עבודה ואנרגיה

אינסוף
פיזיקה • מכניקה

קובץ הסבר • עבודה, אנרגיה קינטית ופוטנציאלית, שימור אנרגיה, חיכוך והספק

כיתה י״א | 5 יח״ל | מכינה קדם־אקדמית

מה תמצאו כאן?
בנושא 2 פתרנו כל בעיה בעזרת כוחות ותאוצה. כאן נלמד דרך שנייה, ולפעמים קצרה בהרבה: **חשבון של אנרגיה**. נגדיר עבודה, אנרגיה קינטית ואנרגיה פוטנציאלית, נשתמש בשימור האנרגיה, ונראה מה החיכוך ״לוקח״ ומה מנוע ״נותן״. שני עמודי ״מקרים״ מרכזים 36 מצבים: 18 מעברי אנרגיה (עם עמודות אנרגיה), ו־18 מקרים של עבודה. אחרי הקובץ הזה מחכה לכם קובץ של 15 תרגילים באותו נושא.

מה כדאי לדעת קודם? חוקי ניוטון ותרשים כוחות (נושא 2), נוסחאות התנועה בתאוצה קבועה (נושא 1), ושטח של משולש ושל טרפז.

עמודות האנרגיה: קינטית E_k · כובדית U_g · אלסטית U_{el} · פנימית (חום)

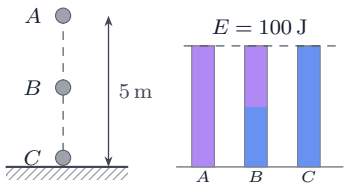
1 הרעיון הגדול: אנרגיה היא מטבע

בגובה העיניים

חשבו על אנרגיה כמו על כסף בכמה ״חשבונות״. חשבון אחד הוא אנרגיית התנועה (קינטית). חשבון שני הוא אנרגיית הגובה (פוטנציאלית כובדית). יש גם אנרגיה שאגורה בקפיץ מתוח, ואנרגיה ״פנימית״ שהחיכוך מייצר כשהמשטחים מתחממים. כסף יכול לעבור מחשבון לחשבון, אבל הסכום הכולל לא נעלם. כוח שפועל על גוף ״מפקיד״ אנרגיה או ״מושך״ אנרגיה, וזה מה שנקרא **עבודה**.

דוגמה קטנה. כדור שמסתו $2\,\mathrm{kg}$ נופל ממנוחה מגובה $5\,\mathrm{m}$. למעלה יש לו אנרגיה כובדית $mgh = 2\cdot 10\cdot 5 = 100\,\mathrm{J}$ ואין לו אנרגיה קינטית. באמצע הדרך החצי הפך לאנרגיה קינטית. בקרקע כל 100 הג׳ול הם אנרגיה קינטית:

$$\tfrac{1}{2}\cdot 2\cdot v^2 = 100 \quad\Longrightarrow\quad v = 10\,\mathrm{m/s}.$$



עמודות אנרגיה: סגול — כובדית, כחול — קינטית. הגובה הכולל לא משתנה.

לא היינו צריכים לדעת כמה זמן נמשכה הנפילה! זה היתרון הגדול של אנרגיה: **כשהזמן לא נתון ולא מבוקש, חשבו על אנרגיה.**

בדקו את עצמכם

שני כדורים נזרקים מאותו גג באותה מהירות: אחד אנכית למעלה ואחד אופקית. למי מהם תהיה מהירות גדולה יותר כשיגיע לקרקע? הזניחו את התנגדות האוויר. (התשובות לכל תיבות ״בדקו את עצמכם״ נמצאות בסוף הקובץ.)

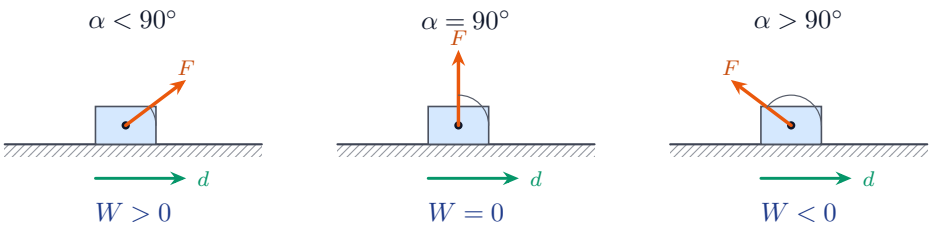
2 עבודה של כוח קבוע

עבודה

$$W = F\,d\,\cos\alpha$$

F הוא גודל הכוח, d הוא גודל ההעתק של הגוף, ו־α היא הזווית בין הכוח להעתק. העבודה היא **סקלר** (מספר עם סימן, בלי כיוון). היחידה היא ג׳ול: $1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$.

© אור בן שטרית · אינסוף



- **עבודה חיובית** (הכוח "עוזר" לתנועה): הכוח מוסיף לגוף אנרגיה.
- **עבודה שלילית** (הכוח "מפריע" לתנועה): הכוח לוקח מהגוף אנרגיה. חיכוך קינטי עושה כמעט תמיד עבודה שלילית: $W_f = -f\,d$.
- **עבודה אפס**: כוח שניצב לתנועה, למשל הכוח הנורמלי של רצפה אופקית, לא מוסיף ולא לוקח אנרגיה.

דוגמה פתורה

מושכים מזוודה שמסתה $20\,\text{kg}$, שנמצאת במנוחה, לאורך $10\,\text{m}$ על רצפה אופקית. הכוח $F = 50\,\text{N}$ מכוון $37°$ מעל האופק, וכוח החיכוך הקינטי הוא $30\,\text{N}$.

- הכוח המושך: $W_F = 50 \cdot 10 \cdot \cos 37° = 400\,\text{J}$.
- החיכוך: $W_f = 30 \cdot 10 \cdot \cos 180° = -300\,\text{J}$.
- המשקל והכוח הנורמלי ניצבים לתנועה: $W_{mg} = W_N = 0$.
- העבודה הכוללת: $400 - 300 = 100\,\text{J}$. נראה בפרק 4 שזה בדיוק השינוי באנרגיה הקינטית של המזוודה.

טעות נפוצה

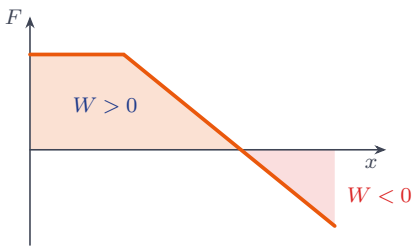
"סבל שנושא ארגז כבד במהירות קבועה לאורך מסדרון ישר עושה עבודה רבה." בשפת היום־יום כן, אבל בפיזיקה העבודה שהידיים שלו עושות על הארגז היא אפס: הכוח שהוא מפעיל על הארגז אנכי, והתנועה אופקית. **עבודה בפיזיקה היא מעבר של אנרגיה, לא מאמץ.**

בדקו את עצמכם

מרימים ספר שמסתו $1.5\,\text{kg}$ במהירות קבועה לגובה של $2\,\text{m}$. מהי העבודה של היד? של המשקל? של הכוח השקול?

3 עבודה של כוח משתנה: שטח מתחת לגרף

כשהכוח משתנה לאורך הדרך, אי אפשר להציב בנוסחה אחת. במקום זה מסרטטים את הכוח (הרכיב בכיוון התנועה) כפונקציה של המקום, והעבודה היא **השטח שבין הגרף לציר המקום**. שטח מעל הציר הוא עבודה חיובית, ושטח מתחת לציר הוא עבודה שלילית (כשהגוף נע בכיוון החיובי).



- **כוח קבוע:** השטח הוא מלבן, $W = F\,\Delta x$, כמו בפרק הקודם.
- **קפיץ:** הכוח שמותח את הקפיץ, $F = kx$, גדל באופן קווי, והשטח הוא משולש:

$$W = \tfrac{1}{2}kx^2.$$

כוח הקפיץ עצמו מכוון הפוך, ולכן העבודה שלו היא $-\frac{1}{2}kx^2$.

- **דוגמה:** קפיץ עם $k = 200\,\text{N/m}$. כדי למתוח אותו מ־0 עד $10\,\text{cm}$ צריך $\frac{1}{2} \cdot 200 \cdot 0.1^2 = 1\,\text{J}$. כדי למתוח אותו מ־$10\,\text{cm}$ עד $20\,\text{cm}$ צריך $\frac{1}{2} \cdot 200 \cdot (0.2^2 - 0.1^2) = 3\,\text{J}$ — פי 3, כי הקפיץ כבר מושך חזק יותר.

מכינה בשפה של חשבון אינטגרלי: $W = \int_{x_1}^{x_2} F(x)\,dx$. השטח מתחת לגרף הוא בדיוק האינטגרל.

© אור בן שטרית · אינסוף

4 אנרגיה קינטית ומשפט עבודה–אנרגיה

משפט עבודה–אנרגיה

$$E_k = \tfrac{1}{2}mv^2 \qquad \Sigma W = \Delta E_k = \tfrac{1}{2}mv^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2$$

העבודה הכוללת של כל הכוחות שפועלים על הגוף שווה לשינוי באנרגיה הקינטית שלו.

למה זה נכון? בכוח שקול קבוע F, החוק השני נותן $a = \frac{F}{m}$, ומנושא 1 ידוע ש־$v^2 = v_0^2 + 2ad$. כופלים ב־$\frac{m}{2}$ ומקבלים $F\,d = \tfrac{1}{2}mv^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2$. השמאל הוא העבודה של הכוח השקול, והימין הוא השינוי באנרגיה הקינטית. בדוגמת המזוודה: $100\,\mathrm{J}$ של עבודה כוללת הם $100\,\mathrm{J}$ של אנרגיה קינטית, ולכן המזוודה, שיצאה ממנוחה, נעה בסוף ב־$\sqrt{2\cdot 100/20} \approx 3.2\,\mathrm{m/s}$.

בגובה העיניים

האנרגיה הקינטית גדלה עם ריבוע המהירות. מכונית במהירות כפולה צריכה דרך בלימה ארוכה פי 4. בבלימה עם גלגלים נעולים, החיכוך μmg עושה עבודה שלילית עד שכל האנרגיה הקינטית נגמרת: $\mu mg\,d = \tfrac{1}{2}mv^2$, ולכן $d = \dfrac{v^2}{2\mu g}$. עם $\mu = 0.7$:

מהירות $(\mathrm{km/h})$	30	50	70	90	110
דרך בלימה (m)	5.0	13.8	27.0	44.6	66.7

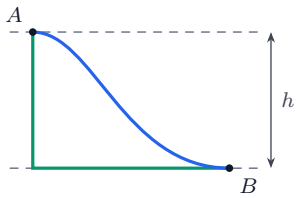
בדקו את עצמכם

מהירות של רוכב אופניים גדלה פי 3. פי כמה גדלה האנרגיה הקינטית שלו?

5 אנרגיה פוטנציאלית

יש כוחות שהעבודה שלהם תלויה רק בנקודת ההתחלה ובנקודת הסיום, ולא במסלול שבו הגוף עבר. כוחות כאלה נקראים **כוחות משמרים**. כוח הכובד וכוח הקפיץ הם משמרים. חיכוך אינו משמר: במסלול ארוך יותר הוא לוקח יותר אנרגיה.

לכל כוח משמר מגדירים **אנרגיה פוטנציאלית** U, "אנרגיה של מקום", כך שהעבודה של הכוח שווה לירידה באנרגיה הזו: $W = -\Delta U$.



בשני המסלולים $W_g = mgh$

נוסחאות

- **כובדית:** $U_g = mgh$, כאשר h הוא הגובה מעל רמת אפס שבוחרים. רק הפרשי גובה משנים, ולכן את רמת האפס בוחרים בנוחות, בדרך כלל בנקודה הנמוכה ביותר.
- **אלסטית:** $U_{el} = \tfrac{1}{2}kx^2$, כאשר x הוא השינוי באורך הקפיץ ביחס לאורכו הרפוי. היא חיובית גם במתיחה וגם בכיווץ.

טעות נפוצה

שתי טעויות קלאסיות: (1) מודדים את h לאורך המדרון. **לא:** h הוא תמיד הפרש הגובה האנכי. (2) כותבים $U = mgh$ גם לקפיץ. לקפיץ יש ביטוי אחר, $\tfrac{1}{2}kx^2$, ו־x נמדד מהאורך הרפוי, לא מהקרקע.

© אור בן שטרית · אינסוף

6 שימור אנרגיה מכנית

שימור האנרגיה המכנית

האנרגיה המכנית היא $E = E_k + U_g + U_{el}$. אם רק כוחות משמרים עושים עבודה (כוחות כמו הכוח הנורמלי של משטח נייח, או מתיחות של חוט שקשור לנקודה קבועה, ניצבים לתנועה ולא עושים עבודה), האנרגיה המכנית נשמרת:

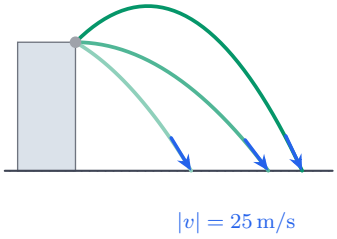
$$E_k^A + U^A = E_k^B + U^B$$

השיטה בחמישה צעדים:

1. בוחרים שני מצבים, A ו־B: אחד שבו הכול ידוע, ואחד שבו נמצא הנעלם.
2. בודקים אילו כוחות עושים עבודה. רק כובד וקפיצים? אפשר להשתמש בשימור. יש חיכוך? עוברים לפרק 7.
3. בוחרים רמת אפס לגובה (בדרך כלל הנקודה הנמוכה ביותר).
4. כותבים $E_A = E_B$, איבר אחרי איבר: קינטית, כובדית, אלסטית.
5. פותרים. המסה מצטמצמת לעתים קרובות, וזה סימן טוב.

דוגמה פתורה

כדור נזרק מגג בגובה $20\,\mathrm{m}$ במהירות $15\,\mathrm{m/s}$. באיזו מהירות יפגע בקרקע? (בלי התנגדות אוויר.)



$$\tfrac{1}{2}mv_0^2 + mgh = \tfrac{1}{2}mv^2 \quad\Longrightarrow\quad v^2 = 15^2 + 2\cdot 10\cdot 20 = 625$$

ולכן $v = 25\,\mathrm{m/s}$. התשובה **לא תלויה בכיוון הזריקה**: כלפי מעלה, אופקית או בזווית כלפי מטה — כל שלושת הכדורים פוגעים בקרקע ב־$25\,\mathrm{m/s}$, בכיוונים שונים ובזמנים שונים. חישוב עם קינמטיקה היה דורש פירוק לרכיבים וחישוב של כל רכיב בנפרד.

בדקו את עצמכם

גוף מחליק ממנוחה במורד מגלשה חלקה מגובה $1.8\,\mathrm{m}$. מה מהירותו בתחתית? האם התשובה תלויה בצורת המגלשה?

7 כשיש חיכוך: עבודה של כוחות לא משמרים

בגובה העיניים

חיכוך לא "מעלים" אנרגיה. הוא הופך אנרגיה מכנית ל**אנרגיה פנימית**: המשטחים מתחממים קצת. לכן האנרגיה הכוללת תמיד נשמרת, אבל האנרגיה המכנית קטנה. מנוע, יד שדוחפת או חבל שמושכים בו עושים את ההפך: הם מוסיפים אנרגיה מכנית מבחוץ.

מאזן אנרגיה עם כוחות לא משמרים

$$E_B = E_A + W_{nc} \qquad W_f = -f_k\, s$$

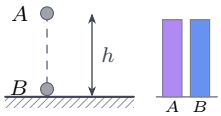
W_{nc} היא העבודה של הכוחות הלא משמרים: חיכוך (שלילית), יד או מנוע (חיובית בדרך כלל). בעבודת החיכוך s היא **הדרך** שהגוף עבר, לא ההעתק: בתנועה הלוך וחזור מחברים את כל הקטעים.

© אור בן שטרית · אינסוף

מקרים מעברי אנרגיה — 18 מקרים

בעמודות: קינטית כובדית (אפס בנקודה הנמוכה) אלסטית פנימית (חום). גובה שווה — האנרגיה נשמרת.

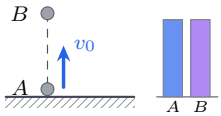
1 נפילה חופשית



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

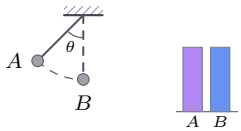
$v = \sqrt{2gh}$

2 זריקה אנכית למעלה



$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgH \quad \Rightarrow \quad H = \frac{v_0^2}{2g}$

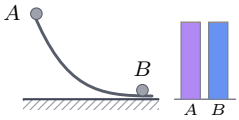
3 מטוטלת



$mgL(1-\cos\theta) = \frac{1}{2}mv^2$

L — אורך החוט

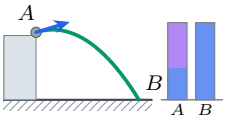
4 מגלשה חלקה



$v = \sqrt{2gh}$

לא תלוי בצורת המגלשה

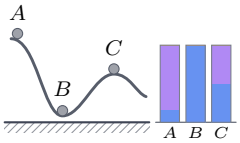
5 זריקה מגג



$v^2 = v_0^2 + 2gh$

לא תלוי בכיוון הזריקה

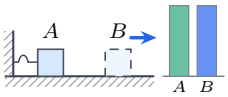
6 רכבת הרים חלקה



$E_A = E_B = E_C$

גובה קובע מהירות, בכל נקודה

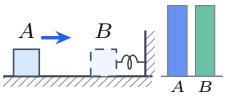
7 קפיץ משגר גוף



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

משטח חלק

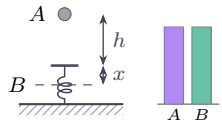
8 גוף נעצר על קפיץ



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

ב־B הגוף נעצר לרגע

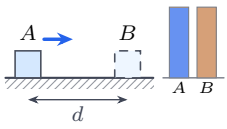
9 כדור נופל על קפיץ



$mg(h+x) = \frac{1}{2}kx^2$

הכדור יורד $h+x$ עד הכיווץ המרבי

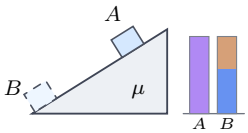
10 בלימה על משטח מחוספס



$\frac{1}{2}mv^2 = \mu mg\, d$

כל האנרגיה הקינטית הופכת לחום

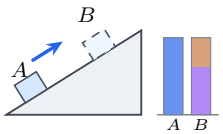
11 החלקה במדרון מחוספס



$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \mu mg\cos\theta\, L$

L — אורך המדרון

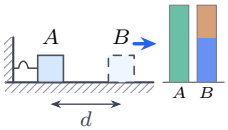
12 נזרק במעלה מדרון מחוספס



$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh + \mu mg\cos\theta\, L$

ב־B הגוף נעצר לרגע

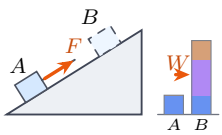
13 קפיץ על משטח מחוספס



$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \mu mg\, d$

d — הדרך מהמצב המכווץ

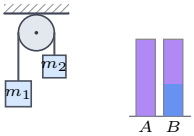
14 גוררים במעלה מדרון, v קבועה



$W_F = mgh + \mu mg\cos\theta\, L$

העבודה W מוסיפה U_g וחום; E_k קבועה

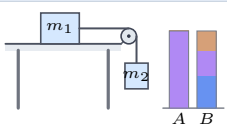
15 מכונת אטוד (שני הגופים)



$(m_1 - m_2)gh = \frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2$

מתחילים ממנוחה; h — הדרך של כל גוף

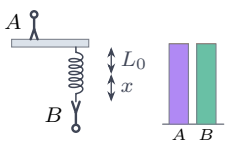
16 שולחן ומשקולת, עם חיכוך



$m_2gh = \frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2 + \mu m_1 gh$

מתחילים ממנוחה; h — הדרך של כל גוף

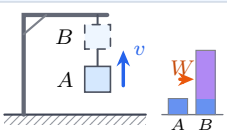
17 קפיצת באנג'י



$mg(L_0+x) = \frac{1}{2}kx^2$

L_0 — האורך הרפוי של החבל

18 מנוף מרים במהירות קבועה



$P = mgv$

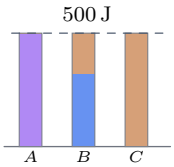
כל העבודה של המנוע הופכת ל־U_g

© אור בן שטרית · אינסוף

דוגמה פתורה

מזחלת שמסתה $10\,\text{kg}$ מחליקה ממנוחה מראש גבעה בגובה $5\,\text{m}$ (A), ומגיעה לתחתית (B) במהירות $8\,\text{m/s}$.

- ב־A: $E = mgh = 500\,\text{J}$. ב־B: $E = \frac{1}{2}\cdot 10\cdot 8^2 = 320\,\text{J}$. החיכוך הפך $180\,\text{J}$ לאנרגיה פנימית.
- בהמשך היא נעה על שלג אופקי עם $\mu_k = 0.2$. כל $320\,\text{J}$ הנותרים הולכים לחיכוך: $0.2\cdot 100\cdot d = 320$, ולכן היא נעצרת (C) אחרי $d = 16\,\text{m}$.



הגובה הכולל קבוע, אבל החלק הכתום־חום (חום) גדל.

טיפ

הלוך וחזור על משטח מחוספס. גוף שנע על מסלול שחלק ממנו מחוספס ואופקי מאבד בקטע הזה, בכל מעבר, את אותה כמות אנרגיה: $\mu_k mg\,L$. כדי לדעת איפה הוא ייעצר בסוף, בוחרים את רמת האפס של הגובה בקטע המחוספס, מחלקים את כל האנרגיה המכנית ההתחלתית ב־$\mu_k mg$, ומקבלים את הדרך הכוללת שיעבור על הקטע המחוספס.

בדקו את עצמכם

כדור נופל מגובה $2\,\text{m}$ וקופץ בחזרה לגובה $1.5\,\text{m}$. איזה חלק מהאנרגיה המכנית שלו הפך לאנרגיה פנימית במגע עם הרצפה?

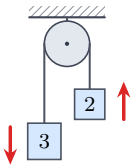
8 אנרגיה של מערכת גופים

במערכת של כמה גופים כותבים את האנרגיה של **כל המערכת**: סכום האנרגיות הקינטיות והפוטנציאליות של כל הגופים. חוט מתוח שאינו נמתח מושך גוף אחד "קדימה" וגוף אחר "אחורה" באותה מתיחות ובאותה דרך, ולכן **העבודה הכוללת שלו על המערכת היא אפס**. לא צריך לחשב את המתיחות כדי למצוא מהירויות!

דוגמה פתורה

במכונת אטווד (חוט וגלגלת אידיאליים) תלויות מסות של $3\,\text{kg}$ ושל $2\,\text{kg}$. משחררים ממנוחה. מה המהירות אחרי שכל גוף עבר $1\,\text{m}$?

- האנרגיה הכובדית של המערכת ירדה: הגוף הכבד ירד $1\,\text{m}$ והקל עלה $1\,\text{m}$, ולכן $\Delta U = -(3-2)\cdot 10\cdot 1 = -10\,\text{J}$.
- כל העשרה ג'ול הם אנרגיה קינטית של שני הגופים: $\frac{1}{2}(3+2)v^2 = 10$, ולכן $v = 2\,\text{m/s}$.
- בדיקה עם דינמיקה: $a = \frac{3-2}{5}\cdot 10 = 2\,\text{m/s}^2$, ו־$v^2 = 2\cdot 2\cdot 1 = 4$. אותה תשובה.



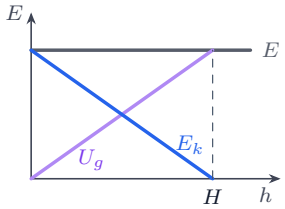
טעות נפוצה

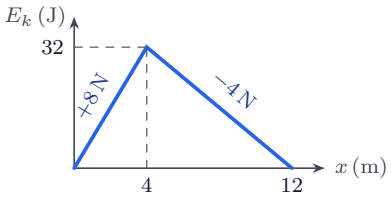
במערכת שוכחים את האנרגיה הקינטית של אחד הגופים, או מציבים את מסת הגוף הנופל בלבד. בדוגמה למעלה, $\frac{1}{2}\cdot 3\cdot v^2 = 10$ היה נותן מהירות שגויה של $2.58\,\text{m/s}$.

9 גרפים של אנרגיה

אנרגיה כפונקציה של גובה. בזריקה אנכית בלי התנגדות אוויר, $U_g = mgh$ עולה בקו ישר עם הגובה, E קבועה, ו־$E_k = E - mgh$ יורדת בקו ישר. הגובה המרבי H הוא המקום שבו $E_k = 0$, כלומר שבו הקו של U_g פוגש את הקו של E.

אנרגיה קינטית כפונקציה של מקום. ממשפט עבודה–אנרגיה, $\Delta E_k = F_{net}\,\Delta x$. לכן **השיפוע של גרף $E_k(x)$ הוא הכוח השקול** (הרכיב שלו בכיוון ציר x). בגרף התחתון דוחפים ארגז ב־$12\,\text{N}$ נגד חיכוך של $4\,\text{N}$ (שיפוע $+8\,\text{N}$), ובמקום $x = 4\,\text{m}$ מפסיקים לדחוף (שיפוע $-4\,\text{N}$). הארגז נעצר ב־$x = 12\,\text{m}$.





בדקו את עצמכם

בגרף התחתון מסת הארגז היא $4\,\text{kg}$. מה מהירותו במקום $x = 4\,\text{m}$?

10 הספק ונצילות

הספק

$$P = \frac{W}{t} \qquad P = F\,v \qquad \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

הספק הוא קצב העבודה: כמה ג׳ול בכל שנייה. היחידה היא ואט, $1\,\text{W} = 1\,\text{J/s}$. הנוסחה $P = F\,v$ נותנת את ההספק **ברגע מסוים**, כשהכוח בכיוון המהירות. **נצילות** η אומרת איזה חלק מההספק שנכנס למנוע יוצא כעבודה מועילה. השאר הופך לאנרגיה פנימית (המנוע מתחמם).

יחידה	ערך
קילוואט (kW)	$1000\,\text{W}$
כוח־סוס (hp), יחידה מקובלת למנועים	$\approx 746\,\text{W}$
קילוואט־שעה (kWh), יחידה של אנרגיה בחשבון החשמל	$1000 \cdot 3600 = 3.6 \cdot 10^6\,\text{J}$

דוגמה פתורה

מעלית שמסתה (עם הנוסעים) $800\,\text{kg}$ עולה במהירות קבועה $30\,\text{m}$ תוך $20\,\text{s}$.

- העבודה המועילה: $mgh = 800 \cdot 10 \cdot 30 = 240\,000\,\text{J}$, וההספק המועיל: $\frac{240\,000}{20} = 12\,000\,\text{W} = 12\,\text{kW}$. אפשר גם כך: $P = Fv = 8000 \cdot 1.5 = 12\,\text{kW}$.
- נצילות המנוע 80%, ולכן הוא צורך $\frac{12}{0.8} = 15\,\text{kW}$.
- בכל נסיעה הוא צורך $15\,\text{kW} \cdot 20\,\text{s} = 300\,\text{kJ}$, כלומר $\frac{300\,000}{3.6 \cdot 10^6} \approx 0.083\,\text{kWh}$.

טיפ

למה מכונית מאיצה פחות במהירות גבוהה? מנוע בהספק מרבי P יכול לדחוף בכוח $F = \frac{P}{v}$ בלבד. ככל שהמהירות גדלה, הכוח קטן, ולכן גם התאוצה. המהירות המרבית מתקבלת כשהכוח הזה שווה לכוחות ההתנגדות: $v_{\max} = \frac{P}{f}$. למשל, מכונית שנוסעת במהירות קבועה של $25\,\text{m/s}$ נגד התנגדות של $800\,\text{N}$ צריכה מהמנוע הספק של $800 \cdot 25 = 20\,000\,\text{W} = 20\,\text{kW}$.

בדקו את עצמכם

מנוע מרים משקולת של $50\,\text{kg}$ במהירות קבועה לגובה $6\,\text{m}$ תוך $4\,\text{s}$. מה ההספק המועיל שלו?

11 כוח ואנרגיה פוטנציאלית

מכינה לכוח משמר יש קשר ישיר לאנרגיה הפוטנציאלית שלו:

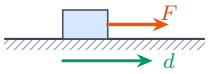
$$F(x) = -\frac{dU}{dx}.$$

הכוח מכוון תמיד **לעבר ירידה** באנרגיה הפוטנציאלית, כמו כדור שמתגלגל במורד. בקפיץ, למשל, $U = \frac{1}{2}kx^2$, ולכן $F = -kx$. מגרף של $U(x)$ אפשר לקרוא את כל התנועה:

מקרים עבודה — 18 מקרים

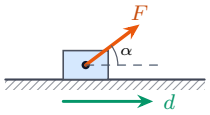
כתום — כוח, ירוק — העתק, סגול — משקל. הכוח "עוזר" לתנועה: $W>0$. "מפריע": $W<0$. ניצב לתנועה: $W=0$.

1 כוח בכיוון התנועה



$$W = F\,d > 0$$

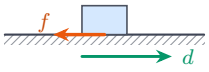
2 כוח בזווית



$$W = F\,d\cos\alpha$$

רק הרכיב בכיוון התנועה עושה עבודה

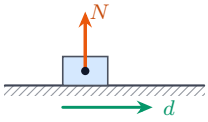
3 חיכוך קינטי



$$W_f = -f\,d$$

האנרגיה הופכת לאנרגיה פנימית

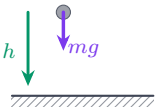
4 כוח ניצב לתנועה



$$W = 0$$

כמו הכוח הנורמלי של רצפה אופקית

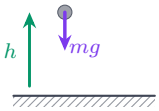
5 משקל, כשהגוף יורד



$$W_g = +mgh$$

הכובד "מפקיד" אנרגיה

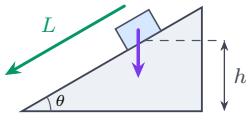
6 משקל, כשהגוף עולה



$$W_g = -mgh$$

האנרגיה נאגרת כ־U_g

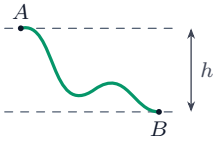
7 משקל על מדרון



$$W_g = mgL\sin\theta = mgh$$

רק הפרש הגובה קובע

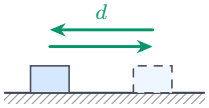
8 משקל במסלול עקום



$$W_g = mgh$$

לא תלוי במסלול: הכובד משמר

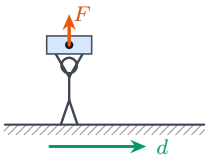
9 חיכוך בהלוך וחזור



$$W_f = -f\cdot 2d$$

ההעתק הכולל אפס, אבל העבודה לא

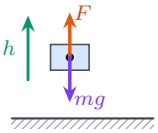
10 סבל נושא ארגז, v קבועה



$$W = 0$$

מאמץ ביום־יום, אבל אפס עבודה בפיזיקה

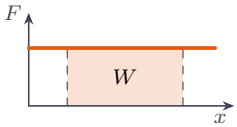
11 הרמה במהירות קבועה



$$W_F = mgh, \qquad \Sigma W = 0$$

האנרגיה הקינטית לא משתנה

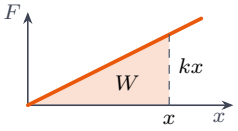
12 גרף: כוח קבוע



$$W = F\,\Delta x$$

העבודה היא השטח

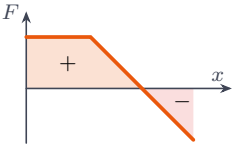
13 גרף: קפיץ



$$W = \tfrac{1}{2}kx^2$$

עבודת הכוח שמותח את הקפיץ

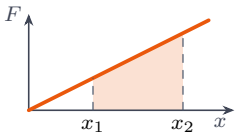
14 גרף: שטח מעל ומתחת לציר



$$W = S_+ - S_-$$

כשהגוף נע בכיוון החיובי של x

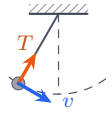
15 קפיץ בין שתי התארכויות



$$W = \tfrac{1}{2}k\left(x_2^2 - x_1^2\right)$$

לא $\tfrac{1}{2}k(x_2-x_1)^2$!

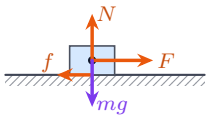
16 מתיחות במטוטלת



$$W_T = 0$$

המתיחות ניצבת למהירות בכל רגע

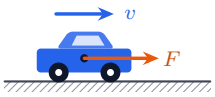
17 משפט עבודה–אנרגיה



$$\Sigma W = W_F + W_f = \Delta E_k$$

סוכמים את העבודות של כל הכוחות

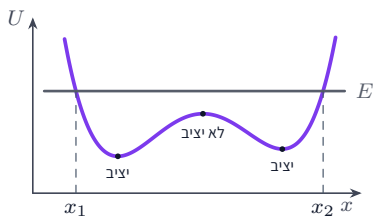
18 הספק



$$P = F\,v$$

הספק רגעי; $\frac{W}{t}$ — הספק ממוצע

© אור בן שטרית · אינסוף



- **נקודות שיווי משקל** הן המקומות שבהם $\frac{dU}{dx}=0$. במינימום של U שיווי המשקל **יציב**: גוף שזז מעט חוזר. במקסימום הוא **לא יציב**: גוף שזז מעט בורח.
- קו אופקי בגובה E מייצג את האנרגיה המכנית. הגוף יכול להימצא רק במקומות שבהם $U\le E$, כי $E_k=E-U\ge 0$.
- **נקודות החזרה** x_1 ו־x_2 הן המקומות שבהם $U=E$. שם המהירות מתאפסת, והגוף חוזר לאחור.
- בגרף, E גבוהה מה"גבעה" שבאמצע. לכן הגוף מאט כשהוא עולה עליה, עובר אותה, ונע הלוך וחזור בין x_1 ל־x_2. עם אנרגיה נמוכה מהגבעה הוא היה נשאר כלוא באחד ה"עמקים".

12 עשרה טיפים שחוסכים נקודות

1. אין זמן? חשבו על אנרגיה. כשהזמן לא נתון ולא מבוקש, משוואת אנרגיה אחת מחליפה פירוק לרכיבים ושתי משוואות תנועה.

2. שני מצבים, שלוש שורות. לכל מצב כותבים E_k, U_g ו־U_{el}, גם כשאחד מהם אפס. כך שום איבר לא נשכח.

3. רמת אפס אחת. בוחרים אותה פעם אחת לכל השאלה, בדרך כלל בנקודה הנמוכה ביותר. רק הפרשי גובה משנים.

4. מי עושה עבודה? כוח נורמלי של משטח נייח ומתיחות של חוט מטוטלת ניצבים לתנועה ולא עושים עבודה. חיכוך נכנס ל־W_{nc}, עם סימן מינוס.

5. גובה אנכי, דרך מלאה. בכובד מציבים את הפרש הגובה האנכי. בחיכוך מציבים את הדרך שהגוף עבר, כולל כל ההלוך וחזור.

6. מדרון מחוספס. החיכוך הוא $\mu_k mg\cos\theta$, והדרך לאורך המדרון היא $L=\frac{h}{\sin\theta}$. אל תציבו $\mu_k mg$.

7. קפיץ: מודדים מהאורך הרפוי. x הוא השינוי באורך. כדי למתוח מ־x_1 ל־x_2 צריך עבודה של $\frac{1}{2}k(x_2^2-x_1^2)$. העבודה של כוח הקפיץ עצמו שווה לה בגודלה, עם סימן מינוס.

8. מהירות מרבית — שקול אפס. כדור שנופל על קפיץ ממשיך להאיץ עד ש־$kx=mg$. שם מהירותו מרבית, ולא ברגע המגע.

9. מערכת: החוט לא נכנס לחשבון. העבודה הכוללת של המתיחות על המערכת היא אפס. סוכמים את האנרגיה הקינטית של כל הגופים.

10. הספק: רגעי או ממוצע. $P=Fv$ נותן את ההספק ברגע מסוים, ו־$\frac{W}{t}$ את ההספק הממוצע. במהירות המרבית כוח המנוע שווה להתנגדות.

13 טעויות נפוצות

שמונה טעויות שחוזרות בכל מבחן

1. שוכחים את $\cos\alpha$ בעבודה של כוח בזווית, או מציבים את הזווית עם האנך במקום הזווית עם כיוון התנועה.
2. נותנים לעבודה או לאנרגיה כיוון. **לא:** אלה סקלרים. לעבודה יש סימן, ואנרגיה קינטית לעולם אינה שלילית.
3. מציבים ב־mgh את האורך לארך המדרון במקום הגובה האנכי.
4. משתמשים בשימור האנרגיה המכנית גם כשיש חיכוך או כוח חיצוני שעושה עבודה.
5. בעבודת החיכוך מציבים μmg גם על מדרון או כשמושכים בזווית. החיכוך הוא μN, ואת N מחשבים מחדש בכל שאלה.
6. בקפיץ מציבים את האורך הכולל במקום השינוי באורך, או כותבים $\frac{1}{2}k(x_2-x_1)^2$ במקום $\frac{1}{2}k(x_2^2-x_1^2)$.
7. בכדור שנופל על קפיץ שוכחים שהכדור ממשיך לרדת גם בזמן הכיווץ: כותבים $mgh=\frac{1}{2}kx^2$ במקום $mg(h+x)=\frac{1}{2}kx^2$.
8. מבלבלים בין הספק לאנרגיה. קילוואט־שעה הוא יחידה של אנרגיה, וקילוואט הוא יחידה של הספק.

14 תשובות לתיבות "בדקו את עצמכם"

- **פרק 1:** לשניהם אותה מהירות. בשניהם $\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}mv_0^2+mgh$, והכיוון לא מופיע במשוואה. שונים רק הכיוון של המהירות בפגיעה וזמן התנועה.
- **פרק 2:** היד מפעילה $15\,\mathrm{N}$ לאורך $2\,\mathrm{m}$, ולכן עבודתה $+30\,\mathrm{J}$. עבודת המשקל $-30\,\mathrm{J}$, ועבודת הכוח השקול אפס, כי המהירות קבועה.
- **פרק 4:** פי 9, כי האנרגיה הקינטית תלויה בריבוע המהירות.
- **פרק 6:** $v=\sqrt{2\cdot 10\cdot 1.8}=6\,\mathrm{m/s}$. התשובה לא תלויה בצורת המגלשה: הכוח הנורמלי ניצב לתנועה, ורק הגובה קובע.
- **פרק 7:** 25%. האנרגיה המכנית ירדה מ־$mg\cdot 2$ ל־$mg\cdot 1.5$, כלומר ברבע.
- **פרק 9:** בגרף $E_k=32\,\mathrm{J}$, ולכן $\frac{1}{2}\cdot 4\cdot v^2=32$ ו־$v=4\,\mathrm{m/s}$.
- **פרק 10:** $P=\dfrac{50\cdot 10\cdot 6}{4}=750\,\mathrm{W}$.

ומה עכשיו? עברו לקובץ התרגילים של הנושא: 15 שאלות, מהבסיס ועד שאלות אתגר, עם תשובות סופיות בסוף. הנושא הבא בסדרה הוא מתקף ותנע.

15 דף הנוסחאות של הנושא

עבודה ואנרגיה בעמוד אחד

עבודה של כוח קבוע $W = F\,d\cos\alpha$ חיכוך: $W_f = -f_k\,s$ (s — הדרך)

עבודה של כוח משתנה השטח מתחת לגרף $F(x)$ $W = \int F\,dx$ (מכינה)

אנרגיה קינטית $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

משפט עבודה–אנרגיה $\Sigma W = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$

אנרגיה פוטנציאלית $U_g = mgh$ $U_{el} = \frac{1}{2}kx^2$ לכוח משמר: $W = -\Delta U$

שימור אנרגיה מכנית $E_k^A + U^A = E_k^B + U^B$ (רק כוחות משמרים עושים עבודה)

עם חיכוך או מנוע $E_B = E_A + W_{nc}$

מקרים שימושיים נפילה: $v = \sqrt{2gh}$ מטוטלת: $v^2 = 2gL(1-\cos\theta)$

דרך בלימה: $d = \dfrac{v^2}{2\mu_k g}$ קפיץ משגר: $\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv^2$

כדור על קפיץ: $mg(h+x) = \frac{1}{2}kx^2$ מהירות מרבית כש־$kx = mg$

מדרון מחוספס: $mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \mu_k mg\cos\theta\, L$

מערכת גופים סוכמים E_k ו־U של כל הגופים אטווד: $(m_1 - m_2)gh = \frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2$

הספק $P = \dfrac{W}{t}$ $P = F\,v$ $v_{\max} = \dfrac{P}{f}$

נצילות $\eta = \dfrac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$

יחידות $1\,\text{J} = 1\,\text{N}\cdot\text{m}$ $1\,\text{W} = 1\,\text{J/s}$ $1\,\text{kWh} = 3.6\cdot 10^6\,\text{J}$ $1\,\text{hp} \approx 746\,\text{W}$

כוח ואנרגיה פוטנציאלית $F = -\dfrac{dU}{dx}$ מינימום של U — יציב, מקסימום — לא יציב (מכינה)

ערכים בקובץ $g = 10\,\text{m/s}^2$ $\sin 37^\circ = 0.6$ $\cos 37^\circ = 0.8$

© 2026 אור בן שטרית · אינסוף. כל הזכויות שמורות.
מותר להדפיס ולהפיץ את הקובץ בשלמותו ובחינם לצורכי לימוד. אסור להעתיק ממנו תרגילים או איורים לחומרים אחרים, לשנות אותו או להשתמש בו למטרות מסחריות בלי אישור בכתב.
הקובץ נכתב בידי אינסוף ואינו פרסום רשמי של משרד החינוך או של גוף אחר.