U(0) = 0$$

$$\frac{1}{2} m v^2 + mgy = \frac{1}{2} m v_0^2 + U(0)$$

K

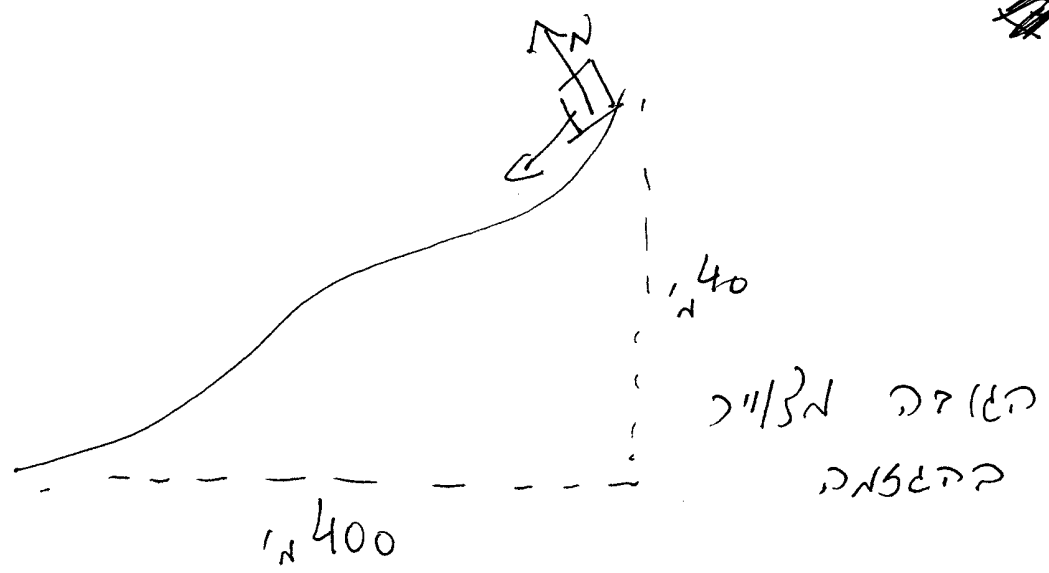
$$\frac{1}{2} m v_1^2 + mgy_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 + mgy_2$$

צדקה:

אנרגיה של סף במרכז הכ

אנרגיה של סף במרכז הכ

המשקל אפס!



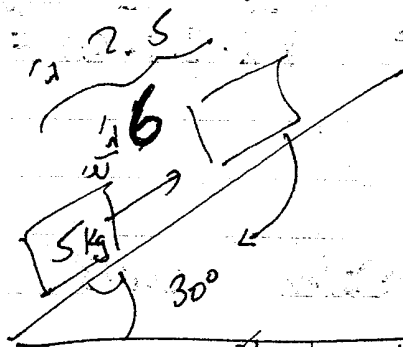
מה תהיה ה... האנרגיה האנליטית יוצר בתחתית ההר?

~~$$\frac{1}{2} m v_1^2 + m g y_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 + m g y_2$$~~

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 40} = 28 \approx 27.7$$

ככה זה צריך להשתקף!

אם כן תוכלו להשתמש באנרגיה האנליטית.



מה עבודה של הכובד?
 מה עבודה של הכוח הנורמלי?
 מה עבודה של הכוח המשיך?

עבודה של $E = K + U = mgh = 5 \cdot 9.8 \cdot 2.5 \sin 30 =$
 '116.125
 K+U 61.25

עבודה של $E = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 36 = 90$
 '116.125

$90 - 61.25 = W_f = f \cdot d = f \cdot 2.5$
 $= 29.75$

$\frac{29.75}{2.5} = 11.9$

עבודה של $E = \text{עבודה של } E - W_f = 61.25 - 29.75 = 31.5$
 '116.125

~~$E = \frac{1}{2} m v^2$~~ = 31.5

$v^2 = \frac{31.5}{2.5} = 12.6$

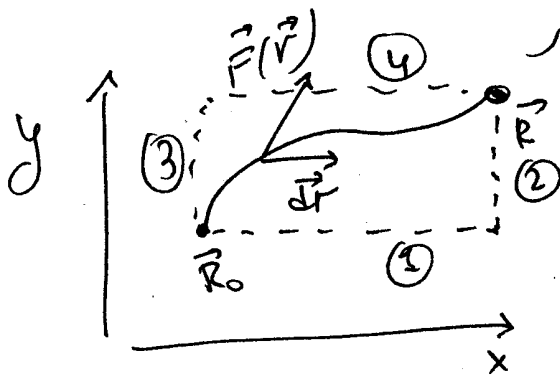
$v \approx 3.5$

לחלקה בנסתרים $\int \vec{F} \cdot d\vec{r}$ ≥ 2 ! 3

$$\Delta U = - \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \quad U = U(\vec{R})$$

כאן \vec{F}

$$= - \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}} F_x(\vec{r}) dx - \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}} F_y(\vec{r}) dy - \int_{\vec{R}_0}^{\vec{R}} F_z(\vec{r}) dz$$



לחלקה בנסתרים - 13

$$\vec{R}_0 = (x_0, y_0)$$

$$\Delta u = - \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} F_x(x, y) dx - \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} F_y(x, y) dy$$

$$= - \int_{x_0}^x F_x(x, y_0) dx - \int_{y_0}^y F_y(y, x) dy$$

$$= - \int_{y_0}^{y_0} F_y(x_0, y) dy - \int_{x_0}^x F_x(x, y) dx$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + U(x, y, z)$$

דבורא - חוק שימור אנרגיה מכנית.

$$U = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{F}(\vec{r}') \cdot d\vec{r}'$$

לגבי חוקי

$$\vec{F}(\vec{r}) = -\hat{i} \frac{\partial U}{\partial x} - \hat{j} \frac{\partial U}{\partial y} - \hat{k} \frac{\partial U}{\partial z}$$

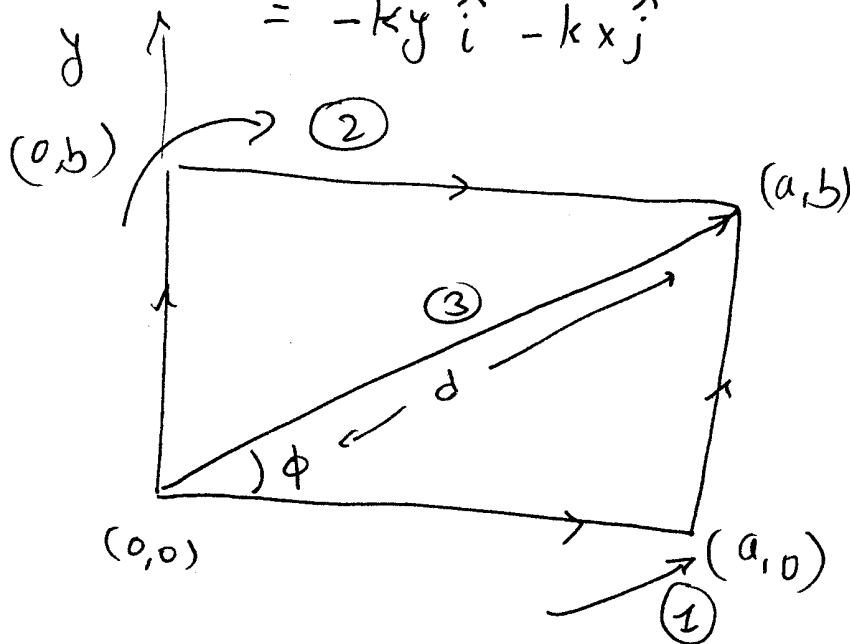
$$= - \vec{\nabla} U(\vec{r})$$

פוטנציאל

$$F(x,y) = F_x \hat{i} + F_y \hat{j}$$

$$= -ky \hat{i} - kx \hat{j}$$

$$k > 0$$



ההתאמה של \vec{F} היא כח k וקטור \vec{r} הוא וקטור המצבי מראשית הצירים לנקודה (x,y) .

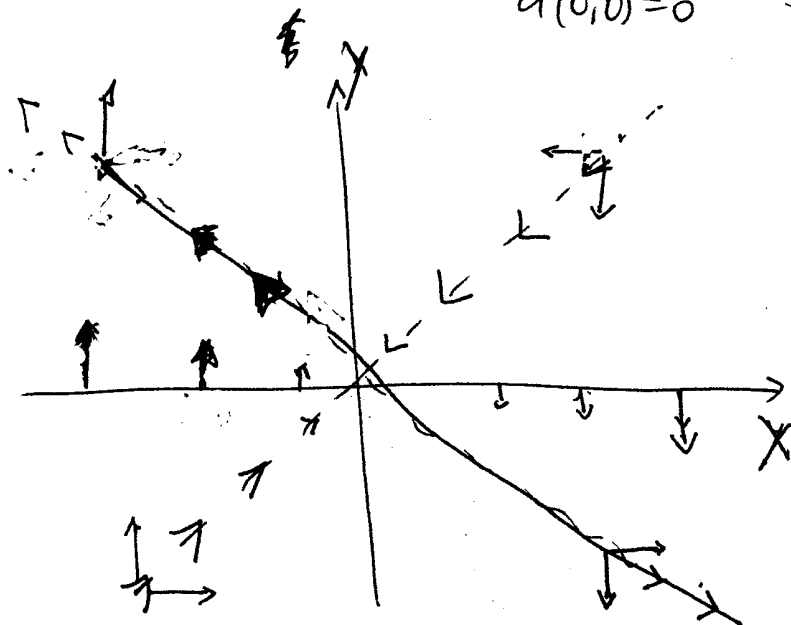
כלומר $\vec{F} = -k\vec{r}$

הפוטנציאל $U(x,y)$ (ההתאמה של \vec{F})

הוא

$$U(0,0) = 0$$

כי $\vec{F} = -\nabla U$



$$W = \int_{\vec{r}_i}^{\vec{r}_f} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

$$U = - \int_{\vec{r}_i}^{\vec{r}_f} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

$$\vec{F}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r})$$

①

$$W = \int_{(0,0)}^{(a,b)} \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_0^a F_x(x,0) dx + \int_0^b F_y(a,y) dy$$

$$= 0 + \int_0^b (-ka) dy = -kab$$

$$F_x = -ky$$

$$F_y = -kx$$

②

$$W = \int_0^b F_y(0,y) dy + \int_0^a F_x(x,b) dx$$

$$= 0 + \int_0^a (-kb) \cdot dx = -kb \cdot a$$

③

$$x = r \cos \phi, \quad y = r \sin \phi \quad r, \phi$$

$$dx = \cos \phi dr, \quad dy = \sin \phi dr \quad d = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$W = \int_0^d [-k(r \sin \phi) dr \cos \phi - k(r \cos \phi) (dr \sin \phi)]$$

$$= -2k \sin \phi \cos \phi \int_0^d r dr = -k d^2 \sin \phi \cos \phi = -kab \checkmark$$

$$\Delta U = -W$$

$$\Delta U^{(a,b)} = U(a,b) - U(0,0) = kab$$

$$U(x,y) = kxy$$

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}U$$

$$F_x = -\frac{\partial}{\partial x} U(x,y) = -ky \quad \checkmark$$

$$F_y = -\frac{\partial}{\partial y} U(x,y) = -kx \quad \checkmark$$