עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 2, אביב · 🧱 מחשבון מובנה

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 10 יחידות ו-6 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו תואם קורס דינמיקה הנדסית סמסטריאלי לשנה ב'. הוא מבוסס על הנושאים והעומק של MIT 2.003 Engineering Dynamics ו-MIT 8.01 Classical Mechanics (שניהם ב-MIT OpenCourseWare), Purdue ME 274 והדינמיקה של Georgia Tech, ועל הספר החינמי OpenStax University Physics Volume 1, שאליו אנו מקשרים לאורך הקורס. אף אחד מהמחברים או המוסדות האלה אינו תומך בעמוד זה.

מה שאנחנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית באנרגיה נקייה, בתצפית על כדור הארץ או בהגנה פלנטרית עם מקור ציבורי מצוטט (מכוניות חשמליות, תחנת החלל, GRACE-FO, אגירה שאובה, ניסוי האסטרואיד DART של נאס"א, רקטות, טורבינות רוח ומים, מבנים עמידי רעידות אדמה), כל מספר בעמוד מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני הפרסום, ולכל מעבדה יש סימולציה חינמית או גרסה ביתית זולה.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

דינמיקה היא הפיזיקה של כל מכונה שמניעה אנרגיה. מכוניות חשמליות הופכות אנרגיית סוללה לתנועה ומחזירות חלק ממנה, טורבינות מים ורוח הן גופים קשיחים מסתובבים, תחנות אגירה שאובה אוגרות אנרגיה בהרמת מים, ולוויינים שמנטרים את המים והאקלים של כדור הארץ נשארים למעלה כי הם ממשיכים ליפול סביבו.

זו גם הדרך שבה אנו מגינים על כדור הארץ: משימת DART של נאס"א השתמשה בתנע כדי לשנות את מסלולו של אסטרואיד, ומהנדסים משתמשים בתורת התנודות כדי שמבנים יעמדו ברעידות אדמה. כל יחידה מסתיימת בקטע קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכים לדוגמה.

למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 10 יחידות ו-6 מעבדות (ENGR 212).
- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.
- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

לפני שמתחילים

ידע מוקדם

- סטטיקה: דיאגרמות גוף חופשי, מומנטים ומרכזים גאומטריים.
- פיזיקה I: חוקי ניוטון, אנרגיה ותנע.
- חשבון אינפיניטסימלי I ו-II: נגזרות, אינטגרלים ומשוואות דיפרנציאליות פשוטות.
- משוואות דיפרנציאליות עוזר ביחידה 10 (תנודות) אך אינו חובה; הפתרונות הדרושים ניתנים.

איך ללמוד

- התחילו בקינמטיקה: מה ידוע על המיקום, המהירות והתאוצה, ובאילו קואורדינטות?
- שרטטו זו לצד זו דיאגרמת גוף חופשי ודיאגרמה קינטית (ma ו-Iα).
- בחרו את השיטה המתאימה: F = ma לתאוצות, עבודה-אנרגיה למהירויות בין שני מיקומים, מתקף-תנע לכוחות לאורך זמן ולהתנגשויות.
- פתרו קודם בסמלים, אחר כך הציבו מספרים ב-SI, ובדקו יחידות ומקרי קצה.
- פתרו כל תרגיל על הנייר לפני שאתם פותחים את התשובה.
- חזרו על הבחנים כעבור כמה ימים; תרגול מרווח עדיף על מפגש ארוך אחד.

מה צריך

- מחשב או טאבלט לסימולציות PhET החינמיות (הן רצות בדפדפן).
- סמארטפון עם מצלמת הילוך איטי או אפליקציית חיישנים חינמית (מד תאוצה, שעון עצר).
- קרש או ספר ארוך ליצירת רמפה, סרט מדידה, וכדור, קופסת מרק, קופסה ריקה וטבעת או חישוק לגלגול.
- חוט, משקולת קטנה (אום או דסקיות) וסרגל למטוטלת.
- כמה גומיות או קפיץ רך ומסות קטנות (מטבעות בשקית) למתנד מסה-קפיץ.
- תוכנת גיליון אלקטרוני לגרפים ולהתאמות.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

כ־6 עד 9 שעות בשבוע: קריאה, תרגילים, ובשבועות המעבדה גם המעבדה.

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	קינמטיקה של חלקיקים בקו ישר	מיקום, מהירות, תאוצה; תאוצה קבועה	OpenStax UP1 3.1–3.4
2	קינמטיקה של חלקיקים בקו ישר	תאוצה משתנה, a(x) ו-a(v); מעבדה A	UP1 3.6
3	תנועה עקומה: קליעים, קואורדינטות נורמליות–משיקיות וקוטביות	קליעים, נורמלי–משיקי, קוטבי, תנועה יחסית; מעבדה B	UP1 4.1–4.5
4	קינטיקה של חלקיקים: החוק השני של ניוטון	החוק השני של ניוטון, חיכוך, גופים מחוברים	UP1 5.1–6.2
5	קינטיקה של חלקיקים: החוק השני של ניוטון	עקומות, הטיית כביש, מסלולים	UP1 6.3, 13.4
6	עבודה, אנרגיה והספק	עבודה, אנרגיה, שימור, הספק ונצילות	UP1 7.1–8.3
7	מתקף, תנע והתנגשות	מתקף, תנע, התנגשות, תנע זוויתי; מעבדה C; תרגול לבוחן אמצע	UP1 9.1–9.4
8	מערכות חלקיקים ומסה משתנה: סילונים ורקטות	מערכות חלקיקים, סילונים, רקטות	UP1 9.5–9.7
9	קינמטיקה מישורית של גופים קשיחים	סיבוב גוף קשיח, גלגלי שיניים, מהירות יחסית	UP1 10.1–10.3
10	קינמטיקה מישורית של גופים קשיחים	מרכזים רגעיים, תאוצה יחסית, גלגול	UP1 11.1
11	קינטיקה מישורית של גופים קשיחים: כוח, מסה ותאוצה	מומנטי התמד, משוואות תנועה מישורית, גלגול; מעבדה D	UP1 10.4–10.7
12	גופים קשיחים: שיטות אנרגיה ותנע	אנרגיה של גוף קשיח, הספק, תנע זוויתי	UP1 10.8, 11.2–11.3
13	תנודות מכניות	תנודות חופשיות, מטוטלות, שיטת האנרגיה; מעבדה E	UP1 15.1–15.4
14	תנודות מכניות	תנודות מרוסנות ומאולצות, תהודה; מעבדה F	UP1 15.5–15.6
15	חזרה	חזרה וסדרת תרגול מסכמת	כל היחידות

ההתקדמות שלכם

סמנו יחידות ומעבדות כשאתם מסיימים אותן, ועשו את הבחנים. ההתקדמות והציונים נשמרים רק בדפדפן הזה ולעולם לא נשלחים אלינו.

יחידות

קינמטיקה של חלקיקים בקו ישר

מיקום, מהירות ותאוצה כנגזרות, תאוצה קבועה, תאוצה הנתונה כפונקציה של זמן, מהירות או מיקום, ודרך לעומת העתק.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- קשרו בין x, v ו-a בגזירה ובאינטגרציה.
- השתמשו נכון במשוואות התאוצה הקבועה.
- פתרו בעיות a(x) בעזרת v dv = a dx.
- הבחינו בין הדרך הכוללת להעתק.

מושגי מפתח

- המהירות היא v = dx/dt והתאוצה a = dv/dt = d²x/dt². אינטגרציה הולכת בכיוון ההפוך.
- רק כאשר a קבועה מתקיימות v = v₀ + at, x = x₀ + v₀t + ½at² ו-v² = v₀² + 2a(x − x₀).
- אם a נתונה כפונקציה של המיקום, השתמשו ב-a dx = v dv; אם כפונקציה של המהירות, השתמשו ב-dt = dv/a(v).
- הדרך שנעברה סופרת כל קטע; פצלו את התנועה היכן ש-v = 0 וחברו את האורכים.
- סימנים חשובים: בחרו כיוון חיובי והקפידו עליו; האטה פירושה של-a ו-v סימנים מנוגדים.

משוואות מפתח

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}$$

```
v=dx/dt, a=dv/dt
```

הגדרות

$$v = v_0 + at, \quad x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

```
v=v_0+at, x=x_0+v_0t+12at^2
```

תאוצה קבועה

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

```
v^2=v_0^2+2a(x-x_0)
```

תאוצה קבועה, ללא זמן

$$a\,dx = v\,dv$$

```
a dx=v dv
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 חלקיק נע לפי $x = t^3 - 6t^2 + 9t$ (m, s). מצאו מתי הוא נעצר, את v ו-a ב-$t = 2$ s, ואת הדרך שנעברה מ-0 עד 4 s.

1. $v = 3t^2 - 12t + 9 = 0$ ב-$t = 1$ s וב-$t = 3$ s; $a = 6t - 12$.
2. At $t = 2$ s: $v = -3$ m/s, $a = 0$.
3. $x(0) = 0$, $x(1) = 4$, $x(3) = 0$, $x(4) = 4$, ולכן קטעים של $4 + 4 + 4$ m.

תשובה: נעצר ב-1 s וב-3 s; $v = -3$ m/s, $a = 0$ ב-2 s; עובר 12 m (העתק 4 m).

דוגמה 1.2 מכונית מתחילה ממנוחה ומאיצה ב-3 m/s² במשך 8 s. מצאו את מהירותה ואת הדרך שעברה.

1. $v = at = 3 \times 8$.
2. $x = \tfrac{1}{2}at^2 = \tfrac{1}{2} \times 3 \times 64$.

תשובה: 24 m/s ו-96 m.

דוגמה 1.3 מכונית במהירות 30 m/s בולמת ב-6 m/s². מצאו את מרחק העצירה ואת זמנה.

1. $x = v_0^2/(2a) = 900/12$.
2. $t = v_0/a$.

תשובה: 75 m ב-5 s.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. כדור נזרק אנכית כלפי מעלה ב-15 m/s. מצאו את גובהו המרבי ואת הזמן להגיע אליו.

   $h = v^2/(2g) = 11.47$ m; $t = v/g = 1.529$ s.

2. חלקיק מתחיל ממנוחה ב-$x = 0$ עם $a = 2x$ (m/s²). מצאו את v ב-$x = 3$ m.

   $v\,dv = 2x\,dx$ נותן $v^2 = 2x^2$, $v = \sqrt{2} \times 3 = 4.24$ m/s.

3. ערכים לדוגמה: מכונית חשמלית מאיצה מ-0 ל-27 m/s (כ-100 km/h) ב-6 s. מצאו את תאוצתה הממוצעת.

   $a = 27/6 = 4.5$ m/s² (ערכים לדוגמה).

4. אבן שהופלה לבאר פוגעת במים אחרי 2.5 s. מה עומק פני המים (הזניחו את זמן התפשטות הקול)?

.h = ½gt² = 30.7 m

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מהירות אפס פירושה תאוצה אפס.

בפועל: בשיא הזריקה v = 0 אך a = −g.

מיתוס: דרך והעתק הם אותו דבר.

בפועל: לא כשהחלקיק מתהפך; פצלו ב-v = 0.

מיתוס: נוסחאות התאוצה הקבועה תמיד עובדות.

בפועל: רק עבור a קבועה; אחרת בצעו אינטגרציה.

כרטיסיות

מהירות

.v = dx/dt

תאוצה

.a = dv/dt

a קבועה

.$x = v_0t + ½at^2$;$v = v_0 + at$

משוואה ללא זמן

.$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$

a(x)

.a dx = v dv

דרך

פצלו את התנועה היכן ש-v = 0.

בוחן לבדיקה עצמית

1. התאוצה היא הנגזרת של…

המיקום

המהירות

הדרך

הכוח

.המהירות. a = dv/dt

2. בשיא זריקה אנכית, התאוצה היא…

0

g כלפי מטה

g כלפי מעלה

המהירות המרבית

g כלפי מטה. הכבידה לעולם אינה נכבית.

3. הכפלת המהירות מכפילה את מרחק הבלימה (באותה a) ב…

2

4

2√

1

.4. $x = v^2/(2a)$

4. אם a נתונה כפונקציה של x, השתמשו ב…

$v = at$

$a\,dx = v\,dv$

$x = vt$

$F = ma$ בלבד

$a\,dx = v\,dv$. כלל השרשרת.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

כל שינוי מהירות עולה אנרגיה, ומקור האנרגיה הזו חשוב. FuelEconomy.gov (DOE/EPA) מציין שרכבים חשמליים ממירים יותר מ-77% מהאנרגיה החשמלית מהרשת להספק בגלגלים, בעוד שרכבי בנזין רגילים ממירים רק כ-12% עד 30% מהאנרגיה

שבבנזין. הקינמטיקה של יחידה זו, כמה מהר מכונית מאיצה ובאיזה מרחק היא בולמת, היא נקודת המוצא למודלי מחזור הנסיעה שבהם מדרגים את יעילות הרכבים.

ב־Saving Planets: פיזיקה I

מקורות: FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · OpenStax UP1, 3.4 Motion with constant acceleration (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-4-motion-with-constant-acceleration)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 3.1 Position, displacement and average velocity (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-1-position-displacement-and-average-velocity): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 3.4 Motion with constant acceleration (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-4-motion-with-constant-acceleration): משוואות a קבועה.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): הרצאות ותרגילים של MIT.

צפו בהרצאה

Kinematics: describing the motion of particles and rigid bodies (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/kinematics-describing-the-motion-of-particles-and-rigid-bodies/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

תנועה עקומה: קליעים, קואורדינטות נורמליות–משיקיות וקוטביות

תנועה במישור: רכיבים קרטזיים וקליעים, רכיבים נורמליים ומשיקיים במסלולים עקומים, קואורדינטות קוטביות לזרועות מסתובבות, ותנועה יחסית.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- פתרו בעיות קליעים עם תנועות x ו-y בלתי תלויות.
- מצאו את התאוצה המשיקית והנורמלית במסלול עקום.
- השתמשו ברכיבים קוטביים לתנועה לאורך זרוע מסתובבת.
- חברו מהירויות יחסיות.

מושגי מפתח

- לקליע $a_x = 0$ ו-$a_y = -g$ (ללא גרר אוויר); הזמן מקשר בין שני הכיוונים.
- במסלול עקום, $a_t = dv/dt$ משנה את גודל המהירות ו-$a_n = v^2/\rho$ מכוונת למרכז העקמומיות ומשנה את הכיוון.
- בקואורדינטות קוטביות $a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2$ ו-$a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}$; האיבר $2\dot{r}\dot{\theta}$ הוא חלק קוריוליס.
- תנועה יחסית: $v_A = v_B + v_{A/B}$, וכך גם לתאוצות (למערכות בהעתקה).
- ללוויין במסלול מעגלי יש רק תאוצה נורמלית: הוא נופל לעבר כדור הארץ ב-v^2/r בעודו נע הצידה מהר מספיק כדי להחטיא אותו.

משוואות מפתח

$$x = v_0 \cos\theta \, t, \quad y = v_0 \sin\theta \, t - \tfrac{1}{2} g t^2$$

```
x=v_0θ t, y=v_0θ t-12gt^2
```

קליע

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

```
R=(v_0^22θ)/(g)
```

טווח על קרקע מישורית

$$a_t = \dot{v}, \quad a_n = \frac{v^2}{\rho}$$

```
a_t= v, a_n=(v^2)/(ρ)
```

נורמלי–משיקי

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2, \quad a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 כדור משוגר ב-20 m/s בזווית 30° מעל קרקע מישורית. מצאו את הטווח, הגובה המרבי וזמן המעוף.

1. $v_x = 17.32$ m/s, $v_y = 10$ m/s.
2. זמן $= 2v_y/g$; גובה $= v_y^2/(2g)$; $R = v_0^2 \sin 60°/g$.

תשובה: $R = 35.3$ m, $h = 5.10$ m, $t = 2.04$ s.

דוגמה 2.2 מכונית במהירות 25 m/s בעקומה ברדיוס 100 m מאטה ב-2 m/s². מצאו את תאוצתה הכוללת.

1. $a_n = 25^2/100 = 6.25$ m/s²; $a_t = -2$ m/s².
2. $|a| = \sqrt{(6.25^2 + 2^2)}$.

תשובה: 6.56 m/s².

דוגמה 2.3 צווארון מחליק החוצה לאורך זרוע ב-0.3 m/s (קבוע) בעוד הזרוע מסתובבת ב-2 rad/s קבועים. מצאו את תאוצתו כאשר $r = 0.5$ m.

1. $a_r = 0 - 0.5 \times 2^2 = -2.0$ m/s².
2. $a_\theta = 0 + 2 \times 0.3 \times 2 = 1.2$ m/s².

תשובה: $|a| = 2.33$ m/s².

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. נאס״א מציינת שהתחנה מקיפה את כדור הארץ בערך כל 90 דקות. בעזרת רדיוס מסלול לדוגמה של 6791 km (גובה 420 km), מצאו את מהירותה ואת תאוצתה הנורמלית.

   $v = 2\pi r/T = 7902$ m/s (נאס״א מציינת כ-5 מייל לשנייה, 8.0 km/s); $a_n = v^2/r = 9.19$ m/s².

2. סירה פונה צפונה ב-4 m/s בזרם הזורם מזרחה ב-3 m/s. מצאו את מהירותה ביחס לקרקע.

   5 m/s בזווית 36.9° מזרחית לצפון.

3. איזו זווית שיגור נותנת את הטווח הארוך ביותר על קרקע מישורית (ללא גרר)?

$\sin 2\theta = 1$, שבה $45°$.

4. מצאו את התאוצה הנורמלית של מכונית ב-$15\ m/s$ בעקומה ברדיוס $50\ m$.

$a_n = 225/50 = 4.5\ m/s^2$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: לגוף הנע בגודל מהירות קבוע אין תאוצה.

בפועל: בעקומה יש לו $a_n = v^2/\rho$.

מיתוס: המהירות האופקית של קליע יורדת במהלך המעוף.

בפועל: ללא גרר, v_x נשארת קבועה.

מיתוס: אסטרונאוטים מרחפים כי אין כבידה במסלול.

בפועל: הכבידה שם עדיין חזקה: $(6371/6791)^2 = 88\%$ מהכבידה על פני הקרקע בגובה לדוגמה של $420\ km$. הם מרחפים כי הם בנפילה חופשית יחד עם התחנה.

כרטיסיות

קליע

$a_x = 0,\ a_y = -g$.

טווח

$R = v_0^2 \sin 2\theta / g$.

משיקי

$a_t = dv/dt$.

נורמלי

$a_n = v^2/\rho$.

קוטבי

$a_r = r - r\dot{\theta}^2,\ a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}$.

מהירות יחסית

$v_A = v_B + v_{A/B}$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. לקליע ללא גרר, a_x הוא...

g

0

$-g$

v^2/r

0. רק הכבידה פועלת, אנכית.

2. התאוצה הנורמלית בעקומה...

dv/dt

v^2/ρ

$r\ddot{\theta}$

0

v^2/ρ. משנה כיוון.

3. האיבר $2\dot{r}\dot{\theta}$ בקואורדינטות קוטביות הוא...

האיבר הצנטריפטלי

איבר קוריוליס

איבר הגרר

האיבר המשיקי

איבר קוריוליס. קוריוליס.

4. הכפלת המהירות באותה עקומה מכפילה את a_n ב...

2

4

½

1

.4 v^2

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

תחנת החלל מדגימה תנועה עקומה בקיצוניותה. נאס"א אומרת שהיא נעה בחמישה מייל לשנייה, מקיפה את כדור הארץ בערך כל 90 דקות ומשלימה 16 הקפות ב-24 שעות, ושמסלולה עובר מעל 90 אחוז מאוכלוסיית כדור הארץ; אסטרונאוטים צילמו מיליוני תמונות של כוכב הלכת. אותו איזון של תאוצה נורמלית שומר כל לוויין תצפית על כדור הארץ במסלולו.

ב־Saving Planets: מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

מקורות: NASA: International Space Station facts and figures (https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/) · OpenStax UP1, 4.4 Uniform circular motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 4.3 Projectile motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-3-projectile-motion): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 4.4 Uniform circular motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion): תנועה מעגלית.
- PhET: Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion): אינטראקטיבי.
- PhET: Ladybug Motion 2D (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ladybug-motion-2d): וקטורי מהירות ותאוצה.

צפו בהרצאה

Definition of normal and tangential coordinates (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/definition-of-normal-and-tangential-coordinates/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

קינטיקה של חלקיקים: החוק השני של ניוטון

ΣF = ma בקואורדינטות קרטזיות, נורמליות–משיקיות וקוטביות, חיכוך וגופים מחוברים, עקומות מוטות ומסלולים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- שרטטו דיאגרמות גוף חופשי ודיאגרמות קינטיות.
- הפעילו ΣF = ma עם חיכוך וגופים מחוברים.
- פתרו בעיות עקומות והטיה עם רכיבים נורמליים–משיקיים.
- מצאו מהירויות של מסלולים מעגליים.

מושגי מפתח

- החוק השני של ניוטון: ΣF = ma, במערכת התמדה. כתבו אותו בקואורדינטות המתאימות לתנועה.
- חיכוך קינטי בהחלקה הוא μ_kN, מנוגד לכיוון ההחלקה.
- גופים מחוברים חולקים תאוצות דרך אילוצים (חבל באורך קבוע, גלגלת); כתבו משוואה אחת לכל גוף.
- בעקומה, הכוח הנורמלי השקול מספק mv²/ρ; הטיית הכביש מאפשרת לכוח הנורמלי לספק אותו בלי חיכוך.
- במסלול מעגלי, הכבידה מספקת את הכוח הנורמלי: GMm/r² = mv²/r, ולכן v = √(GM/r).

משוואות מפתח

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

```
F=m a
```

החוק השני של ניוטון

$$\sum F_n = \frac{mv^2}{\rho}, \quad \sum F_t = m\dot{v}$$

```
F_n=(mv^2)/(ρ), F_t=m v
```

נורמלי–משיקי

$$v = \sqrt{g\rho \tan\theta}$$

עקומה מוטה, ללא חיכוך

$$v = \sqrt{GM/r}$$

מסלול מעגלי

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 מכונית של 1200 kg מחליקה עד עצירה מ-25 m/s עם $\mu_k = 0.7$. מצאו את התאוטה ואת מרחק העצירה.

1. $a = \mu_k g = 6.87\ \text{m/s}^2$ (המסה מצטמצמת).
2. $x = v^2/(2a) = 625/13.73$.

תשובה: $6.87\ \text{m/s}^2$; $45.5\ \text{m}$.

דוגמה 3.2 מסות של 5 kg ו-3 kg תלויות משני צידי גלגלת קלה ללא חיכוך. מצאו את התאוצה ואת מתיחות החבל.

1. $a = (5 - 3)g/(5 + 3)$.
2. $T = 2m_1m_2g/(m_1 + m_2)$.

תשובה: $a = 2.45\ \text{m/s}^2$; $T = 36.8\ \text{N}$.

דוגמה 3.3 עקומה ברדיוס 80 m מוטה ב-15°. באיזו מהירות אין צורך בחיכוך?

1. $v = \sqrt{(g\rho \tan 15°)} = \sqrt{(9.81 \times 80 \times 0.268)}$.

תשובה: $14.5\ \text{m/s}$ (52 km/h).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. גוש של 10 kg נדחף ב-50 N על רצפה עם $\mu_k = 0.3$. מצאו את תאוצתו.

   $a = (50 - 29.4)/10 = 2.06\ \text{m/s}^2$.

2. אדם של 70 kg עומד במעלית המאיצה כלפי מעלה ב-$1.5\ \text{m/s}^2$. מצאו את כוח הרצפה.

   $N = m(g + a) = 792\ \text{N}$.

3. מצאו את מהירות המסלול המעגלי ברדיוס לדוגמה של 6791 km ($GM = 3.986 \times 10^{14}\ \text{m}^3/\text{s}^2$).

   $v = \sqrt{(GM/r)} = 7{,}661\ \text{m/s}$.

4. מצאו את המהירות המרבית בעקומה שטוחה ברדיוס 50 m עם $\mu_s = 0.8$.

   $v = \sqrt{(\mu_s\, g\, r)} = 19.8\ \text{m/s}$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: עצם בתנועה זקוק לכוח שקול כדי להמשיך לנוע.

בפועל: רק כדי לשנות את מהירותו.

מיתוס: ma הוא כוח בדיאגרמת הגוף החופשי.

בפועל: ma הוא התוצאה, ומשורטט בדיאגרמה הקינטית.

מיתוס: הכוח הצנטריפוגלי דוחף אתכם החוצה בעקומה.

בפועל: במערכת התמדה, הכוח השקול פנימה הוא שגורם לכם לפנות; שום דבר אינו דוחף החוצה.

כרטיסיות

החוק השני

$\Sigma F = ma$.

דיאגרמה קינטית

מציגה ma (ובהמשך Iα).

חיכוך קינטי

$\mu_k N$, מנוגד להחלקה.

מכונת אטווד

$a = (m_1 - m_2)g/(m_1 + m_2)$.

עקומה מוטה

$v = \sqrt{(g\rho \tan\theta)}$.

מסלול מעגלי

$v = \sqrt{(GM/r)}$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. החוק השני של ניוטון מתקיים ב…

כל מערכת ייחוס

מערכת התמדה

רק על כדור הארץ

רק לחלקיקים במנוחה

מערכת התמדה. מערכות שאינן מערכות התמדה דורשות איברים נוספים.

2. במכונית מחליקה, $\mu_k g$ הוא…

גודל המהירות

התאוטה

הכוח

הדרך

התאוטה. a = μ_kN/m.

3. למסלול מעגלי ברדיוס גדול יותר יש…

ממהר

מאחר

אותה מהירות

בלתי אפשרי

מאחר. v = √(GM/r).

4. מה מספק את התאוצה הנורמלית בעקומה מוטה ללא חיכוך?

הכבידה בלבד

רכיב הכוח הנורמלי

דחף המנוע

גרר

רכיב הכוח הנורמלי. N sin θ.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

GRACE-FO שוקלת את מי כדור הארץ בעזרת החוק השני של ניוטון. JPL של נאס"א מסביר שהלוויינים התאומים טסים במרחק של כ-220 km זה מזה; אזורים עם כבידה חזקה מעט יותר מושכים קודם את הלוויין המוביל, ומערכת מדידת טווח במיקרוגל מודדת את השינוי הזעיר במרחק. מד תאוצה במרכז המסה של כל לוויין מודד תאוצות שאינן כבידתיות, כמו גרר אטמוספרי, כך שרק הכבידה נספרת. התוצאה היא מפות חודשיות המראות כיצד המים נעים באקוויפרים, באגמים, בכיפות הקרח ובאוקיינוסים.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ

מקורות: OpenStax UP1, 6.3 Centripetal force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-3-centripetal-force) · NASA JPL: GRACE-FO mission overview (https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission/overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 6.3 Centripetal force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-3-centripetal-force): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 6.2 Friction (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-2-friction): חיכוך.
- MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics (באנגלית) (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/): הרצאות MIT.

צפו בהרצאה

Lecture 2: Newton's Laws and Describing the Kinematics of Particles (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/lecture-2-newtons-laws-and-describing-the-kinematics-of-particles-1/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

עבודה, אנרגיה והספק

עבודה של כוחות (כבידה, קפיצים, חיכוך), עקרון עבודה–אנרגיה, כוחות משמרים ואנרגיה פוטנציאלית, שימור אנרגיה, הספק ונצילות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו את העבודה של כבידה, קפיצים וחיכוך.
- השתמשו בעקרון עבודה–אנרגיה כדי למצוא מהירויות בין שני מיקומים.
- השתמשו בשימור האנרגיה המכנית כשרק כוחות משמרים מבצעים עבודה.
- חשבו הספק ונצילות.

מושגי מפתח

- העבודה היא $U = \int F \cdot dr$. הכבידה מבצעת $-mg\Delta h$, קפיץ $-\tfrac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2)$, וחיכוך קינטי $-\mu_k N$ מרחק.
- עקרון עבודה–אנרגיה: $T_1 + \Sigma U_{1\to 2} = T_2$, עם אנרגיה קינטית $T = \tfrac{1}{2}mv^2$.
- עבור כוחות משמרים העבודה שווה לירידה באנרגיה הפוטנציאלית, ולכן $T_1 + V_1 = T_2 + V_2$ כשרק הם מבצעים עבודה.
- הספק הוא קצב העבודה: $P = F \cdot v$. נצילות היא הספק היציאה חלקי הספק הכניסה.
- שיטות אנרגיה נותנות מהירויות ישירות בלי למצוא תאוצות, ולכן הן שימושיות כל כך.

משוואות מפתח

$$T_1 + \sum U_{1\to 2} = T_2, \quad T = \tfrac{1}{2}mv^2$$

```
T_1+ U_12=T_2, T=12mv^2
```

עקרון עבודה–אנרגיה

$$V_g = mgh, \quad V_e = \tfrac{1}{2}kx^2$$

```
V_g=mgh, V_e=12kx^2
```

אנרגיות פוטנציאליות

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}, \quad \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

```
P= F· v, =_outP_in
```

הספק ונצילות

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 גוש של 2 kg מחליק ממנוחה במורד רמפה חלקה ויורד 3 m. מצאו את מהירותו בתחתית.

1. $mgh = \tfrac{1}{2}mv^2$.
2. $v = \sqrt{(2gh)}$.

תשובה: 7.67 m/s (המסה אינה משנה).

דוגמה 4.2 קפיץ ($k = 500$ N/m) הדחוס 0.2 m משגר גוש של 0.5 kg על רצפה חלקה. מצאו את מהירות השיגור.

1. $\tfrac{1}{2}kx^2 = \tfrac{1}{2}mv^2$.
2. $v = x\sqrt{(k/m)}$.

תשובה: 6.32 m/s.

דוגמה 4.3 מכונית של 1500 kg עולה בשיפוע של 5% במהירות קבועה של 20 m/s. בהזנחת גרר והתנגדות גלגול, איזה הספק מרים אותה?

1. $\theta = \tan^{-1} 0.05 = 2.86°$.
2. $P = mg \sin\theta \times v$.

תשובה: 14.7 kW.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ערכים לדוגמה: תחנת אגירה שאובה מרימה 1 מיליון m^3 מים לגובה 300 m. כמה אנרגיה היא אוגרת?

   $E = mgh = 10^9 \times 9.81 \times 300 = 2.94 \times 10^{12}$ J ≈ 818 MWh (ערכים לדוגמה).

2. מנוע בנצילות 85% מספק 10 kW. איזה הספק הוא צורך?

   $P_{in} = 10/0.85 = 11.8$ kW.

3. ארגז של 20 kg נדחף 5 m על רצפה עם $\mu_k = 0.4$. כמה עבודה מבצע החיכוך?

   $U = -0.4 \times 196.2 \times 5 = -392$ J.

4. משקולת מטוטלת משוחררת 0.5 m מעל הנקודה הנמוכה ביותר שלה. מצאו את מהירותה שם.

   $v = \sqrt{(2g \times 0.5)} = 3.13$ m/s.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: עבודה היא תמיד כוח כפול מרחק.

בפועל: רק הרכיב לאורך התנועה מבצע עבודה.

מיתוס: הכוח הנורמלי מבצע עבודה על גוש מחליק.

בפועל: הוא ניצב לתנועה, ולכן עבודתו אפס.

מיתוס: אנרגיה הולכת לאיבוד בגלל חיכוך.

בפועל: היא הופכת לחום; האנרגיה הכוללת נשמרת, האנרגיה המכנית לא.

כרטיסיות

עבודה

.$U = \int F \cdot dr$

אנרגיה קינטית

.$T = \frac{1}{2}mv^2$

עבודה–אנרגיה

.$T_1 + \Sigma U = T_2$

אנרגיה פוטנציאלית

.mgh; $\frac{1}{2}kx^2$.

הספק

.$P = F \cdot v$

נצילות

.P_{out}/P_{in}

בוחן לבדיקה עצמית

1. יחידת ה-SI של עבודה היא…

ואט

ג׳אול

ניוטון

פסקל

ג׳אול. $J = N \cdot m$.

2. הכפלת המהירות מכפילה את האנרגיה הקינטית ב…

2

4

8

2√

.4 ½mv²

3. אנרגיה מכנית נשמרת כאשר...

פועל חיכוך

רק כוחות משמרים מבצעים עבודה

המהירות קבועה

תמיד

רק כוחות משמרים מבצעים עבודה. הגדרה.

4. הספק שווה ל...

F·v

F/v

mv

mgh

F·v. קצב העבודה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

אגירה שאובה שומרת חשמל נקי בצורת גובה. משרד האנרגיה האמריקאי מתאר אגירה שאובה הידרואלקטרית כשני מאגרים בגבהים שונים, המפיקים חשמל כשהמים זורמים מטה דרך טורבינה וצורכים חשמל כדי לשאוב אותם חזרה למעלה, כמו סוללה ענקית. לפי DOE היא מהווה 88% מכל אגירת האנרגיה בקנה מידה של רשת בארצות הברית, ב-43 תחנות. האנרגיה האגורה היא פשוט mgh, כמו בתרגיל לדוגמה.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2

מקורות: OpenStax UP1, 8.3 (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/8-3-conservation-of-energy) · U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 7.3 Work-energy theorem (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/7-3-work-energy-theorem): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 8.3 Conservation of energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/8-3-conservation-of-energy): שימור אנרגיה.
- PhET: Energy Skate Park (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-skate-park): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Example 2b-work done equals the change in kinetic energy (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/example-2b-work-done-equals-the-change-in-kinetic-energy/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

מתקף, תנע והתנגשות

מתקף ותנע קוויים, שימור תנע, התנגשות מרכזית ישירה ומקדם ההחזר, ותנע זוויתי של חלקיק.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו בעקרון מתקף–תנע כדי למצוא כוחות ממוצעים.
- הפעילו שימור תנע על התנגשויות ורתע.
- פתרו התנגשויות בעזרת מקדם ההחזר.
- השתמשו בשימור תנע זוויתי לתנועה תחת כוח מרכזי.

מושגי מפתח

- התנע הקווי הוא L = mv. מתקף–תנע: $mv_1 + \int F\,dt = mv_2$.
- אם שום מתקף חיצוני אינו פועל על מערכת, התנע הכולל שלה נשמר, גם כשהאנרגיה הקינטית אינה נשמרת.
- מקדם ההחזר $e = (v_2' - v_1')/(v_1 - v_2)$ נע בין 0 (פלסטית לחלוטין) ל-1 (אלסטית לחלוטין).
- התנע הזוויתי סביב O הוא $H_O = r \times mv$. אם כל הכוחות עוברים דרך O (כוח מרכזי כמו כבידה), H_O נשמר.
- במסלול, שימור תנע זוויתי פירושו שהלוויין מהיר ביותר בפריאפסיס: $r_1v_1 = r_2v_2$ באפסידות.

משוואות מפתח

$$m\vec{v}_1 + \int \vec{F}\,dt = m\vec{v}_2$$

```
m v_1+ F dt=m v_2
```

מתקף–תנע

$$\sum m\vec{v}_1 = \sum m\vec{v}_2$$

```
m v_1= m v_2
```

שימור תנע

$$e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$$

```
e=(v_2'-v_1')/(v_1-v_2)
```

מקדם החזר

$$\vec{H}_O = \vec{r} \times m\vec{v}$$

```
H_O= r× m v
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 כדור של 0.15 kg מגיע ב-40 m/s ועוזב את המחבט ב-30 m/s בכיוון ההפוך אחרי 2 ms של מגע. מצאו את המתקף ואת הכוח הממוצע.

1. מתקף $= m(v_2 - v_1) = 0.15 \times 70 =$.
2. מתקף $= F \Delta t$/.

תשובה: 10.5 N·s; 5,250 N.

דוגמה 5.2 מכונית של 1500 kg ב-20 m/s פוגעת במכונית עומדת של 1000 kg והן נצמדות. מצאו את המהירות המשותפת ואת האנרגיה הקינטית שאבדה.

1. $1500 \times 20 = 2500v$.
2. $T_1 = 300$ kJ; $T_2 = ½ \times 2500 \times 12^2$.

תשובה: 12 m/s; אבדו 120 kJ (40%).

דוגמה 5.3 כדור של 2 kg ב-5 m/s פוגע חזיתית בכדור של 3 kg במנוחה עם $e = 0.8$. מצאו את שתי המהירויות הסופיות.

1. תנע: $2v_1' + 3v_2' = 10$.
2. החזר: $v_2' - v_1' = 0.8 \times 5 = 4$.

תשובה: $v_1' = -0.4$ m/s (נהדף לאחור), $v_2' = 3.6$ m/s.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. נאס״א מדווחת ש-DART קיצרה את מסלולו של דימורפוס מ-11 h 55 min ל-11 h 23 min. איזה חלק מזמן המחזור זהו?

32 min/715 min = 4.48%.

2. נאס״א מציינת שמהירות הפגיעה של DART הייתה כ-22530 km/h. המירו ל-m/s.

22,530/3.6 = 6,258 m/s.

3. לוויין נע ב-7.5 km/s במרחק 7000 km ממרכז כדור הארץ (פריאפסיס). מצאו את מהירותו ב-8000 km (אפואפסיס).

$r_1v_1 = r_2v_2$: $v_2 = 6.56$ km/s.

4. מחליקה של 60 kg במנוחה זורקת קדימה כדור של 2 kg ב-10 m/s. מצאו את מהירות הרתע שלה.

60v = 2 × 10, v = 0.333 m/s לאחור.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: תנע ואנרגיה קינטית נשמרים שניהם בכל התנגשות.

בפועל: תנע כן; אנרגיה קינטית רק אם e = 1.

מיתוס: כוח גדול יותר פירושו תמיד מתקף גדול יותר.

בפועל: מתקף הוא כוח × זמן; דחיפה ארוכה ועדינה יכולה להשתוות לקצרה וחזקה.

מיתוס: ההחזר תלוי רק בחומר.

בפועל: הוא תלוי גם במהירות, בצורה ובטמפרטורה.

כרטיסיות

תנע

.L = mv

מתקף

.∫F dt = Δ(mv)

שימור

אין מתקף חיצוני: Σmv קבוע.

החזר

e בין 0 ל-1.

תנע זוויתי

.H_O = r × mv

אפסידות המסלול

.$r_1v_1 = r_2v_2$

בוחן לבדיקה עצמית

1. מתקף שווה לשינוי ב...

אנרגיה

תנע

גודל המהירות

הכוח

תנע. מתקף–תנע.

2. בהתנגשות פלסטית לחלוטין, e =

0

0.5

1

∞

0. הם נעים יחד.

3. כוח מרכזי משמר…

תנע קווי

תנע זוויתי סביב המרכז

גודל המהירות

כלום

תנע זוויתי סביב המרכז. אין מומנט סביב O.

4. כריות אוויר מפחיתות פציעות על ידי…

הקטנת המתקף

הארכת זמן העצירה

הוספת מסה

הוספת מהירות

הארכת זמן העצירה. אותו מתקף לאורך זמן רב יותר.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ב-2022 הוכיחה נאס"א שתנע יכול להגן על כדור הארץ. נאס"א מדווחת שהחללית DART פגעה באסטרואיד דימורפוס במהירות של כ-22530 km/h ושינתה את מסלולו סביב דידימוס ב-32 דקות, מ-11 שעות ו-55 דקות ל-11 שעות ו-23 דקות, יותר מפי 25 מסף ההצלחה המינימלי של נאס"א. נאס"א מוסיפה שהרתע מהפסולת שנפלטה הגביר משמעותית את הדחיפה של DART, כמו אוויר הנפלט מבלון. אף אחד מהאסטרואידים לא היווה סכנה לכדור הארץ.

ב־Saving Planets: הגנה פלנטרית

מקורות: NASA: DART impact changed asteroid's motion in space (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/) · OpenStax UP1, 9.4 Types of collisions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-4-types-of-collisions)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 9.3 Conservation of linear momentum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-3-conservation-of-linear-momentum): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 9.4 Types of collisions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-4-types-of-collisions): התנגשויות.
- PhET: Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

A review of the principle of linear momentum and impulse (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/a-review-of-the-principle-of-linear-momentum-and-impulse/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

מערכות חלקיקים ומסה משתנה: סילונים ורקטות

מרכז המסה של מערכת, תנועת מרכז המסה, תנע של מערכות, זרמי זורם יציבים, ומערכות עם מסה משתנה כולל משוואת הרקטה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מצאו את מרכז המסה של מערכת ואת תנועתו.
- השתמשו בתנע למערכות שנדחפות זו מזו.
- מצאו את הכוח של סילון זורם יציב.
- השתמשו במשוואות הדחף והרקטה.

מושגי מפתח

- מרכז המסה נע כאילו כל הכוחות החיצוניים פועלים על המסה הכוללת שבו: ΣF_ext = m a_G. כוחות פנימיים מתבטלים.
- זרם יציב שמשנה מהירות דורש כוח: F = ṁ(v_out − v_in) בכל כיוון.
- רקטה צוברת תנע על ידי השלכת מסה לאחור. הדחף האידיאלי הוא F = ṁv_e ועוד איבר לחץ (p_e − p_a)A_e.
- משוואת הרקטה האידיאלית, Δv = v_e ln(m₀/m_f), מראה מדוע רקטות הן ברובן דלק הנעה.
- כבידה וגרר מקטינים את ה-Δv האמיתי, ולכן משגרים משתמשים בשלבים כדי להשליך מסה ריקה.

משוואות מפתח

$$\bar{x} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad \sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}_G$$

```
x=( m_ix_i)/( m_i), F_ext=m a_G
```

מרכז מסה

$$F = \dot{m}(v_{\text{out}} - v_{\text{in}})$$

```
F= m(v_out-v_in)
```

זרם יציב

$$F = \dot{m}v_e + (p_e - p_a)A_e$$

```
F= m v_e+(p_e-p_a)A_e
```

דחף רקטה

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f}$$

`Δ v=v_e(m_0)/(m_f)`

משוואת הרקטה האידיאלית

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 מצאו את מרכז המסה של 3 kg ב-x = 0 ו-5 kg ב-x = 4 m.

1. $\bar{x}$ = (3 × 0 + 5 × 4)/8 =.

תשובה: 2.5 m.

דוגמה 6.2 ערכים לדוגמה: מנוע שורף 250 kg/s עם פליטה במהירות 3000 m/s. מצאו את הדחף האידיאלי (הזניחו את איבר הלחץ).

1. $F = \dot{m} v_e = 250 \times 3000$.

תשובה: 750 kN (ערכים לדוגמה).

דוגמה 6.3 לשלב רקטה יש $v_e = 3000$ m/s והוא בוער עד שמסתו רבע ממסתו ההתחלתית. מצאו את ה-Δv האידיאלי.

1. $\Delta v = 3000 \ln 4$.

תשובה: 4,159 m/s.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. איזה יחס מסות m_0/m_f נותן Δv = 7800 m/s עם v_e = 3500 m/s (אידיאלי)?

   $m_0/m_f = e^{(7800/3500)} = e^{2.229} = 9.29$.

2. סילון מים בשטח 0.001 m² ב-20 m/s פוגע בקיר שטוח ונעצר. מצאו את הכוח.

   $F = \rho A v^2 = 1000 \times 0.001 \times 400 = 400$ N.

3. מחליקים של 50 kg ו-75 kg נדחפים זה מזה ממנוחה; המחליק של 75 kg נע ב-2 m/s. מצאו את מהירות האחר.

   $50v = 75 \times 2$, v = 3 m/s.

4. ערכים לדוגמה: רקטה של 50000 kg ממריאה בדחף של 750 kN. מצאו את תאוצתה ההתחלתית.

   a = (750000 − 490500)/50000 = 5.19 m/s² (ערכים לדוגמה).

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: רקטה דוחפת את האוויר.

בפועל: היא דוחפת את גזי הפליטה שלה; היא עובדת הכי טוב בריק.

מיתוס: הכפלת הדלק מכפילה את Δv.

בפועל: Δv גדל רק עם הלוגריתם של יחס המסות.

מיתוס: כוחות פנימיים יכולים להזיז את מרכז המסה.

בפועל: רק כוחות חיצוניים משנים את a_G.

כרטיסיות

מרכז מסה

Σm x/Σm.

תנועת מערכת

ΣF_ext = m a_G.

זרם יציב

F = ṁΔv.

דחף

ṁv_e + (p_e − p_a)A_e.

משוואת הטיל

Δv = v_e ln(m₀/m_f).

חלוקה לשלבים

השליכו מכלים ריקים כדי לשפר את יחס המסות.

בוחן לבדיקה עצמית

1. מרכז המסה של מערכת מוזז על ידי…

כוחות פנימיים

כוחות חיצוניים

שניהם

אף אחד מהם

כוחות חיצוניים. ΣF_ext = m a_G.

2. Δv אידיאלי של רקטה תלוי ב-v_e וב...

זמן הבעירה בלבד

יחס המסות

צפיפות האוויר

הצבע

יחס המסות. $\ln(m_0/m_f)$.

3. הדחף גדל עם...

ספיקת המסה ומהירות הפליטה

אורך הרקטה

המטען

הגובה בלבד

ספיקת המסה ומהירות הפליטה. $F = \dot{m}v_e +$ איבר לחץ.

4. מדוע לבנות רקטה בשלבים?

כדי שתיראה טוב יותר

כדי להשליך מסה ריקה

כדי להאט

כדי להוסיף גרר

כדי להשליך מסה ריקה. יחס מסות טוב יותר בכל שלב.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

כל לוויין תצפית על כדור הארץ נישא ברקטה המבוססת על יחידה זו. NASA Glenn מסביר שהדחף נובע מהחוק השלישי של ניוטון ותלוי בספיקת המסה דרך המנוע, במהירות היציאה של הפליטה ובלחץ ביציאת הנחיר. הפקת יותר Δv מכל קילוגרם דלק

פירושה שיגורים מעטים וקטנים יותר לאותם מטענים, כמו לווייני Landsat ולווייני מזג האוויר המנטרים יערות, יבולים וסופות.

ב־Saving Planets: מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

מקורות: OpenStax · NASA Glenn: Rocket thrust equation (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/) · UP1, 9.7 Rocket propulsion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-7-rocket-propulsion)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 9.6 Center of mass (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-6-center-of-mass): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 9.7 Rocket propulsion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-7-rocket-propulsion): משוואת הרקטה.
- NASA Glenn: Rocket thrust equation (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/): הסבר על הדחף.

צפו בהרצאה

Damped response of spring-mass-dashpot system to initial conditions (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/damped-response-of-spring-mass-dashpot-system-to-initial-conditions/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

קינמטיקה מישורית של גופים קשיחים

סיבוב סביב ציר קבוע, מהירות ותאוצה זוויתיות, תמסורות גלגלי שיניים, מהירות ותאוצה יחסיות בגופים קשיחים, מרכזים רגעיים, וגלגול ללא החלקה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- קשרו את ω ו-α למהירויות ולתאוצות של נקודות.
- השתמשו ביחסי גלגלי שיניים ורצועות.
- השתמשו במהירות יחסית ובמרכז הרגעי למנגנוני מוטות.
- תארו גלגול ללא החלקה.

מושגי מפתח

- בסיבוב סביב ציר קבוע, לנקודה ברדיוס r יש v = rω, a_t = rα ו-a_n = rω².
- גלגלי שיניים משולבים חולקים את מהירות המגע: $r_1\omega_1 = r_2\omega_2$, ולכן יחסי המהירות תואמים את מספרי השיניים.
- מהירות יחסית בגוף קשיח: v_B = v_A + ω × r_B/A; תאוצה יחסית מוסיפה α × r ו-−ω²r.
- המרכז הרגעי של מהירות אפס (IC) מאפשר להתייחס לגוף נע כסיבוב טהור לצורך המהירויות באותו רגע.
- גלגול ללא החלקה: v_G = rω ו-a_G = rα; נקודת המגע נמצאת רגעית במנוחה והנקודה העליונה נעה ב-2v_G.

משוואות מפתח

$$v = r\omega, \quad a_t = r\alpha, \quad a_n = r\omega^2$$

```
v=rω, a_t=rα, a_n=rω^2
```

סיבוב סביב ציר קבוע

$$r_1\omega_1 = r_2\omega_2$$

```
r_1ω_1=r_2ω_2
```

גלגלי שיניים ורצועות

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega} \times \vec{r}_{B/A}$$

```
v_B= v_A+ω× r_B/A
```

מהירות יחסית

$$v_G = r\omega$$

```
v_G=rω
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 גלגל ברדיוס 0.3 m מתגלגל ללא החלקה ב-15 m/s. מצאו את ω ואת מהירות הנקודה העליונה.

1. $\omega = v/r = 15/0.3$.
2. למעלה: $v = 2v_G$.

תשובה: $\omega = 50$ rad/s; הנקודה העליונה 30 m/s.

דוגמה 7.2 ערכים לדוגמה: רוטור של טורבינת רוח מסתובב ב-15 rpm ותיבת הילוכים ביחס 100 מניעה את הגנרטור. מצאו את מהירות הגנרטור ב-rpm וב-rad/s.

1. $n = 15 \times 100$.
2. $\omega = 1500 \times 2\pi/60$.

תשובה: 1500 rpm = 157.1 rad/s (ערכים לדוגמה).

דוגמה 7.3 מוט באורך 1 m מחליק כשקצה A על הרצפה נע ימינה ב-2 m/s וקצה B על קיר. מצאו את ω ואת v_B כשהמוט יוצר 30° עם הרצפה.

1. ה-IC נמצא בחיתוך האנכים ל-v_A ול-v_B; מרחקו מ-A הוא $L \sin 30° = 0.5$ m.
2. $\omega = v_A/0.5$; $v_B = \omega \times L \cos 30°$.

תשובה: $\omega = 4$ rad/s; $v_B = 3.46$ m/s כלפי מטה.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ערכים לדוגמה: רוטור של 60 m מסתובב ב-15 rpm. מצאו את מהירות קצה הלהב ואת התאוצה הנורמלית.

   $v = 60 \times 1.571 = 94.2$ m/s; $a_n = v^2/r = 148$ m/s² (ערכים לדוגמה).

2. גלגל תנופה מאיץ ממנוחה ל-3000 rpm ב-10 s עם α קבועה. מצאו את α.

   $\omega = 314.2$ rad/s; $\alpha = 31.4$ rad/s².

3. לדיסקה של 0.5 m יש $\omega = 2$ rad/s ו-$\alpha = 4$ rad/s². מצאו את התאוצה בשפה.

   $a_t = 2$, $a_n = 2$, $|a| = 2.83$ m/s².

4. גלגל שיניים בן 20 שיניים מניע גלגל בן 80 שיניים ב-1200 rpm. מצאו את מהירות המוצא.

.1200 × 20/80 = 300 rpm

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: כל נקודה בגלגל מתגלגל נעה באותה מהירות.

בפועל: נקודת המגע במנוחה והנקודה העליונה נעה ב-2v.

מיתוס: המהירות הזוויתית משתנה מנקודה לנקודה בגוף קשיח.

בפועל: ω זהה לכל הגוף.

מיתוס: ל-IC יש תאוצה אפס.

בפועל: רק מהירות אפס, באותו רגע.

כרטיסיות

ציר קבוע

.v = rω, a_t = rα, a_n = rω²

יחס תמסורת

.$\omega_2/\omega_1 = r_1/r_2 = N_1/N_2$

מהירות יחסית

.v_B = v_A + ω × r_B/A

מרכז רגעי

נקודה שמהירותה אפס ברגע נתון.

גלגול

.v_G = rω

rpm

.rad/s-ל × 2π/60

בוחן לבדיקה עצמית

1. מהירות נקודה ברדיוס r בגוף מסתובב:

ω/r

rω

rω²

r/ω

$v = r\omega$. $r\omega$.

2. גלגלי שיניים משולבים חולקים את אותה...

ω

מספר שיניים

מהירות מגע

רדיוס

מהירות מגע. $r_1\omega_1 = r_2\omega_2$.

3. נקודת המגע של גלגל המתגלגל ללא החלקה נעה ב...

v

$2v$

0

$r\omega^2$

0. ללא החלקה.

4. 1 rpm הוא בערך ב-rad/s...

0.1047

1

6.28

60

$2\pi/60$. 0.1047.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

טורבינת רוח היא שרשרת של גופים קשיחים מסתובבים. משרד האנרגיה האמריקאי מסביר שהרוטור מחובר לגנרטור ישירות, בטורבינה בהנעה ישירה, או דרך ציר ותיבת הילוכים שמאיצה את הסיבוב ומאפשרת גנרטור קטן יותר. קינמטיקת יחסי התמסורת ביחידה זו היא הדרך שבה מהנדסים מתאימים רוטור ענק ואיטי לגנרטור מהיר.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2

מקורות: משרד האנרגיה האמריקאי: איך פועלות טורבינות רוח? (באנגלית) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · OpenStax UP1, 10.3 Relating angular and translational quantities (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-3-relating-angular-and-translational-quantities)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 10.3 Relating angular and translational quantities (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-3-relating-angular-and-translational-quantities): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 11.1 Rolling motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-1-rolling-motion): גלגול.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): קינמטיקה של גוף קשיח מ-MIT.

צפו בהרצאה

Kinematics: describing the motion of particles and rigid bodies (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/kinematics-describing-the-motion-of-particles-and-rigid-bodies/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

קינטיקה מישורית של גופים קשיחים: כוח, מסה ותאוצה

מומנטי התמד של מסה, משפט הצירים המקבילים, משוואות תנועה להעתקה, לסיבוב סביב ציר קבוע ולתנועה מישורית כללית, וגלגול עם חיכוך.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו מומנטי התמד של מסה לצורות נפוצות.
- כתבו ΣF = ma_G ו-ΣM_G = I_Gα.
- פתרו בעיות סיבוב סביב ציר קבוע ובעיות גלגלות.
- פתרו בעיות גלגול ובדקו החלקה.

מושגי מפתח

- מומנט ההתמד של מסה I = ∫r² dm מודד התנגדות לתאוצה זוויתית. דיסקה מלאה ½mr², חישוק mr², כדור מלא ⅖mr², מוט סביב מרכזו mL²/12.
- משפט הצירים המקבילים: I = I_G + md².
- משוואות תנועה מישורית: ΣF_x = m a_Gx, ΣF_y = m a_Gy, ΣM_G = I_Gα (או ΣM_P = סכום המומנטים של הדיאגרמה הקינטית סביב נקודה P כלשהי).
- לגוף המתגלגל ללא החלקה במורד מדרון יש a = g sin θ/(1 + I_G/(mr²)); החיכוך הוא שגורם לסיבוב.
- בדקו גלגול עם f ≤ μ_sN; אם החיכוך הנדרש גדול יותר, הגוף מחליק ומתגלגל בבת אחת.

משוואות מפתח

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}_G, \quad \sum M_G = I_G\alpha$$

F=m a_G, M_G=I_Gα

תנועה מישורית

$$I = I_G + md^2$$

I=I_G+md^2

צירים מקבילים

$$a = \frac{g\sin\theta}{1 + I_G/(mr^2)}$$

a=(gθ)/(1+I_G/(mr^2))

גלגול במורד מדרון

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 דיסקה מלאה של 10 kg ברדיוס 0.2 m על ציר קבוע חשה מומנט של 4 N·m. מצאו את α.

1. $I = \tfrac{1}{2} \times 10 \times 0.2^2 = 0.2\ \text{kg·m}^2$.
2. $\alpha = M/I$.

תשובה: $20\ \text{rad/s}^2$.

דוגמה 8.2 גליל מלא מתגלגל ללא החלקה במורד מדרון של 30°. מצאו את תאוצתו ואת ה-μ_s הקטן ביותר שמונע החלקה.

1. $a = g \sin 30° / (1 + \tfrac{1}{2}) = (2/3) g \sin 30°$.
2. מומנטים סביב G: $fr = \tfrac{1}{2} mr^2 (a/r)$, ולכן $f = \tfrac{1}{2} ma = (1/3) mg \sin 30°$; $\mu_s \geq f/N = (1/3) \tan 30°$.

תשובה: $a = 3.27\ \text{m/s}^2$; $\mu_s \geq 0.192$.

דוגמה 8.3 מסה של 4 kg תלויה מחבל הכרוך על גלגלת דיסקה מלאה של 2 kg ברדיוס 0.1 m. מצאו את התאוצה ואת המתיחות.

1. מסה: $4g - T = 4a$. גלגלת: $Tr = \tfrac{1}{2} Mr^2 (a/r)$, ולכן $T = \tfrac{1}{2} Ma = a$.
2. $4g = 5a$.

תשובה: $a = 7.85\ \text{m/s}^2$; $T = 7.85\ \text{N}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את I של מוט של 3 kg באורך 2 m סביב קצה אחד.

   $I = mL^2/3 = 4\ \text{kg·m}^2$.

2. המוט מחובר בפרק בקצה אחד ומשוחרר ממצב אופקי. מצאו את α ברגע השחרור.

   $\alpha = 3g/(2L) = 7.36\ \text{rad/s}^2$.

3. ערכים לדוגמה: לגלגל טורבינה הידראולית יש $I = 5 \times 10^4\ \text{kg·m}^2$ ומומנט נטו של $1 \times 10^6\ \text{N·m}$ בהתנעה. מצאו את α.

   $\alpha = 20\ \text{rad/s}^2$ (ערכים לדוגמה).

4. מצאו את התאוצה של כדור מלא המתגלגל במורד מדרון של 30°.

   $a = (5/7)\ g \sin 30° = 3.50\ \text{m/s}^2$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: רק המסה מתנגדת לתאוצה זוויתית.

בפועל: חשוב היכן נמצאת המסה (I); חישוק מאיץ לאט יותר מדיסקה באותה מסה.

מיתוס: חיכוך תמיד מאט גלגל מתגלגל.

בפועל: בגלגול טהור החיכוך הסטטי אינו מבצע עבודה, והוא שגורם לגלגל להסתובב.

מיתוס: ΣM = Iα מתקיים סביב כל נקודה.

בפועל: השתמשו בו סביב G או ציר קבוע; סביב נקודות אחרות כללו את המומנט של ma_G.

כרטיסיות

מומנט התמד של מסה

.I = ∫r² dm

דיסקה, חישוק, כדור

.mr²⅖ ,½mr², mr²

Rod

.mL²/12 (מרכז), mL²/3 (קצה)

תנועה מישורית

.ΣF = ma_G, ΣM_G = I_Gα

a בגלגול

.g sin θ/(1 + I/(mr²))

בדיקת החלקה

.f ≤ μ_sN

בוחן לבדיקה עצמית

1. מי מגיע ראשון לתחתית המדרון?

חישוק

דיסקה מלאה

כדור מלא

כולם בתיקו

כדור מלא. ה-I/(mr²) הקטן ביותר.

2. I של דיסקה מלאה סביב צירה:

mr^2

$\frac{1}{2}mr^2$

mr^2 $\frac{2}{5}$

$mL^2/12$

$\frac{1}{2}mr^2$. תוצאה סטנדרטית.

3. משפט הצירים המקבילים מוסיף...

md^2

mr

I/d

d^2

$I = I_G + md^2$. md^2.

4. הצורה הסיבובית של חוק ניוטון:

$M = I\alpha$

$M = m\alpha$

$F = I\omega$

$P = I\alpha$

$M = I\alpha$. סביב G או ציר קבוע.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

טורבינות מים הן גופים קשיחים שהמים מסובבים. משרד האנרגיה האמריקאי מתאר שתי משפחות עיקריות: טורבינות ריאקציה, כמו פרנסיס וקפלן, הפועלות בתוך זרם המים ומנצלות לחץ ומים בתנועה, וטורבינות מתקף, כמו גלגל פלטון, שכפותיו נפגעות

מסילונים חופשיים. DOE מציין שטורבינות פרנסיס משמשות בדרך כלל למפלי גובה של כ-130 עד 2000 רגל. קביעת מומנט ההתמד והמומנט של הגלגל היא הקינטיקה של יחידה זו.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2

מקורות: OpenStax UP1, 10.7 · U.S. DOE: Types of hydropower turbines (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines) Newton’s second law for rotation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-7-newtons-second-law-for-rotation)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 10.5 Calculating moments of inertia (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-5-calculating-moments-of-inertia): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 10.7 Newton’s second law for rotation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-7-newtons-second-law-for-rotation): דינמיקה סיבובית.
- PhET: Torque (https://phet.colorado.edu/en/simulations/torque): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Angular momentum for rigid bodies and the mass moment of inertia matrix, [I] (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/angular-momentum-for-rigid-bodies-and-the-mass-moment-of-inertia-matrix-i/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

גופים קשיחים: שיטות אנרגיה ותנע

אנרגיה קינטית של גופים קשיחים בהעתקה, בסיבוב ובגלגול, עבודה של זוגות כוחות, הספק במכונות מסתובבות, מתקף ותנע זוויתיים, ושימור תנע זוויתי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- כתבו T = ½mv_G² + ½I_Gω².
- השתמשו בעבודה–אנרגיה לגופים מתגלגלים ומסתובבים סביב פרק.
- חשבו הספק של מכונה מסתובבת P = Mω.
- להחיל שימור תנע זוויתי.

מושגי מפתח

- האנרגיה הקינטית של גוף קשיח היא T = ½mv_G² + ½I_Gω²; בגלגול חלק מהאנרגיה הולך לסיבוב.
- זוג כוחות M המסתובב בזווית θ מבצע עבודה Mθ; ההספק הוא P = Mω.
- התנע הזוויתי סביב G הוא H_G = I_Gω. מתקף זוויתי–תנע זוויתי: I_Gω₁ + ∫M dt = I_Gω₂.
- אם שום מומנט חיצוני אינו פועל סביב ציר, ω I נשמר: קירוב המסה פנימה מגביר את הסיבוב.
- גלגל תנופה אוגר אנרגיה ½Iω²; סיבובו מהר פי שניים אוגר פי ארבעה אנרגיה.

משוואות מפתח

$$T = \tfrac{1}{2} m v_G^2 + \tfrac{1}{2} I_G \omega^2$$

T=12mv_G^2+12I_Gω^2

אנרגיה קינטית של גוף קשיח

$$U = M\theta, \quad P = M\omega$$

U=Mθ, P=Mω

עבודה והספק של זוג כוחות

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$$

I_1ω_1=I_2ω_2

שימור תנע זוויתי

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1 + I_G/(mr^2)}}$$

`v=(2gh)/(1+I_G/(mr^2))`

גלגול מגובה h

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 גלגל תנופה עם $I = 10\ \text{kg·m}^2$ מסתובב ב-$300\ \text{rad/s}$. מצאו את האנרגיה האגורה בו ב-J וב-kWh.

1. $T = \tfrac{1}{2} \times 10 \times 300^2$.
2. $\div\ 3.6 \times 10^6$.

תשובה: $450\ \text{kJ} = 0.125\ \text{kWh}$.

דוגמה 9.2 כדור מלא מתגלגל ללא החלקה ממנוחה ויורד גובה של $2\ \text{m}$. מצאו את מהירותו.

1. $mgh = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}(\tfrac{2}{5}mr^2)(v/r)^2 = (7/10)mv^2$.
2. $v = \sqrt{(10gh/7)}$.

תשובה: $5.29\ \text{m/s}$.

דוגמה 9.3 מחליקה מסתובבת ב-$2\ \text{rad/s}$ עם $I = 4\ \text{kg·m}^2$, ואז מקרבת את זרועותיה ל-$I = 1.6\ \text{kg·m}^2$. מצאו את קצב הסיבוב החדש.

1. $4 \times 2 = 1.6\omega$.

תשובה: $5\ \text{rad/s}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. גליל מלא מתגלגל ממנוחה ויורד גובה של $2\ \text{m}$. מצאו את מהירותו.

   $v = \sqrt{(4gh/3)} = 5.11\ \text{m/s}$.

2. דיסקה מלאה של $20\ \text{kg}$ ברדיוס $0.5\ \text{m}$ מסתובבת ב-$100\ \text{rad/s}$. מצאו את האנרגיה הקינטית שלה.

   $I = 2.5\ \text{kg·m}^2$; $T = 12.5\ \text{kJ}$.

3. מוט באורך $2\ \text{m}$ המחובר בפרק בקצה אחד משוחרר ממצב אופקי. מצאו את ω כשהוא תלוי אנכית.

   $mg(L/2) = \tfrac{1}{2}(mL^2/3)\omega^2$, $\omega = \sqrt{(3g/L)} = 3.84\ \text{rad/s}$.

4. ערכים לדוגמה: ציר טורבינה נושא 1×10^6 N·m ב-150 rpm. מצאו את ההספק.

$\omega = 15.7$ rad/s; $P = M\omega = 15.7$ MW (ערכים לדוגמה).

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: לכדור מתגלגל יש רק אנרגיה קינטית $\frac{1}{2}mv^2$.

בפועל: הוסיפו $\frac{1}{2}I\omega^2$ עבור הסיבוב.

מיתוס: קירוב הזרועות מוסיף אנרגיה יש מאין.

בפועל: השרירים שלכם מבצעים את העבודה; התנע הזוויתי נשמר, לא האנרגיה הקינטית.

מיתוס: מומנט והספק הם אותו דבר.

בפועל: $P = M\omega$; אותו מומנט נותן יותר הספק במהירות גבוהה יותר.

כרטיסיות

T של גוף קשיח

$\frac{1}{2}mv_G^2 + \frac{1}{2}I_G\omega^2$.

עבודת זוג כוחות

$U = M\theta$.

הספק ציר

$P = M\omega$.

תנע זוויתי

$H_G = I_G\omega$.

שימור

$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$.

גלגל תנופה

אוגר $\frac{1}{2}I\omega^2$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. האנרגיה הקינטית של גוף מתגלגל כוללת...

- רק $\frac{1}{2}mv^2$
- רק $\frac{1}{2}I\omega^2$
- את שני האיברים
- mgh

את שני האיברים. העתקה ועוד סיבוב.

2. הספק של ציר מסתובב:

Mω

M/ω

Iω

mv

.Mω. P = Mω

3. הקטנת I בחצי ללא מומנט חיצוני הופכת את ω ל...

חצי

אותו דבר

כפול

פי ארבעה

כפול. Iω קבוע.

4. הכפלת מהירות גלגל תנופה מכפילה את האנרגיה שלו ב...

2

4

8

2√

.4. ω²

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

אנרגיה הידרואלקטרית היא שרשרת אנרגיה מגובה לסיבוב לחשמל. משרד האנרגיה האמריקאי מסביר שהמים זורמים בצינור הנקרא צינור לחץ, מסובבים את להבי הטורבינה, והטורבינה מסובבת גנרטור שמפיק חשמל לרשת. משוואות העבודה–אנרגיה וההספק ביחידה זו, מ-mgh ועד P = Mω, מתארות כל חוליה בשרשרת הזו.

ב־Saving Planets: פיזיקה 2

מקורות: OpenStax UP1, 11.3 · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works) Conservation of angular momentum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-3-conservation-of-angular-momentum)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 11.1 Rolling motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-1-rolling-motion): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 11.3 Conservation of angular momentum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-3-conservation-of-angular-momentum): תנע זוויתי.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): הרצאות MIT.

צפו בהרצאה

Angular momentum for rigid bodies and the mass moment of inertia matrix, [I] (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/angular-momentum-for-rigid-bodies-and-the-mass-moment-of-inertia-matrix-i/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

תנודות מכניות

תנודות חופשיות לא מרוסנות, תדירות טבעית, שיטות אנרגיה, ריסון צמיג ויחס ריסון, תנודות מאולצות, תהודה והגברה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מצאו תדירויות טבעיות של מערכות מסה-קפיץ ומטוטלות.
- השתמשו ביחס הריסון כדי לסווג את התנועה, והעריכו אותו מהדעיכה.
- מצאו את משרעת המצב היציב של תנודה מאולצת.
- הסבירו תהודה ומדוע ריסון נמוך מסוכן.

מושגי מפתח

- מסה על קפיץ מקיימת mẍ + kx = 0 ומתנודדת ב-ω_n = √(k/m); זמן המחזור הוא T = 2π/ω_n. למטוטלת פשוטה ω_n = √(g/L) לתנודות קטנות.
- עם ריסון צמיג, mẍ + cẋ + kx = 0. יחס הריסון ζ = c/(2√(km)) קובע את ההתנהגות: ζ < 1 מתנודד ודועך, ζ = 1 קריטי, ζ > 1 חוזר לאט.
- הדקרמנט הלוגריתמי δ = ln(x₁/x₂) בין שיאים עוקבים נותן ζ ≈ δ/(2π) לריסון קל.
- כוח הרמוני F₀ sin ωt יוצר תגובה יציבה במשרעת X = (F₀/k)/√((1 − r²)² + (2ζr)²), עם r = ω/ω_n.
- בתהודה (r = 1) ההגברה היא 1/(2ζ): בריסון קל, דחיפה קטנה החוזרת בקצב הנכון בונה תנועה גדולה.

משוואות מפתח

$$\omega_n = \sqrt{k/m}, \quad T = 2\pi/\omega_n$$

ω_n=√/m, T=2π/ω_n

תדירות טבעית

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad \omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

ζ=c/2√km, ω_d=ω_n√1-ζ^2

ריסון

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}, \quad r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

X=F_0/k/√(1-r^2)^2+(2ζr)^2, r=ω/ω_n

תגובה מאולצת

$$\left.\frac{X}{F_0/k}\right|_{r=1} = \frac{1}{2\zeta}$$

. (X)/(F_0/k)|_r=1=12

הגברה בתהודה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 מסה של 2 kg תלויה על קפיץ עם k = 800 N/m. מצאו את ω_n, f ו-T.

1. ω_n = √(800/2) = 20 rad/s.
2. f = ω_n/(2π); T = 1/f.

תשובה: 20 rad/s, 3.18 Hz, 0.314 s.

דוגמה 10.2 הוסיפו מרסן עם c = 8 N·s/m. מצאו את ζ ואת התדירות המרוסנת.

1. ζ = 8/(2√(800 × 2)) = 8/80.
2. ω_d = 20√(1 − 0.01).

תשובה: ζ = 0.1; ω_d = 19.9 rad/s.

דוגמה 10.3 המערכת הלא מרוסנת מעוררת בכוח F_0 = 10 N ב-15 rad/s. מצאו את המשרעת היציבה.

1. F_0/k = 12.5 mm; r = 0.75.
2. X = 12.5/(1 − 0.5625).

תשובה: 28.6 mm.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מצאו את זמן המחזור של מטוטלת פשוטה באורך 1 m.

   T = 2π√(1/9.81) = 2.01 s.

2. מכונה שוקעת 10 mm על התומכות שלה. העריכו את התדירות הטבעית שלה.

   ω_n = √(g/δ) נותן f = 4.98 Hz.

3. מצאו את ההגברה בתהודה עבור $\zeta = 0.02$.

$1/(2 \times 0.02) = 25$.

4. שני שיאים עוקבים של תנודה חופשית הם 10 mm ו-7 mm. העריכו את ζ.

$\delta = \ln(10/7) = 0.357$; $\zeta \approx \delta/(2\pi) = 0.057$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מסה כבדה יותר מתנודדת מהר יותר.

בפועל: $\omega_n = \sqrt{(k/m)}$: יותר מסה, תדירות נמוכה יותר.

מיתוס: יותר ריסון פירושו תמיד יותר בטיחות.

בפועל: הוא מנמיך את שיאי התהודה אך גם מעביר יותר כוח בתדירות גבוהה.

מיתוס: זמן המחזור של מטוטלת תלוי במשקל המשקולת.

בפועל: לתנודות קטנות, רק ב-L וב-g.

כרטיסיות

תדירות טבעית

$\omega_n = \sqrt{(k/m)}$.

מטוטלת

$\omega_n = \sqrt{(g/L)}$.

יחס ריסון

$\zeta = c/(2\sqrt{(km)})$.

דקרמנט לוגריתמי

$\zeta \approx \ln(x_1/x_2)/(2\pi)$.

יחס תדירויות

$r = \omega/\omega_n$.

תהודה

$X/(F_0/k) = 1/(2\zeta)$ ב-$r = 1$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. תדירות טבעית של מערכת מסה-קפיץ:

$\sqrt{(m/k)}$

$\sqrt{(k/m)}$

k/m

km

ω_n = √(k/m). √(k/m).

2. ריסון קריטי הוא ζ =

0

0.5

1

2

1. החזרה המהירה ביותר ללא תנודה.

3. בתהודה עם ζ = 0.05, ההגברה היא…

5

10

20

0.1

10. 1/(2ζ).

4. עירור הרבה מעל ω_n (r ≫ 1) הופך את התגובה ל…

עצומה

קטנה

בתדירות אפס

קריטית

קטנה. 0 → X כש-r גדל.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

התהודה קובעת אילו בניינים שורדים רעידות אדמה. IRIS (כיום EarthScope) מסבירה שלכל בניין יש זמן מחזור טבעי, הזמן שלוקח לו להתנדנד הלוך ושוב, וכשתנועת הקרקע תואמת אותו הבניין עובר את התנודות הגדולות ביותר ואת הנזק הכבד ביותר. מחקר של USGS על 41 בניינים גבוהים מצא יחסי ריסון נמוכים בבירור מ-3%, ונוסחת ההגברה ביחידה זו מראה מדוע ריסון נמוך הופך תהודה למסוכנת. מהנדסים מכוונים את זמני המחזור ומוסיפים ריסון כדי שבתים, בתי חולים ותשתיות יישארו עומדים.

ב־Saving Planets: פתרונות

מקורות: IRIS/EarthScope: Building resonance (https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/224) · USGS: Natural periods and damping of tall buildings (Çelebi, 2022) (https://www.usgs.gov/publications/preliminary-study-correlation-natural-periods-and-damping-percentages-tall-buildings)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP1, 15.1 Simple harmonic motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-1-simple-harmonic-motion): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP1, 15.5 Damped oscillations (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-5-damped-oscillations): ריסון.
- OpenStax UP1, 15.6 Forced oscillations (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-6-forced-oscillations): תהודה.
- PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): אינטראקטיבי.
- PhET: Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab): אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Lecture 19: Introduction to Mechanical Vibration (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/lecture-19-introduction-to-mechanical-vibration-1/) (באנגלית)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

התרגילים האלה נמצאים בתוך כל יחידה. פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה.

1. קינמטיקה של חלקיקים בקו ישר
   4 תרגילים
2. תנועה עקומה: קליעים, קואורדינטות נורמליות–משיקיות וקוטביות
   4 תרגילים
3. קינטיקה של חלקיקים: החוק השני של ניוטון
   4 תרגילים

4. עבודה, אנרגיה והספק
   4 תרגילים
5. מתקף, תנע והתנגשות
   4 תרגילים
6. מערכות חלקיקים ומסה משתנה: סילונים ורקטות
   4 תרגילים
7. קינמטיקה מישורית של גופים קשיחים
   4 תרגילים
8. קינטיקה מישורית של גופים קשיחים: כוח, מסה ותאוצה
   4 תרגילים
9. גופים קשיחים: שיטות אנרגיה ותנע
   4 תרגילים
10. תנודות מכניות
    4 תרגילים

המעבדה (Dynamics lab)

המעבדה היא החלק המעשי של הקורס. כאן היא חינמית ולתרגול בלבד, ללא נקודות זכות.

כל מעבדה אפשר לבצע בסימולציית PhET חינמית או עם חפצים ביתיים. גלגלו והפילו רק חפצים רכים וקלים, פנו את הרצפה ולעולם אל תשגרו דבר לעבר אנשים, חיות מחמד או חלונות.

מקור בטיחות: OSHA: Hand and power tools (https://www.osha.gov/hand-power-tools)

מעבדה A: תאוצה קבועה על מדרון

שבוע 2

מטרה: מדדו מיקום כפונקציה של זמן עבור כדור המתגלגל במדרון מתון, הראו ש-x גדל כמו t², וחלצו את התאוצה.

$$x = \tfrac{1}{2} a t^2$$

x=12at^2

ממנוחה; שרטטו x כפונקציה של t² לקבלת קו ישר בשיפוע a/2

מהלך הניסוי

1. הרימו קצה אחד של קרש ארוך על ספר ליצירת שיפוע מתון; סמנו 0.25, 1.0, 2.25 ו-4.0 m (או סימונים מוקטנים).
2. שחררו כדור ממנוחה וצלמו אותו בהילוך איטי בטלפון; קראו את הזמן בכל סימון.
3. שרטטו x כפונקציה של t² והתאימו קו דרך הראשית; a = 2 × שיפוע.
4. רשות: השוו ל-PhET או ל-a = (5/7) g sin θ עבור כדור מלא מתגלגל.

טבלת נתונים

t (s)	x (m) עבור a = 0.5 m/s²
1	0.25
2	1.00
3	2.25
4	4.00

ערכים לדוגמה עבור a = 0.5 m/s²; השיפוע שלכם קובע את ה-a שלכם.

חישוב לדוגמה

1. בכל שורה, x/t² = 0.25 m/s² ולכן a = 0.50 m/s².
2. הכפלת הזמן מכפילה את המרחק פי ארבעה.
3. עבור כדור מלא, a = 0.5 m/s² דורש sin θ = 0.5 × 7/(5 × 9.81), θ = 4.1°.

בטיחות

- פנו את הרצפה במקום שבו הכדור מסיים; השתמשו בכדור רך.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל המעבדה ביתית.

PhET: Ladybug Motion 2D (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ladybug-motion-2d)

הקשר לכדור הארץ: נתוני תאוצה מדודים כאלה מזינים את מבחני מחזורי הנסיעה המדרגים את יעילות האנרגיה של מכוניות.

FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה B: טווח קליע וזווית שיגור

שבוע 3

מטרה: מדדו כיצד הטווח תלוי בזווית השיגור והשוו ל-$R = v_0^2 \sin 2\theta / g$.

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

R=(v_0^22θ)/(g)

קרקע מישורית, ללא גרר

מהלך הניסוי

1. פתחו את PhET Projectile Motion, כבו את התנגדות האוויר, קבעו $v_0 = 10$ m/s וגובה שיגור 0.
2. שגרו ב-15°, 30°, 45°, 60° ו-75° ורשמו את הטווח.
3. שרטטו R כפונקציה של sin 2θ; השיפוע צריך להיות $v_0^2/g = 10.19$ m.
4. הפעילו את התנגדות האוויר ושימו לב איזו זווית נותנת כעת את הטווח הארוך ביותר.

טבלת נתונים

θ (°)	R (m)
15	5.10
30	8.83
45	10.19
60	8.83
75	5.10

ערכים מחושבים מהנוסחה עם $g = 9.81$ m/s².

חישוב לדוגמה

1. זוויות משלימות (15° ו-75°, 30° ו-60°) נותנות אותו טווח.
2. מקסימום ב-45°: $R = v_0^2/g = 10.19$ m.

בטיחות

- אין מעבר לשימוש רגיל במחשב; אם תנסו גרסה ביתית, זרקו רק כדורים רכים ולעולם לא לעבר אנשים.

חלופה ביתית או וירטואלית

- רשות: זרקו כדור רך בזוויות משוערות בחצר ומדדו את הטווחים; גרר וגובה שיגור הופכים זאת לפחות מדויק.

PhET: Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion)

הקשר לכדור הארץ: אותן משוואות, בתוספת גרר, משמשות לתכנון מסלולי העלייה של רקטות המציבות במסלול לווייני תצפית על כדור הארץ. NASA: International Space Station facts and figures (https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה C: קפיצות, התנגשויות ומקדם התקומה

שבוע 7

מטרה: מצאו את e לכדור קופץ מגובהי הקפיצה, ובדקו שימור תנע בהתנגשויות מדומות.

$$e = \sqrt{h_2 / h_1}$$

e=_2/h_1

כדור המופל על רצפה כבדה

מהלך הניסוי

1. הפילו כדור מ-1.0 m מול סרט מדידה וצלמו אותו; קראו את גובהי שלוש הקפיצות הראשונות.
2. חשבו את e לכל קפיצה.
3. ב-PhET Collision Lab, התנגשו 2 kg ב-5 m/s עם 3 kg במנוחה בגמישות 80% והשוו את המהירויות הסופיות לדוגמה מיחידה 5.
4. חזרו בגמישות 0% ו-100% והשוו את התנע הכולל ואת האנרגיה הקינטית לפני ואחרי.

טבלת נתונים

קפיצה	גובה (m)	e
נפילה	1.00	—
1	0.64	0.80
2	0.41	0.80
3	0.26	0.80

ערכים לדוגמה לכדור עם $e \approx 0.8$.

חישוב לדוגמה

1. $e = \sqrt{(0.64/1.00)} = 0.80$; $\sqrt{(0.41/0.64)} = 0.80$; $\sqrt{(0.26/0.41)} = 0.80$.
2. סימולציה ב-$v_1' = -0.4$ m/s, 80%: $v_2' = 3.6$ m/s; תנע 10 kg·m/s לפני ואחרי.

בטיחות

- השתמשו בכדור רך והרחיקו חפצים שבירים.

חלופה ביתית או וירטואלית

- חלק הקפיצות הוא הגרסה הביתית.

PhET: Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab)

הקשר לכדור הארץ: ניסוי DART של NASA היה התנגשות מתוכננת; מדידת העברת התנע בפגיעות היא הבסיס לתכנון הגנה פלנטרית. NASA: DART impact changed asteroid's motion in space (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה D: מרוץ הגלגול

שבוע 11

מטרה: הריצו כדור, פחית מלאה וטבעת באותו מדרון והסבירו את הסדר באמצעות $a = g \sin\theta/(1 + I/(mr^2))$.

$$a = \frac{g\sin\theta}{1 + I_G/(mr^2)}, \quad t = \sqrt{2L/a}$$

`a=(gθ)/(1+I_G/(mr^2)), t=2L/a`

גלגול ממנוחה לאורך L

מהלך הניסוי

1. הציבו קרש ב-10° (מד שיפוע בטלפון) וסמנו מסלול של 1 m.
2. שחררו זוגות יחד: כדור מלא מול פחית מרק מלאה, פחית מלאה מול טבעת או פחית ריקה (דופן דקה).
3. צלמו את הסיומים ותזמנו כל ריצה; חזרו שלוש פעמים.
4. השוו לזמנים החזויים.

טבלת נתונים

גוף	$I/(mr^2)$	a (m/s²)	t על 1 m (s)
כדור מלא	0.4	1.22	1.28
גליל מלא	0.5	1.14	1.33
טבעת	1.0	0.852	1.53

ערכים מחושבים עבור $\theta = 10°$ וגלגול ללא החלקה; פחית מרק מלאה מתנהגת רק בקירוב כמו גליל מלא כי הנוזל יכול לנוע.

חישוב לדוגמה

1. כדור: $a = 9.81 \sin 10°/1.4 = 1.22$ m/s²; $t = \sqrt{(2/1.22)} = 1.28$ s.
2. טבעת: $a = 9.81 \sin 10°/2 = 0.852$ m/s²; $t = 1.53$ s.
3. המסה והרדיוס מצטמצמים: רק מקדם הצורה משנה.

> **בטיחות**
>
> - תפסו את הגופים בתחתית; אל תכניסו אצבעות מתחת לפחיות כבדות.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל המעבדה ביתית.

PhET: Torque (https://phet.colorado.edu/en/simulations/torque)

הקשר לכדור הארץ: מיקום המסה של רוטור משנה את מהירות ההאצה שלו, וזה חשוב לטורבינות רוח ומים. U.S. DOE: Types of hydropower turbines (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה E: זמן מחזור מטוטלת ו-g

שבוע 13

מטרה: מדדו את זמן המחזור של מטוטלת פשוטה בכמה אורכים ומצאו את g מהתאמה.

$$T = 2\pi\sqrt{L/g} \;\Rightarrow\; T^2 = \frac{4\pi^2}{g}L$$

T=2π/g\ \ T^2=(4π^2)/(g)L

שרטטו T² כפונקציה של L

מהלך הניסוי

1. קשרו משקולת קטנה לחוט ותלו אותה ממשקוף דלת. קבעו L (עד מרכז המשקולת) ל-0.25, 0.50 ו-1.00 m.
2. הסיטו אותה כ-10° ותזמנו 10 תנודות; חלקו ב-10.
3. שרטטו T² כפונקציה של L והתאימו קו דרך הראשית; g = 4π²/שיפוע.
4. בדקו ב-PhET Pendulum Lab שהמסה אינה משנה את זמן המחזור.

טבלת נתונים

L (m)	T (s)
0.25	1.003
0.50	1.419
1.00	2.006

ערכים מחושבים עבור g = 9.81 m/s²; נוסחת זוויות קטנות.

חישוב לדוגמה

1. בכל שורה, ולכן $g = 4\pi^2/4.024 = 9.81$ m/s². $T^2/L = 4.024$ s²/m
2. הגדלת L פי ארבעה מכפילה את T.

בטיחות

- השתמשו במשקולת קלה והרחיקו את הנדנוד מהפנים.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל המעבדה ביתית.

PhET: Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab)

הקשר לכדור הארץ: לכל בניין יש גם זמן מחזור טבעי; התאמתו לרעידת הקרקע היא מה שהופך רעידות אדמה למסוכנות.

IRIS/EarthScope: Building resonance (https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/224)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה F: תנודת מסה-קפיץ וריסון

שבוע 14

מטרה: מדדו תדירות טבעית כפונקציה של מסה, והעריכו את יחס הריסון משיאים דועכים.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}, \quad \zeta \approx \frac{\ln(x_1/x_2)}{2\pi}$$

```
f=(1)/(2π)/m, ≈((x_1/x_2))/(2π)
```

תדירות טבעית ודקרמנט לוגריתמי

מהלך הניסוי

1. ב-PhET Masses and Springs, קבעו קפיץ של 10 N/m ותלו 100, 200 ו-400 g; תזמנו 10 תנודות לכל אחת.
2. הפעילו ריסון, שחררו, וקראו שלושה גובהי שיא עוקבים מהסרגל.
3. בבית: תלו שקית מטבעות על גומייה או קפיץ רך וחזרו עם שעון העצר של הטלפון.
4. שרטטו f כפונקציה של 1/√m.

טבלת נתונים

m (kg)	f (Hz) עבור k = 10 N/m
0.1	1.592
0.2	1.125
0.4	0.796

ערכים מחושבים מהנוסחה; להלן משמשים שיאי ריסון לדוגמה של 10, 8 ו-6.4 cm.

חישוב לדוגמה

1. הגדלת m פי ארבעה מחצה את f: 0.796 Hz → 1.592.
2. שיאים 6.4 cm → 8 → 10: δ = ln 1.25 = 0.223, ζ ≈ 0.0355.
3. עם ζ = 0.0355, ההגברה בתהודה הייתה 1/(2ζ) = 14.1.

בטיחות

- גומיות עלולות להיקרע; הרכיבו משקפיים ושמרו על מסה קטנה.

חלופה ביתית או וירטואלית

- שלב הגומייה הוא הגרסה הביתית.

PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs)

הקשר לכדור הארץ: מדידות USGS מראות שלבניינים גבוהים יש מעט ריסון, ולכן מהנדסים מוסיפים מרסנים כדי לצמצם תנועת תהודה. USGS: Natural periods and damping of tall buildings (Çelebi, 2022) (https://www.usgs.gov/publications/preliminary-study-correlation-natural-periods-and-damping-percentages-tall-buildings)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

סט תרגול לבחינת אמצע (יחידות 5–1)

1. מכונית מאיצה ממנוחה ב-2.5 m/s² עד 30 m/s. מצאו את הזמן ואת המרחק.

.1 $t = v/a;\ x = v^2/(2a)$.

תשובה: 12 s; 180 m.

2. כדור משוגר ב-25 m/s ובזווית 40° מעל קרקע מישורית. מצאו את הטווח.

.1 $R = v_0^2 \sin 80°/g$.

תשובה: 62.7 m.

3. גוש של 5 kg נמשך בכוח 40 N על רצפה עם $\mu_k = 0.2$. מצאו את תאוצתו.

.1 $a = (40 - 0.2 \times 49.05)/5$.

תשובה: 6.04 m/s².

4. מסה של 1 kg נופלת 5 m על קפיץ ($k = 2000$ N/m). מצאו את הכיווץ המרבי.

.1 $mg(5 + x) = \tfrac{1}{2}kx^2$, ולכן $1000x^2 - 9.81x - 49.05 = 0$.

תשובה: 0.226 m.

5. כדור של 0.06 kg ב-50 m/s נעצר תוך 0.005 s. מצאו את הכוח הממוצע.

.1 $F = m\Delta v/\Delta t$.

תשובה: 600 N.

מערך תרגול מסכם (כל היחידות)

1. לשלב עם $v_e = 2800$ m/s יש $m_0/m_f = 3$. מצאו את ה-Δv האידאלי.

.1 $\Delta v = v_e \ln 3$.

תשובה: 3,076 m/s.

2. גלגל ברדיוס 0.4 m מתגלגל ללא החלקה ב-20 m/s. מצאו את ω.

   1. ω = v/r.

תשובה: 50 rad/s.

3. דיסקה מלאה של 4 kg ברדיוס 0.25 m חווה מומנט של 2 N·m. מצאו את α.

   1. I = ½mr² = 0.125 kg·m².

תשובה: 16 rad/s².

4. טבעת מתגלגלת ללא החלקה ממנוחה ויורדת גובה של 1.5 m. מצאו את מהירותה.

   1. mgh = mv² לטבעת, v = √(gh).

תשובה: 3.84 m/s.

5. מסה של 5 kg על קפיץ עם k = 1250 N/m. מצאו את ω_n ואת f.

   1. ω_n = √(k/m).

תשובה: 15.8 rad/s; 2.52 Hz.

6. מצאו את ההגברה בתהודה עבור ζ = 0.05.

   1. 1/(2ζ).

תשובה: 10.

דף נוסחאות

$$v = dx/dt,\ a = dv/dt,\ a\,dx = v\,dv$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

$$R = v_0^2 \sin 2\theta / g$$

$$a_n = v^2/\rho,\ a_t = \dot{v}$$

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2,\ a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}$$

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

$$T_1 + \sum U = T_2,\ P = \vec{F}\cdot\vec{v}$$

$$m\vec{v}_1 + \int \vec{F}dt = m\vec{v}_2,\ e = (v_2' - v_1')/(v_1 - v_2)$$

$$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$$

$$v = r\omega,\ a_t = r\alpha,\ a_n = r\omega^2$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega} \times \vec{r}_{B/A}$$

$$\sum M_G = I_G\alpha,\ I = I_G + md^2$$

$$T = \tfrac{1}{2}mv_G^2 + \tfrac{1}{2}I_G\omega^2,\ P = M\omega$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m},\ \zeta = c/(2\sqrt{km})$$

$$X = (F_0/k)/\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}$$

קבועים

קבוע	ערך
תאוצת הכובד התקנית, g	9.80665 m/s² (אנו משתמשים ב-9.81 m/s²)
הפרמטר הכבידתי של כדור הארץ, GM (מעוגל)	3.986 × 10¹⁴ m³/s²
רדיוס כדור הארץ הממוצע (מעוגל)	6371 km
1 סיבוב לדקה	2π/60 = 0.1047 rad/s
1 קילוואט-שעה	3.6 × 10⁶ J
1 מייל	1.609 km

מקור: NIST: Standard acceleration of gravity (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gn)

טקסטים וסימולציות בחינם

השתמשו בספרים, בהרצאות ובסימולציות החינמיים האלה לצד הקורס.

- OpenStax University Physics Volume 1 (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-1-position-displacement-and-average-velocity): ספר לימוד חינמי לצד הפיזיקלי של הקורס.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): הרצאות, מטלות ומבחנים של MIT בחינם.
- MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics (באנגלית) (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/): הרצאות מכניקה חינמיות של MIT.
- PhET: Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion): מסלולים.
- PhET: Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab): תנע ופגיעות.
- PhET: Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): תנודות וריסון.

מילון מונחים

תנע זוויתי
H = r × mv לחלקיק; I_Gω לגוף קשיח בתנועה מישורית.

מקדם החזר
היחס בין מהירות ההתרחקות למהירות ההתקרבות בפגיעה.

תאוצת קוריוליס

האיבר $2\dot{r}\dot{\theta}$ בקואורדינטות קוטביות.

יחס ריסון

$\zeta = c/(2\sqrt{(km)})$; הערך 1 הוא הקריטי.

מתקף

אינטגרל הכוח לאורך הזמן.

מרכז רגעי

נקודה בגוף שמהירותה אפס ברגע נתון.

דיאגרמה קינטית

סקיצה המראה את ma_G ואת $I_G\alpha$.

דקרמנט לוגריתמי

ln של היחס בין שיאים עוקבים.

מומנט התמד של מסה

$I = \int r^2\, dm$.

תדירות טבעית

תדירות התנודה החופשית, $\sqrt{(k/m)}$.

תאוצה נורמלית

v^2/ρ, לכיוון מרכז העקמומיות.

הספק

קצב ביצוע עבודה, $F\cdot v$ או $M\omega$.

קליע

גוף הנע תחת כבידה בלבד.

תהודה

תגובה גדולה כשהעירור תואם תדר טבעי.

משוואת הטיל

$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$.

גלגול ללא החלקה

$v_G = r\omega$; נקודת המגע במנוחה.

תאוצה משיקית

dv/dt לאורך המסלול.

עקרון עבודה–אנרגיה

$T_1 + \Sigma U = T_2$.

מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

רמה	איך זה נראה
4 · שליטה מלאה	בוחר קואורדינטות ואת השיטה הטובה ביותר (כוחות, אנרגיה או תנע), משרטט דיאגרמות גוף חופשי וקינטיות, ובודק יחידות ומקרי קצה.
3 · מיומן	פותר את תרגילי האימון עם טעויות סימן או יחידות מדי פעם.
2 · מתפתח	עוקב אחר דוגמאות פתורות אך מבלבל בין שיטות או שוכח איברי סיבוב.
1 · מתחיל	מציב מספרים בנוסחאות ללא דיאגרמות; צריך לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

חלק	משקל
תרגילים	25%
מעבדות	20%
מערך תרגול לאמצע הקורס	25%
מערך תרגול מסכם	30%

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- סטטיקה ENGR 211
- חוזק חומרים ENGR 213
- חשבון אינפיניטסימלי 3 MATH 210
- כל הקורסים