עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 4, סתיו · 🧱 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 סמסטריאלי לשנה האחרונה בתכנון חלליות למהנדסי אווירונאוטיקה וחלל. הוא בנוי לפי הנושאים והעומק של MIT 16.851 Satellite Engineering (בחינם ב־MIT OpenCourseWare), ומשתמש ב־Systems Engineering Handbook החינמי של נאס"א ובדוח Small Spacecraft Technology State of the Art, שאליהם אנו מקשרים כשהם עוזרים. אף אחד מהמחברים, המוסדות או הסוכנויות האלה אינו תומך בדף זה.

מה שאנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית עם מקור ציבורי מצוטט (משימות Landsat 9, Europa Clipper ו־PACE של נאס"א וסקר טכנולוגיית החלליות הקטנות של נאס"א), כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני פרסומו, ולכל מעבדה יש סימולציה חינמית או גיליון אלקטרוני.

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

לווייני תצפית על כדור הארץ הם תכנון חלליות שהפך לשימושי: הספק, תרמיקה, הצבעה ותקשורת חייבים לעבוד שנים כדי שמדענים יעקבו אחר יערות, מים, גידולים ואקלים.

תכנון טוב פירושו גם חיים ארוכים ופחות פסולת במסלול. כל יחידה מסתיימת בסעיף קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכי דוגמה או ערכי ספר לימוד.

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 (AERO 430).
- 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

- מכניקה מסלולית: מסלולים, זמני מחזור ו־Δv.
- תרמודינמיקה: יסודות מעבר חום וקרינה.
- מעגלים: הספק, מתח וזרם.
- דינמיקת טיסה ובקרה ומבני תעופה וחלל: בקרת מצב, קשיחות ועומסים.

איך ללמוד

- התחילו כל תכנון מהדרישות, ונהלו תקציב (מסה, הספק, Δv, קישור) לכל תת־מערכת.
- שמרו מרווחים וציינו היכן הם נמצאים.
- עקבו אחר יחידות: וואט לעומת וואט־שעה, קלווין לקרינה, דציבלים לקישורים.
- בדקו כל תשובה מול סדר הגודל של משימה אמיתית.
- שרטטו את החללית ואת מסלולה לפני כל חישוב.
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שאתם פותחים את התשובה, וחזרו על הבחנים כעבור כמה ימים.

מה צריך

- מחשב או טאבלט לסימולציות PhET החינמיות Blackbody Spectrum ו־Circuit Construction Kit.
- תוכנת גיליון אלקטרוני (כל תוכנה חינמית מתאימה), או Python.
- דפי המשימות של נאס״א ודוח Small Spacecraft Technology בדפדפן אינטרנט.
- מחשבון.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

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

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	דרישות משימה והנדסת מערכות	דרישות ותקציבים; מעבדה A	NASA SE Handbook
2	מסלולים וסביבת החלל	מסלולים וסביבה; מעבדה B	MIT 16.851
3	ייצור הספק: מערכים סולאריים	מערכים סולאריים; מעבדה C	NASA SST SOA

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
4	אגירת אנרגיה ותקציב ההספק	סוללות ותקציב הספק; מעבדה D	NASA SST SOA
5	בקרה תרמית	בקרה תרמית; מעבדה E	MIT 16.851
6	מבנים, מנגנונים ועומסי שיגור	מבנים ועומסי שיגור	MIT 16.851
7	הנעה ותקציב ה־delta-v	תקציבי Δv; תרגול לבוחן אמצע	MIT 16.851
8	תת־מערכת קביעת מצב ובקרת מצב	דרישות ADCS	MIT 16.851
9	תת־מערכת קביעת מצב ובקרת מצב	חיישנים, מפעילים ותנע	NASA SST SOA
10	תקשורת וטיפול בנתונים	תקציבי קישור	MIT 16.851
11	תקשורת וטיפול בנתונים	טיפול בנתונים; מעבדה F	NASA Landsat 9
12	אמינות, ניסויים וסוף חיים	אמינות ויתירות	NASA SE Handbook
13	אמינות, ניסויים וסוף חיים	ניסויים וכיול	NASA Landsat 9
14	אמינות, ניסויים וסוף חיים	תפעול וסילוק	NASA SE Handbook
15	אמינות, ניסויים וסוף חיים	חזרה; תרגול למבחן הסופי	MIT 16.851

ההתקדמות שלכם

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

יחידות

דרישות משימה והנדסת מערכות

יעדי משימה, דרישות, מחזור חיי הפרויקט, מחקרי פשרה, תקציבי תת־מערכות ומרווחי תכנון.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- הפכו יעדי משימה לדרישות מדידות.
- בנו תקציב מסה עם מרווח.
- בצעו מחקר פשרה משוקלל פשוט.
- הסבירו מדוע מרווחים מצטמצמים במהלך פרויקט.

מושגי מפתח

- משימה מתחילה ביעדים; הדרישות הופכות אותם למדידים וניתנים לאימות (מספר, יחידה וניסוי).
- פרויקטים עוברים שלבים מהרעיון ועד התפעול, עם סקירות שבודקות שהדרישות מתקיימות.
- לכל משאב יש תקציב: מסה, הספק, Δv, נתונים, הצבעה ועלות, כל אחד עם מרווח.
- תכנונים מוקדמים נושאים מרווחים גדולים (לרוב 30%–20, ערכי ספר לימוד) כי ההערכות אינן ודאיות; המרווחים מצטמצמים ככל שהחומרה מבשילה.
- מחקרי פשרה מדרגים חלופות לפי קריטריונים משוקללים; המשקלים חשובים כמו הציונים.

משוואות מפתח

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

```
m_alloc=m_est(1+M)
```

מסה עם מרווח

$$S = \sum w_i s_i$$

```
S= w_is_i
```

ציון פשרה משוקלל

$$\text{Margin} = \frac{\text{Capability} - \text{Need}}{\text{Need}}$$

```
Margin=-NeedNeed
```

מרווח ביצועים

$$\sum w_i = 1$$

$w_i = 1$

סכום המשקלים הוא אחד

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 הערכת מסה יבשה היא 800 kg. הקצו עם מרווח של 20% (ערכי דוגמה).

1. 1.20×800.

תשובה: 960 kg.

דוגמה 1.2 נאס״א מציינת ש־Landsat 9 נדרש לאסוף לפחות 400 סצנות ביום והוא אוסף 740. מצאו את המרווח.

1. $(740 - 400)/400$.

תשובה: 85% מעל הדרישה ($740/400 = 1.85$).

דוגמה 1.3 חלופה A מקבלת 8 (עלות) ו־6 (ביצועים); B מקבלת 5 ו־9. משקלים 0.4 ו־0.6. איזו מנצחת?

1. $A = 3.2 + 3.6 = 6.8$.
2. $B = 2.0 + 5.4 = 7.4$.

תשובה: B מנצחת, 7.4 מול 6.8.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. הקצו 1200 kg עם מרווח של 25%.

   1500 kg.

2. אם המשקלים מתהפכים ל־0.6/0.4, מי מנצח?

   A: 7.2 vs B: 6.6.

3. מה הופך דרישה לניתנת לאימות?

   ערך מדיד וניסוי או ניתוח לבדיקתו.

4. למה לשמור מרווח?

   הערכות גדלות ככל שתכנונים מבשילים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: דרישות הן משאלות.

בפועל: הן מדידות וניתנות לאימות.

מיתוס: מרווחים הם בזבוז.

בפועל: הם סופגים גידול והפתעות.

מיתוס: מחקרי פשרה הם אובייקטיביים.

בפועל: המשקלים נושאים שיקול דעת.

כרטיסיות

דרישה

צורך מדיד וניתן לאימות.

תקציב

הקצאה של משאב.

מרווח

עתודה מעל ההערכה.

ניתוח חלופות

השוואה משוקללת.

מחזור חיים

שלבים מהרעיון ועד הסילוק.

אימות

הוכחה שדרישה מתקיימת.

בוחן לבדיקה עצמית

1. 800 kg + 20%…

960 kg

820 kg

1000 kg

640 kg

960 kg. הכפילו.

2. סצנות Landsat 9 ביום...

740

400

100

7400

.NASA .740

3. המנצח בפשרה...

B

A

תיקו

אף אחד מהם

.B. 7.4 > 6.8

4. מרווחים לאורך זמן...

מצטמצמים

לגדול

נעלמים בהתחלה

קבועים

מצטמצמים. בשלות.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס"א מציינת שדרישות התוכנית של Landsat 9 כללו איסוף של לפחות 400 סצנות ביום וחיי תכנון של 5 שנים; Landsat 9 אוסף 740 סצנות ביום, כמעט פי שניים מהמינימום, ונושא דלק מספיק לפעול לפחות 10 שנים.

עמידה מעבר לדרישות כאלה מאריכה רישום של היבשה שלפי נאס"א נמשך יותר מחמישה עשורים ותומך בהתרעות על בירוא יערות, בניטור איכות מים ובדוחות גידולים.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · פתרונות

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס"א.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.

צפו בהרצאה

Lecture 21: Systems Engineering for Space Shuttle Payloads (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-21/) (באנגלית)

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), 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**

מסלולים וסביבת החלל

בחירת מסלול, זמן מחזור ומהירות, מסלולים סינכרוניים לשמש וגאוסטציונריים, עקבות קרקע ורצועות סריקה, ליקוי, ריק, קרינה וחמצן אטומי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו זמן מחזור ומהירות מסלולית.
- ספרו מסלולים ביום.
- העריכו את משך הליקוי במסלול נמוך.
- מנו סכנות סביבתיות לפי מסלול.

מושגי מפתח

- זמן מחזור T = 2π√(a³/μ); מהירות מעגלית v = √(μ/a).
- מסלולים סינכרוניים לשמש הם כמעט קוטביים ונוקפים פעם בשנה, כך שהלוויין חוצה את קו המשווה באותה שעה מקומית בכל יום.
- מסלולים נמוכים עוברים בצל כדור הארץ; חלק הליקוי במסלול מעגלי כשהשמש במישור המסלול הוא בערך (2/2π)·asin(R_E/a).
- סביבת החלל כוללת ריק, טמפרטורות קיצוניות, חגורות קרינה, חמצן אטומי במסלול נמוך ופסולת.
- מסלולים גבוהים יותר רואים יותר מכדור הארץ אך צריכים אופטיקה ואנטנות גדולות יותר לאותה הפרדה ואותו קצב נתונים.

משוואות מפתח

$$T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu}$$

T=2π^3/μ

זמן מחזור מסלולי

$$v = \sqrt{\mu/a}$$

v=μ/a

מהירות מעגלית

$$f_e \approx \frac{\sin^{-1}(R_E/a)}{\pi}$$

חלק הליקוי (המקרה הגרוע)

$$N = \frac{86400}{T}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 Landsat 9 טס בגובה 705 km. מצאו את זמן המחזור שלו.

1. $a = 6378.137 + 705 = 7083.1$ km.
2. $T = 2\pi\sqrt{(7083.1^3/398{,}600.4)}$.

תשובה: $T = 98.9$ min (נאס"א מציינת 99 min).

דוגמה 2.2 מצאו מסלולים ביום ומהירות.

1. $86{,}400/5932.7$ s.
2. $v = \sqrt{(398{,}600.4/7083.1)}$.

תשובה: 14.56 מסלולים/יום; 7.50 km/s.

דוגמה 2.3 העריכו את הליקוי במקרה הגרוע.

1. $\sin(6378.1/7083.1) = 1.121$ rad.
2. $f = 1.121/\pi = 0.357$.

תשובה: כ־35.3 min לכל מסלול.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. למה כמעט קוטבי?

כדי לכסות את כל הגלובוס.

2. הנטייה של Landsat 9?

98.2°.

3. סכנת השחיקה העיקרית במסלול נמוך?

חמצן אטומי.

4. האם הליקוי מצטמצם בגובה רב יותר?

כן, החלק יורד.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: החלל קר, ולכן חלליות קופאות.

בפועל: חלקים מוארים עלולים להתחמם יתר על המידה; האיזון חשוב.

מיתוס: גבוה יותר תמיד עדיף.

בפועל: ההפרדה והקישורים נפגעים.

מיתוס: סינכרוני לשמש פירושו מואר תמיד.

בפועל: רק גרסאות שחר–דמדומים נמנעות מליקוי.

כרטיסיות

זמן מחזור

$2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

סינכרוני לשמש

אותה שעת חצייה מקומית.

ליקוי

זמן בצל כדור הארץ.

רצועה

רוחב הקרקע המצולם.

חמצן אטומי

שוחק משטחים ב־LEO.

חגורות קרינה

חלקיקים טעונים לכודים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. זמן המחזור של Landsat 9…

≈99 min

24 h

45 min

12 h

≈99 min. NASA.

2. מסלולים ביום…

≈14.5

1

100

3

≈14.5. 86,400/T.

3. הליקוי הגרוע ביותר ב־705 km…

≈35 min

0

60 min

5 min

≈35 min. מחושב.

4. סינכרוני לשמש נותן…

אותה שעה מקומית

אין ליקוי

מבט מ־GEO

גרר אפס

אותה שעה מקומית. נקיפה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס"א מציינת ש־Landsat 9 נמצא במסלול כמעט קוטבי סינכרוני לשמש בגובה 705 km, בנטייה של 98.2°, זמן מחזור של 99 דקות, כ־14.5 מסלולים ביום, רצועת סריקה של 185 km וחציית קו המשווה בסביבות 10:12 בבוקר שעון מקומי.

יחד עם Landsat 8 הוא צופה באותו מקום כל 8 ימים. תאורה באותה שעה ביום היא מה שמאפשר למדענים להשוות תמונות לאורך עשורים.

ב־Saving Planets: מכניקה מסלולית · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/): דף המשימה של נאס"א.

סיימתי את היחידה הזו

ייצור הספק: מערכים סולאריים

שטף שמש ומרחק, נצילות תאים, זווית השמש, הספק בתחילת חיים ובסוף חיים, תכנון גודל מערך והספק סגולי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו את תפוקת המערך למטר רבוע.
- החילו את חוק הקוסינוס ואת חוק ההופכי לריבוע.
- קבעו את גודל המערך לעומס.
- השוו טכנולוגיות תאים.

מושגי מפתח

- שטף השמש ליד כדור הארץ הוא כ־1361 W/m² (ערך ספר לימוד) והוא יורד ביחס הפוך לריבוע המרחק מהשמש.
- ההספק יורד עם הקוסינוס של הזווית בין הנורמל למערך לבין השמש.
- סקר החללויות הקטנות של נאס"א מדווח על תאי חלל רב־צומתיים בנצילות נומינלית של 30% (עד 34%), לעומת כ־20% לסיליקון חד־צומתי.
- התדרדרות מקרינה, זיהום והזדקנות מורידה את ההספק בסוף החיים, ולכן מערכים מתוכננים ל־EOL.
- הספק סגולי (W/kg) קובע לעיתים קרובות היתכנות; נאס"א מציינת שמשימות עם מערכים סולאריים מתרכזות סביב 30 W/kg.

משוואות מפתח

$$P = S \eta A \cos\theta$$

```
P=S ηAθ
```

הספק המערך

$$S(r) = \frac{1361}{r^2}$$

```
S(r)=(1361)/(r^2)
```

הופכי לריבוע (r ביחידות אסטרונומיות)

$$A = \frac{P}{S \eta f_d}$$

```
A=(P)/(S η f_d)
```

שטח המערך

$$SP = \frac{P}{m}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 מצאו את התפוקה למ״ר לתאים של 30% הפונים לשמש ב־1 יחידה אסטרונומית.

1. 0.30 × 1361.

תשובה: 408.3 W/m².

דוגמה 3.2 מצאו את השטח עבור 2 kW עם מקדם התדרדרות ואריזה של 0.85 (ערך דוגמה).

1. (0.85 × 0.30 × 1361)/2000.

תשובה: 5.76 m².

דוגמה 3.3 מצאו את שטף השמש ליד צדק (5.2 יחידות אסטרונומיות).

1. 1361/5.2².

תשובה: 50.3 W/m², פחות פי 27.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. תפוקה למ״ר בהטיה של 30°?

353.6 W/m².

2. שטף ליד מאדים (1.524 יחידות אסטרונומיות)?

586 W/m².

3. תפוקה למ״ר לסיליקון של 20%?

272.2 W/m².

4. מסת המערך עבור 2 kW ב־30 W/kg?

66.7 kg.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: המרחק כמעט אינו משנה.

בפועל: השטף יורד כמו $1/r^2$.

מיתוס: הספק BOL מספיק.

בפועל: תכננו לסוף החיים.

מיתוס: רק הנצילות חשובה.

בפועל: גם מסה ונפח מקופל חשובים.

כרטיסיות

שטף שמש

≈1361 W/m² ב־1 יחידה אסטרונומית.

תא רב־צומתי

פערי אנרגיה מוערמים, ~30%.

BOL/EOL

תחילת/סוף חיים.

הפסד קוסינוס

$P \propto \cos\theta$.

הופכי לריבוע

$S \propto 1/r^2$.

הספק סגולי

W/kg.

בוחן לבדיקה עצמית

30% .1 ב־1 יחידה אסטרונומית למ"ר…

408 W

1361 W

136 W

30 W

408 W. הכפילו.

2. שטף ליד צדק…

≈50 W/m²

1361

500

5

≈50 W/m². 1/r².

3. η נומינלי רב־צומתי (נאס"א)…

30%

10%

50%

86%

30%. דוח SOA.

4. הטיה מקטינה הספק לפי…

cos θ

sin θ

θ²

כלום

cos θ. קוסינוס.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס"א מתארת את Europa Clipper כחללית מונעת אנרגיה סולארית שמוטת כנפיה עם המערכים הפרושים עולה על 100 רגל (כ־30 מטר); היא שוגרה ב־14 באוק' 2024 ותעבור 1.8 מיליארד מייל כדי להגיע לצדק באפריל 2030.

ליד צדק אור השמש חלש פי 27 בערך מאשר ליד כדור הארץ, ולכן המערכים של Clipper כה גדולים: חוק ההופכי לריבוע של יחידה זו, בקנה מידה של משימה.

ב־Saving Planets: פתרונות · מכניקה מסלולית

מקורות: NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/) · NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): פרק חינמי של נאס"א על הספק.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): שרשראות בטור ובמקביל.

סיימתי את היחידה הזו

אגירת אנרגיה ותקציב ההספק

רשימות עומסים, מאזן אנרגיה בשמש ובליקוי, תכנון סוללה עם עומק פריקה, אנרגיה סגולית, ניהול הספק וחלוקתו.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- בנו רשימת עומסים והספק ממוצע למסלול.
- קבעו גודל סוללה לליקוי.
- חשבו מסת סוללה מאנרגיה סגולית.
- הסבירו מגבלות עומק פריקה.

מושגי מפתח

- תקציב ההספק מסכם כל עומס לפי מצב; המערך חייב להזין עומסים בשמש ולטעון את הסוללה לקראת הליקוי.
- אנרגיית סוללה = עומס × זמן ליקוי ÷ עומק הפריקה (DoD) המותר.
- DoD רדוד מאריך את חיי המחזורים; במסלולים נמוכים יש כ־15 מחזורים ביום, ולכן DoD נשמר לרוב נמוך (הנחיית ספר לימוד).
- הסקר של נאס"א מדווח על תאי Li-ion מסחריים של כ־150–270 Wh/kg ו־3.6 V בממוצע.
- ניהול וחלוקת הספק מווסתים את מתח האפיק, מיתגים עומסים ומבודדים תקלות.

משוואות מפתח

$$E = \frac{P_e t_e}{DoD}$$

E=(P_et_e)/(DoD)

אנרגיית סוללה

$$m_b = \frac{E}{e_{sp}}$$

m_b=_sp

מסת סוללה

$$P_{avg} = \frac{P_d t_d + P_e t_e}{T}$$

P_avg=(P_dt_d+P_et_e)/(T)

עומס ממוצע למסלול

$$Ah = \frac{Wh}{V}$$

`Ah=Wh/V`

קיבול

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 עומס של 500 W חייב לעבור את הליקוי של 35.3 דקות מיחידה 2. מצאו את האנרגיה שנצרכת.

1. 500 × 35.28/60.

תשובה: 294 Wh.

דוגמה 4.2 קבעו גודל סוללה ל־DoD של 30% (ערך דוגמה).

1. 294/0.30.

תשובה: 980 Wh.

דוגמה 4.3 מצאו מסת סוללה ב־150 Wh/kg ברמת המארז.

1. 980/150.

תשובה: 6.53 kg.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. קיבול ב־28 V?

   35 Ah.

2. מסה עם תאים של 260 Wh/kg?

   3.77 kg (תאים בלבד).

3. מחזורים ביום ב־14.56 מסלולים/יום?

   כ־14.6.

4. למה לא DoD של 100%?

   חיי המחזורים קורסים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: וואט ווואט־שעה הם אותו דבר.

בפועל: הספק לעומת אנרגיה.

מיתוס: פריקה עמוקה היא בסדר.

בפועל: היא מקצרת חיים.

מיתוס: אנרגיית תאים = אנרגיית מארז.

בפועל: מארזים מוסיפים מסה למבנה ולניהול.

כרטיסיות

רשימת עומסים

הספק לכל תת־מערכת ומצב.

DoD

החלק מהקיבול שנוצל.

אנרגיה סגולית

Wh/kg.

PMAD

ניהול וחלוקת הספק.

ליקוי

אין הספק סולארי.

הספק ממוצע למסלול

עומס משוקלל בזמן.

בוחן לבדיקה עצמית

1. אנרגיית ליקוי…

294 Wh

500 Wh

35 Wh

1000 Wh

294 Wh. P × t.

2. סוללה ב־DoD של 30%…

980 Wh

294 Wh

88 Wh

3000 Wh

980 Wh. חלקו.

3. מתח תא Li-ion…

3.6 V

1.5 V

12 V

28 V

3.6 V. NASA.

4. מסת סוללה…

6.53 kg

65 kg

0.65 kg

1 kg

980/150 .6.53 kg

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

סקר טכנולוגיית החלליות הקטנות של נאס"א מונה תאי ליתיום־יון 18650 עם מורשת טיסה במשימות נאס"א, ובהם תאי LG Chem INR18650-MJ1 ב־260 Wh/kg למשימת PACE של נאס"א ותאי LG Chem ICR18650 B3 ב־191–205 Wh/kg

ל־Europa Clipper.

PACE, ששוגרה בפברואר 2024, מודדת פיטופלנקטון, תרסיסים ועננים כדי לסייע בניטור בריאות האוקיינוס, איכות האוויר והאקלים. הסוללות שלה שומרות עליה פועלת בכל ליקוי.

ב־Saving Planets: אוקיינוסים · מעגלים חשמליים

מקורות: NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/) · NASA Science: PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) (https://science.nasa.gov/mission/pace/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): פרק חינמי של נאס"א על הספק.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

בקרה תרמית

מאזן קרינה, בליעות ופליטות, טמפרטורת שיווי משקל, תכנון רדיאטור, ציפויים, מחממים ובידוד רב־שכבתי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו טמפרטורת שיווי משקל.
- קבעו גודל רדיאטור.
- בחרו ציפויים לפי α/ε.
- הסבירו מחממים ובידוד.

מושגי מפתח

- בריק החום עוזב בעיקר בקרינה: Q = εσAT⁴.
- אור השמש הנבלע הוא αSA_proj; היחס α/ε של משטח קובע את טמפרטורת שיווי המשקל שלו.
- כדור שחור ב־1 יחידה אסטרונומית עם α = ε מתייצב סביב 278 K ≈ (S/4σ)^¼.
- רדיאטורים פולטים חום שיורי; צבעים לבנים ומראות בעלי α/ε נמוך ונשארים קרים בשמש.
- בידוד רב־שכבתי חוסם קרינה; מחממים שומרים על סוללות וחומר הנעה חמים בליקוי.

משוואות מפתח

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4$$

```
Q=σ AT^4
```

חום נפלט

$$T = \left(\frac{\alpha S}{4 \varepsilon \sigma} \right)^{1/4}$$

```
T=((α S)/(4σ))^1/4
```

שיווי משקל של כדור

$$A_r = \frac{Q}{\varepsilon \sigma T^4}$$

```
A_r=(Q)/(σ T^4)
```

שטח רדיאטור

$$Q_{abs} = \alpha S A_p$$

```
Q_abs=α SA_p
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 מצאו את טמפרטורת שיווי המשקל של כדור ב־1 יחידה אסטרונומית עם α = ε.

1. $T = (1361/(4 \times 5.6704 \times 10^{-8}))^{1/4}$.

תשובה: $T = 278.3\ \text{K}$ (5 °C).

דוגמה 5.2 קבעו גודל רדיאטור לפליטת 500 W ב־290 K עם ε = 0.85 (בהתעלם מאור שמש נבלע).

1. $A = 500/(0.85 \times 5.6704 \times 10^{-8} \times 290^4)$.

תשובה: $A = 1.47\ \text{m}^2$.

דוגמה 5.3 כיצד טמפרטורת שיווי המשקל משתנה עם α/ε?

1. $T \propto (\alpha/\varepsilon)^{1/4}$.

תשובה: הכפלת α/ε מעלה את T פי $2^{1/4} = 1.189$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. עבור α/ε = 2, T?

   331 K.

2. רדיאטור ב־260 K עבור 500 W?

   2.27 m².

3. מה עושה MLI?

   חוסם זרימת חום בקרינה.

4. למה מחממים בליקוי?

   כדי לשמור רכיבים מעל הטמפרטורות המינימליות.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: החלל מוליך חום החוצה.

בפועל: בריק: הקרינה שולטת.

מיתוס: שחור תמיד חם.

בפועל: תלוי ב־α/ε.

מיתוס: התרמיקה היא מחשבה שנייה.

בפועל: היא קובעת פריסה והספק.

כרטיסיות

בליעות α

החלק הנבלע מאור השמש.

פליטות ε

יכולת קרינה.

MLI

בידוד רב־שכבתי.

רדיאטור

משטח פולט חום.

מחמם

שומר על רכיבים חמים.

σ

$5.6704 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. כדור ב־1 יחידה אסטרונומית…

278 K

373 K

200 K

0 K

278 K. מחושב.

2. Q = …

εσAT⁴

hAΔT

kAΔT/L

mcΔT

εσAT⁴. קרינה.

3. דוגמת שטח רדיאטור…

1.47 m²

14.7 m²

0.15 m²

5 m²

1.47 m². מחושב.

4. משטח עם α/ε נמוך…

נשאר קר

מתחמם

ללא השפעה

זוהר

נשאר קר. איזון.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס"א מסבירה שה־Thermal Infrared Sensor של Landsat 9 מודד טמפרטורת פני היבשה וכולל רדיאטור של מקרר קריוגני, מגן כדור הארץ, וגוף שחור יחד עם מבט לחלל העמוק לצורך כיול.

כאן התכנון התרמי הוא המכשיר: TIRS מודד חום מכדור הארץ, מה שלפי נאס"א עוזר לעקוב אחר השימוש במים ולנהל אותו, רק משום שהגלאים שלו עצמו נשמרים קרים ויציבים.

ב־Saving Planets: תרמודינמיקה · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: Thermal Control (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/thermal-control/): פרק חינמי של נאס"א על תרמיקה.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): קרינה תרמית.

סיימתי את היחידה הזו

מבנים, מנגנונים ועומסי שיגור

עומסי שיגור, עומסי תכנון כמו־סטטיים, דרישות קשיחות ותדירות טבעית, חומרים, רכיבים נפרסים ופלטפורמות בעלות מורשת.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו עומס שיגור כמו־סטטי.
- חשבו תדירות טבעית.
- הסבירו דרישות קשיחות.
- שקלו מורשת מול תכנון חדש.

מושגי מפתח

- השיגור חושף את החללית לתאוצה מתמדת, רעידות, אקוסטיקה וזעזועים; התכנון מתחיל ממקדמי עומס כמו־סטטיים (לרוב כמה g, ערכי ספר לימוד).
- משגרים דורשים שהתדירות היסודית של החללית תישאר מעל מינימום כדי שלא תצטמד לרקטה.
- במודל מסה־קפיץ פשוט f = (1/2π)√(k/m): קשיחות מעלה את התדירות, ומסה מורידה אותה.
- חלת דבש מאלומיניום וחומרים מרוכבים נותנים קשיחות במסה קטנה; מנגנונים פורסים מערכים, אנטנות וזרועות.
- שימוש חוזר בפלטפורמה שהוכחה בטיסה (מורשת) מקטין סיכון ולוח זמנים.

משוואות מפתח

$$F = n\,m\,g_0$$

`F=n m g_0`

עומס כמו־סטטי

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$$

`f=(1)/(2π)/m`

תדירות טבעית

$$\sigma = F/A$$

מאמץ

$$k = \frac{EA}{L}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 מצאו את עומס התכנון לחללית של 1000 kg ב־6 g (ערכי דוגמה).

1. $9.80665 \times 1000 \times 6$.

תשובה: 58.8 kN.

דוגמה 6.2 מכשיר של 100 kg על תושבת בקשיחות 10^6 N/m (ערכי דוגמה). מצאו את f.

1. $(1/2\pi)\sqrt{(10^6/100)}$.

תשובה: f = 15.9 Hz.

דוגמה 6.3 כמה קשיחה צריכה התושבת להיות כדי להכפיל את f?

1. $f \propto \sqrt{k}$.

תשובה: 4×10^6 N/m (31.8 Hz).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. אם המסה מוכפלת f?

   11.3 Hz.

2. עומס ב־4 g עבור 500 kg?

   19.6 kN.

3. למה תדירות מינימלית?

   כדי למנוע צימוד עם הדינמיקה של המשגר.

4. מהי פלטפורמת מורשת?

   פלטפורמת חללית שהוכחה בטיסה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: חוזק הוא היעד היחיד.

בפועל: קשיחות מכתיבה לעיתים קרובות את התכנון.

מיתוס: כבד יותר בטוח יותר.

בפועל: מסה מורידה תדירות ועולה בשיגור.

מיתוס: רכיבים נפרסים הם פשוטים.

בפועל: הם נקודות כשל בודדות נפוצות.

כרטיסיות

עומס כמו־סטטי

g מתמיד שקול.

תדירות טבעית

(1/2π)√(k/m).

חלת דבש

לוח קל וקשיח.

נפרס

נפתח במסלול.

מורשת

תכנון שהוכח בטיסה.

Bus

פלטפורמת חללית.

בוחן לבדיקה עצמית

1. 6 g על 1000 kg…

58.8 kN

6 kN

9.8 kN

588 kN

58.8 kN. nmg.

2. דוגמת f…

15.9 Hz

100 Hz

1 Hz

159 Hz

15.9 Hz. נוסחה.

3. הכפלת f דורשת × k…

4

2

2√

8

4. f ∝ √k.

4. מורשת מקטינה…

סיכון

מסה תמיד

הספק

מסלול

סיכון. מוכח.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס"א מציינת ש־Northrop Grumman תכננה ובנתה את חללית Landsat 9 בהתאמת תכנון הפלטפורמה LEOStar ששימש ל־Landsat 8, שילבה את שני המכשירים וביצעה ניסויים ברמת הלוויין.

שימוש חוזר בפלטפורמה מוכחת הוא בחירת תכנון שמקטינה סיכון ועוזרת לשמור על רציפות רישום Landsat, שלפי נאס״א הוא הרישום הלווייני הרציף הארוך ביותר של פני היבשה.

ב־Saving Planets: מבנים אווירונאוטיים וחלליים · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): סקר טכנולוגי חינמי של נאס״א.

סיימתי את היחידה הזו

הנעה ותקציב ה־delta-v

תקציבי Δv להחדרה למסלול, שמירת מיקום, מצב וסילוק; משוואת הרקטה למסת חומר הנעה; תמרוני קלע כבידתי; ובחירות הנעה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- בנו תקציב Δv.
- חשבו מסת חומר הנעה מ־Δv.
- חשבו Δv מחומר הנעה.
- הסבירו תמרוני קלע כבידתי.

מושגי מפתח

- תקציב Δv מונה כל תמרון: החדרה, תחזוקת מסלול, בקרת מצב, הימנעות מהתנגשות וסילוק, בתוספת מרווח.
- חומר ההנעה הדרוש: m_p = m₀(1 − e^(−Δv/v_e)).
- מדחפים חד־רכיביים פשוטים; דו־רכיביים נותנים Isp גבוה יותר; חשמליים נותנים Isp גבוה מאוד בדחף נמוך.
- קלע כבידתי שואל תנע מכוכב לכת כדי לשנות מהירות וכיוון בלי חומר הנעה.
- חומר הנעה שנותר יכול להאריך משימה מעבר לחיי התכנון שלה.

משוואות מפתח

$$m_p = m_0\left(1 - e^{-\Delta v / v_e}\right)$$

`m_p=m_0(1-e^-Δ v/v_e)`

מסת חומר הנעה

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

`Δ v=v_e(m_0)/(m_f)`

משוואת הטיל

$$v_e = I_{sp} g_0$$

`v_e=I_spg_0`

מהירות פליטה

$$\Delta v_{tot} = \sum \Delta v_i (1 + M)$$

Δ v_tot=Δ v_i(1+M)

תקציב עם מרווח

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 חללית של 1000 kg צריכה 100 m/s עם Isp של 300 s (ערכי דוגמה). מצאו את חומר ההנעה.

1. v_e = 2942 m/s.
2. m_p = 1000(1 − e^(−100/2942)).

תשובה: 33.4 kg.

דוגמה 7.2 איזה Δv נותנים 50 kg של חומר הנעה?

1. 2942 ln(1000/950).

תשובה: 150.9 m/s.

דוגמה 7.3 תקציב: 60 m/s לתיקון החדרה, 30 m/s לשמירת מיקום, 10 m/s לסילוק, מרווח של 20%.

1. 1.2 × 100.

תשובה: 120 m/s.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. חומר הנעה עבור 120 m/s?

   39.9 kg.

2. v_e עבור Isp של 220 s?

   2157 m/s.

3. מה חוסך קלע כבידתי?

   חומר הנעה לאותו Δv.

4. למה לתקצב Δv לסילוק?

   כדי לעזוב את המסלול באחריות.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: חומר ההנעה גדל ליניארית עם Δv.

בפועל: מעריכית.

מיתוס: קלע כבידתי הוא אנרגיה חינם.

בפועל: תנע מוחלף עם כוכב הלכת.

מיתוס: סילוק הוא רשות.

בפועל: הוא מגן על מסלולים עבור אחרים.

כרטיסיות

תקציב Δv

סכום התמרונים.

שמירת מיקום

החזקת מסלול.

חד־רכיבי

חומר הנעה יחיד, פשוט.

דו־רכיבי

דלק + מחמצן.

קלע כבידתי

דחיפה מחלוף ליד כוכב לכת.

סילוק

יציאה ממסלול או מסלול בית קברות בסוף החיים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. m_p עבור 100 m/s…

33.4 kg

100 kg

3.3 kg

334 kg

33.4 kg. נוסחה.

2. Δv מ־50 kg…

151 m/s

50 m/s

500 m/s

15 m/s

151 m/s. משוואת הרקטה.

3. תקציב עם מרווח…

120 m/s

100 m/s

80 m/s

200 m/s

1.2× 120 m/s.

4. המעבר של Clipper ליד כדור הארץ בדצמ׳ 2026 הוא…

קלע כבידתי

נחיתה

תדלוק

שיגור

קלע כבידתי. NASA.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס״א מציינת ש־Europa Clipper חלפה ליד מאדים ב־2025 ותחלוף שוב ליד כדור הארץ ב־3 בדצמ׳ 2026 לקלע כבידתי שייתן לה דחיפה להמשך מסעה לצדק, שם תבצע 49 חלופים קרובים ליד אירופה.

קלעים כבידתיים מאריכים כמות קבועה של חומר הנעה, אותה מטרה שתקציב ה־Δv של יחידה זו משרת עבור לוויינים סביב כדור הארץ כמו Landsat 9, שלפי נאס"א נושא דלק ל־10 שנים לפחות.

ב־Saving Planets: מכניקה מסלולית · הנעה

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/) · NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): סקר טכנולוגי חינמי של נאס"א.

סיימתי את היחידה הזו

תת־מערכת קביעת מצב ובקרת מצב

דרישות הצבעה ממטענים, חיישנים ומפעילים, מומנטי הפרעה, תקציבי תנע ושגיאת הצבעה על הקרקע.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- גזרו דרישת הצבעה מהפרדה קרקעית.
- חשבו שגיאה קרקעית משגיאה זוויתית.
- בנו תקציב תנע.
- בחרו חיישנים ומפעילים.

מושגי מפתח

- המטענים קובעים את ההצבעה: פיקסל של מצלם נשען על זווית של (פיקסל קרקעי)/(גובה).
- שגיאה קרקעית ≈ גובה × שגיאה זוויתית (זוויות קטנות).
- חיישנים: עוקבי כוכבים, חיישני שמש, מגנטומטרים, ג׳ירוסקופים; מפעילים: גלגלי תגובה, מפתלי מומנט מגנטיים, מדחפים.
- הפרעות (גרדיאנט כבידה, גרר, לחץ שמש, מגנטיות) צוברות תנע H = τt שהגלגלים צריכים לאגור.
- התנע נפרק במפתלי מומנט מגנטיים או במדחפים לפני שהגלגלים מגיעים לרוויה.

משוואות מפתח

$$\theta = \frac{x}{h}$$

זווית פיקסל

$$e = h\theta$$

שגיאה קרקעית

$$H = \tau t$$

```
H=τ t
```

תנע מצטבר

$$1'' = \frac{\pi}{648000}\ \text{rad}$$

```
1^=(π)/(648000) rad
```

שניית קשת

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 ל־Landsat 9 פיקסלים של 30 m מגובה 705 km. מצאו את הזווית לפיקסל.

1. 30/705000 rad.

תשובה: 4.26×10^{-5} rad = 8.78 שניות קשת.

דוגמה 8.2 שגיאת הצבעה של 0.01° מגובה 705 km מזיזה את התמונה בכמה?

1. 0.0001745 × 705,000.

תשובה: 123 m, כארבעה פיקסלים.

דוגמה 8.3 הפרעה של 10^{-5} N·m פועלת במשך רבע ממסלול של 98.9 דקות (ערך דוגמה). מצאו את התנע.

1. 1483 s × 10^{-5}.

תשובה: 0.0148 N·m·s.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. זווית לפיקסל של 15 m?

   4.39 שניות קשת.

2. שגיאה קרקעית עבור 0.001°?

   12.3 m.

3. איזה חיישן נותן מצב מוחלט?

   עוקב כוכבים.

4. כיצד פורקים גלגלים ב־LEO?

   במפתלי מומנט מגנטיים או במדחפים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: ידיעת ההצבעה שווה לבקרתה.

בפועל: אלה תקציבים נפרדים.

מיתוס: גלגלים יכולים לספוג תנע לנצח.

בפועל: הם מגיעים לרוויה.

מיתוס: זוויות קטנות אינן חשובות.

בפועל: הגובה מכפיל אותן.

כרטיסיות

דיוק הצבעה

שגיאת בקרה.

ידיעת הצבעה

שגיאת מדידה.

עוקב כוכבים

מצב מתוך הכוכבים.

מפתל מומנט מגנטי

סליל המגיב לשדה של כדור הארץ.

גרדיאנט כבידה

מומנט גאות.

פריקת תנע

פריקת גלגלים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. זווית פיקסל של Landsat…

8.78″

1°

0.1″

60″

8.78″. 30/705 km.

2. 0.01° ב־705 km…

123 m

12 m

1.2 km

1 m

.123 m. hθ

3. H = …

τt

lα

τ/t

mv

τt. תנע.

4. חיישן מצב מוחלט…

עוקב כוכבים

ג׳ירוסקופ

גלגל

מחמם

עוקב כוכבים. כוכבים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס״א מציינת שההפרדה המרחבית של Landsat 9 היא 30 m לערוצים הנראים ולאינפרה־אדום בגל קצר, 15 m פנכרומטי ו־100 m תרמי, מגובה 705 km.

החזקת פיקסל של 30 m יציב מגובה כזה דורשת בקרה ברמת שניית קשת, ולכן תמונות Landsat מתיישרות לאורך שנים לזיהוי שינויים.

ב־Saving Planets: דינמיקת טיסה ובקרה · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): סקר טכנולוגי חינמי של נאס"א.

סיימתי את היחידה הזו

תקשורת וטיפול בנתונים

נפח נתונים, קצבי קישור יורד, תקציב קישור בדציבלים, הפסד מרחב חופשי, הגבר אנטנה, ומחשוב ואחסון על הסיפון.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו הפסד מרחב חופשי.
- חשבו הגבר של אנטנת צלחת.
- בנו תקציב קישור פשוט.
- העריכו נפח נתונים יומי.

מושגי מפתח

- הפסד מרחב חופשי dB (λ/4πd)$_{10}$log 20 = L גדל עם המרחק והתדר.
- הגבר צלחת ²(πD/λ)η = G; צלחות גדולות ותדרים גבוהים נותנים אלומות צרות וחזקות יותר.
- תקציב קישור: הספק נקלט = הספק משודר + הגברים − הפסדים (הכול ב־dB); המרווח מעל מה שהמקלט צריך חייב להיות חיובי.
- נפח נתונים = תמונות × ביטים לתמונה; קצב × זמן קשר חייב לעלות עליו.
- מחשבי פיקוד וטיפול בנתונים מאחסנים נתונים, מריצים תוכנה ומנהלים תקלות.

משוואות מפתח

$$L = 20 \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

```
L=20_10(4π d)/()
```

הפסד מרחב חופשי

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

```
G=((π D)/())^2
```

הגבר צלחת

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L$$

```
P_r=P_t+G_t+G_r-L
```

תקציב קישור (dB)

$$\lambda = c / f$$

אורך גל

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 מצאו את ההפסד בתחום X (8.2 GHz) ב־2000 km (‏$c = 3 \times 10^8$ m/s).

1. $\lambda = 0.03659$ m.
2. $20 \log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^6 / 0.03659)$.

תשובה: $L = 176.7$ dB.

דוגמה 9.2 מצאו את ההגבר של צלחת 3 m ב־8.2 GHz עם $\eta = 0.55$ (ערך דוגמה).

1. $0.55 \times (\pi \times 3 / 0.03659)^2$.

תשובה: $G = 45.6$ dBi.

דוגמה 9.3 מה קורה להפסד אם המרחק מוכפל?

1. $+20 \log_{10} 2$.

תשובה: +6.0 dB (182.8 dB ב־4000 km).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. אורך גל ב־8.2 GHz?

   3.66 cm.

2. שינוי ההגבר לצלחת 6 m?

   +6.0 dB.

3. סצנות Landsat 9 ביום?

   כ־740.

4. ביטים לפיקסל ב־OLI של Landsat 9?

   14.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: דציבלים מתחברים כמו וואטים.

בפועל: dB מתחברים עבור מכפלות.

מיתוס: תדר גבוה יותר תמיד גרוע יותר.

בפועל: ההפסד עולה אך גם הגבר הצלחת עולה.

מיתוס: נפח הנתונים קטן.

בפועל: הוא מכתיב לעיתים קרובות את תכנון תחנות הקרקע.

כרטיסיות

הפסד מסלול

הפסד התפשטות ב־dB.

הגבר אנטנה

ריכוז האלומה.

מרווח קישור

נקלט פחות נדרש.

תחום X

≈8 GHz.

C&DH

פיקוד וטיפול בנתונים.

נפח נתונים

ביטים ביום.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הפסד ב־2000 km בתחום X…

176.7 dB

100 dB

50 dB

250 dB

176.7 dB. נוסחה.

2. הגבר צלחת 3 m…

45.6 dBi

10 dBi

90 dBi

3 dBi

45.6 dBi. נוסחה.

3. מרחק כפול…

הפסד 6+ dB

3+ dB

2× dB

אף אחת

הפסד 2 log 20 .6+ dB.

4. תקציב קישור משתמש ב…

סכומי dB

מכפלות של וואטים בלבד

וולטים

ג׳אולים

סכומי dB. יחידות לוגריתמיות.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס״א מציינת ש־Europa Clipper נושאת תשעה מכשירים מדעיים ועוד ניסוי כבידה שמשתמש במערכת התקשורת שלה, ומציגה את אנטנת ההגבר הגבוה שלה בקוטר 10 רגל (3 מטר) שהותקנה באוגוסט 2023.

קרוב יותר לבית, נאס״א מדווחת ש־Landsat 9 מקליט נתונים של 14 ביט ואוסף יותר מ־700 סצנות ביום. הורדת כמות כזו של נתונים לקרקע בכל יום היא קודם כול בעיית תכנון תקשורת.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · מעגלים חשמליים

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/) · NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): סקר טכנולוגי חינמי של נאס״א.

סיימתי את היחידה הזו

אמינות, ניסויים וסוף חיים

שיעורי כשל ואמינות, יתירות, ניסויי סביבה, כיול ואימות, תפעול וסילוק אחראי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו אמינות משיעור כשל.
- חשבו את התועלת של יתירות.
- תארו ניסויי סביבה.
- תכננו סילוק בסוף החיים.

מושגי מפתח

- בשיעור כשל קבוע λ, האמינות R(t) = e^(−λt) והזמן הממוצע בין כשלים הוא 1/λ.
- שתי יחידות במקביל: R = 1 − (1 − R₁)²; יתירות מחליפה מסה ועלות באמינות.
- "בדוק כמו שאתה טס": ניסויי רעידות, אקוסטיקה, זעזועים, ואקום תרמי ותאימות אלקטרומגנטית לפני השיגור.
- כיול שומר על דיוק הנתונים המדעיים לאורך זמן; כיול צולב עם לווייניים אחרים מחבר בין רישומים.
- בסוף החיים יש להוריד חלליות ממסלול או להעבירן למסלול סילוק כדי להגביל פסולת.

משוואות מפתח

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

```
R(t)=e^- t
```

אמינות

$$R_p = 1 - (1 - R)^2$$

```
R_p=1-(1-R)^2
```

שתיים במקביל

$$MTBF = 1/\lambda$$

```
MTBF=1/
```

זמן ממוצע בין כשלים

$$R_s = \prod R_i$$

```
R_s= R_i
```

מערכת בטור

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 ליחידה $\lambda = 10^{-5}$ לשעה (ערך דוגמה). מצאו את האמינות שלה ל־5 שנים.

1. $t = 43{,}800$ h.
2. $e^{(-0.438)}$.

תשובה: $R = 0.645$.

דוגמה 10.2 הוסיפו יחידה יתירה במקביל.

1. $1 - 0.355^{2}$.

תשובה: $R = 0.874$.

דוגמה 10.3 מצאו את ה־MTBF.

1. $1/10^{-5}$ h.

תשובה: 11.4×100000 h שנים.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. אמינות ל־10 שנים של יחידה אחת?

   0.416.

2. מערכת טורית של 0.95 ו־0.90?

   0.855.

3. ציינו ניסוי סביבה לפני שיגור.

   ואקום תרמי או רעידות.

4. למה כיול צולב?

   כדי לשמור על רישומים עקביים בין לוויינים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: יתירות היא בחינם.

בפועל: היא עולה במסה, בהספק ובכסף.

מיתוס: ניסויים מוכיחים סיכון אפס.

בפועל: הם מקטינים סיכון.

מיתוס: סילוק הוא עבודה של מישהו אחר.

בפועל: הוא מתוכנן מההתחלה.

כרטיסיות

אמינות

הסתברות לפעולה.

שיעור כשל λ

כשלים לשעה.

יתירות

יחידות גיבוי.

ניסוי ואקום תרמי

תנאי חלל על הקרקע.

כיול

שמירה על מדידות מדויקות.

סילוק

הורדה ממסלול בסוף החיים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. R ל־5 שנים…

0.645

0.95

0.5

0.1

0.645 · e^(−0.438).

2. זוג במקביל…

0.874

0.645

0.416

1

0.874. 1 − 0.355².

3. MTBF…

100,000 h

10^{-5} h

1000 h

1 h

λ/1 .100,000 h.

4. מטרת המעבר התחתי של Landsat…

כיול צולב

תדלוק

עגינה

סילוק

כיול צולב. NASA.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

נאס"א מדווחת שמיד אחרי השיגור טס Landsat 9 ישירות מתחת ל־Landsat 8 ב"מעבר תחתי" חד־פעמי במשימה, ואסף 2396 תמונות בין 12 ל־16 בנובמבר 2021, כדי שמומחי כיול ישוו את מדידות שני הלווויינים ויבטיחו רציפות נתונים.

נאס"א מציינת שכיול על הסיפון ויתירות עוזרים ל־Landsat 9 לאסוף נתונים מדויקים ואמינים לאורך חיי המשימה: הנדסת אמינות בשירות רישום פלנטרי.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · פתרונות

מקורות: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס"א.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

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

1. דרישות משימה והנדסת מערכות
   4 תרגילים
2. מסלולים וסביבת החלל
   4 תרגילים
3. ייצור הספק: מערכים סולאריים
   4 תרגילים
4. אגירת אנרגיה ותקציב ההספק
   4 תרגילים
5. בקרה תרמית
   4 תרגילים
6. מבנים, מנגנונים ועומסי שיגור
   4 תרגילים
7. הנעה ותקציב ה־delta-v
   4 תרגילים
8. תת־מערכת קביעת מצב ובקרת מצב
   4 תרגילים
9. תקשורת וטיפול בנתונים
   4 תרגילים
10. אמינות, ניסויים וסוף חיים
    4 תרגילים

המעבדה (Spacecraft design lab)

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

כל מעבדה מתבצעת בסימולציה חינמית או בגיליון אלקטרוני, כך שאין סכנות פיזיות. אל תבנו, תטענו או תשנו מארזי סוללות לקורס זה. קחו הפסקות מהמסך, שבו ביציבה טובה והרחיקו כבלים ממעברים.

מקור בטיחות: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

מעבדה A: תקציבי מסה והספק עם מרווח

שבוע 1

מטרה: בנו בגיליון אלקטרוני תקציב מסה והספק ללוויין קטן לתצפית על כדור הארץ והחילו מרווחים.

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

`m_alloc=m_est(1+M)`

הקצאה עם מרווח

מהלך הניסוי

1. מנו את תת־המערכות: מטען, מבנה, הספק, תרמיקה, ADCS, הנעה, תקשורת, C&DH.
2. הזינו הערכות מסה לדוגמה שסכומן 800 kg והערכות הספק שסכומן 500 W.
3. החילו מרווח של 20% על כל סכום.
4. הריצו את הפשרה המשוקללת בין שתי החלופות מיחידה 1 ושנו את המשקלים.

טבלת נתונים

תקציב	הערכה	עם מרווח של 20%
מסה יבשה	800 kg	960 kg
הספק	500 W	600 W

ערכי דוגמה.

חישוב לדוגמה

1. 800 × 1.2 = 960 kg.
2. 500 × 1.2 = 600 W.

> **בטיחות**
>
> - מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

הקשר לכדור הארץ: נאס"א: Landsat 9 אוסף 740 סצנות ביום מול דרישה של 400 סצנות. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

מעבדה B: מחשבון זמן מחזור מסלולי וליקוי

שבוע 2

מטרה: חשבו זמן מחזור וליקוי במקרה הגרוע לכמה גבהים של מסלול נמוך.

$$T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu}$$

T=2π^3/μ

זמן מחזור מסלולי

מהלך הניסוי

1. הזינו גבהים של 400, 705 ו־1000 km.
2. חשבו a, T ומסלולים ביום.
3. חשבו את חלק הליקוי ואת הדקות.
4. השוו את 705 km לערכי נאס"א עבור Landsat 9.

טבלת נתונים

גובה (km)	T (min)	ליקוי (min)
400	92.6	36.1
705	98.9	35.3
1000	105.1	34.9

ערכים מחושבים למקרה הגרוע (השמש במישור המסלול).

חישוב לדוגמה

1. T(400) = 2π√(6778.1³/398600.4) = 92.6 min.
2. ליקוי(705) = 0.357 × 98.9 = 35.3 min.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

הקשר לכדור הארץ: נאס"א מציינת ש־Landsat 9 בגובה 705 km עם זמן מחזור של 99 דקות. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

מעבדה C: תאים סולאריים בטור ובמקביל

שבוע 3

מטרה: חברו מקורות כסוללות ב־PhET Circuit Construction Kit כדי לראות שרשראות בטור ובמקביל, ואז קבעו גודל מערכים ברחבי מערכת השמש.

$$A = \frac{P}{S \eta f_d}$$

```
A=(P)/(S f_d)
```

שטח המערך

מהלך הניסוי

1. ב־PhET Circuit Construction Kit, חברו מקורות בטור ובמקביל ורשמו מתח וזרם.
2. בגיליון אלקטרוני, חשבו שטח מערך עבור 500 W עם η = 0.30 ו־f_d = 0.85.
3. חזרו ב־1, 1.524 ו־5.2 יחידות אסטרונומיות.
4. הסבירו למה משימות לכוכבי הלכת החיצוניים צריכות מערכים ענקיים.

טבלת נתונים

מרחק (יחידות אסטרונומיות)	שטח עבור 500 W (m²)
1	1.44
1.524	3.35
5.2	39.0

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 500/(1361 × 0.3 × 0.85) = 1.44 m².
2. 1.44 × 5.2² = 39.0 m².

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל דפדפן וגיליון אלקטרוני מתאימים.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsys

tems/)

הקשר לכדור הארץ: נאס"א: מוטת המערכים הפרושים של Europa Clipper עולה על 30 מטר. NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

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

מעבדה D: קביעת גודל סוללה לליקוי

שבוע 4

מטרה: קבעו גודל סוללות לעומסים שונים במהלך ליקוי של 35.3 דקות.

$$E = \frac{P_e t_e}{DoD}$$

E=(P_et_e)/(DoD)

אנרגיית סוללה

מהלך הניסוי

1. השתמשו בליקוי ב־705 km ממעבדה B.
2. הזינו עומסים של 300, 500 ו־800 W.
3. חשבו אנרגיית סוללה ב־DoD של 30% ומסה ב־150 Wh/kg.
4. חזרו עם DoD של 20% ודונו בחיי המחזורים.

טבלת נתונים

עומס (W)	סוללה (Wh)	מסה (kg)
300	588	3.92
500	980	6.53
800	1568	10.45

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 300 × 0.588 h/0.3 = 588 Wh.
2. 1568/150 = 10.45 kg.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-so/a/power-subsystems)

הקשר לכדור הארץ: נאס"א מונה תאי 18650 של 260 Wh/kg עם מורשת במשימת PACE שלה. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (/https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems)

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

מעבדה E: מאזן קרינה וקביעת גודל רדיאטור

שבוע 5

מטרה: חקרו קרינה תרמית ב־PhET Blackbody Spectrum, ואז חשבו טמפרטורות שיווי משקל ושטחי רדיאטור.

$$T = \left(\frac{\alpha S}{4\varepsilon\sigma}\right)^{1/4}$$

T=((α S)/(4σ))^1/4

שיווי משקל של כדור

מהלך הניסוי

1. ב־PhET Blackbody Spectrum, השוו ספקטרומים ב־250, 290 ו־6000 K.
2. חשבו טמפרטורות כדור עבור α/ε = 0.5, 1 ו־2.
3. חשבו שטח רדיאטור עבור 500 W ב־250, 290 ו־320 K עם ε = 0.85.
4. בחרו טמפרטורת רדיאטור והסבירו את הפשרה.

טבלת נתונים

מקרה	תוצאה
α/ε = 0.5	234.0 K
α/ε = 1	278.3 K
α/ε = 2	331.0 K
רדיאטור ב־250 K	2.66 m²
רדיאטור ב־320 K	0.99 m²

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. T = 278.3 × 0.5^¼ = 234.0 K.
2. A = 500/(0.85σ × 320⁴) = 0.99 m².

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל דפדפן וגיליון אלקטרוני מתאימים.

PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: Thermal Control (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/thermal-control/)

הקשר לכדור הארץ: נאס"א: ה־TIRS של Landsat 9 משתמש ברדיאטור של מקרר קריוגני ובגוף שחור על הסיפון. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

מעבדה F: תקציב קישור יורד

שבוע 11

מטרה: בנו תקציב קישור בדציבלים וראו כיצד מרחק וגודל אנטנה משנים את המרווח.

$$L = 20\log_{10}\frac{4\pi d}{\lambda}$$

```
L=20_10(4π d)/()
```

הפסד מרחב חופשי

מהלך הניסוי

1. השתמשו ב־f = 8.2 GHz וב־c = 3 × 10⁸ m/s.
2. חשבו את ההפסד ב־1000, 2000 ו־4000 km.
3. הוסיפו הספק שידור, את הגברי שתי האנטנות והפסדים אחרים.
4. מצאו את גודל הצלחת שמשיב את המרווח ב־4000 km.

טבלת נתונים

מרחק (km)	הפסד מסלול (dB)
1000	170.7
2000	176.7
4000	182.8

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. λ = 0.03659 m.
2. $20\log_{10}(4\pi \times 10^{6}/0.03659) = 170.7$ dB.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/

הקשר לכדור הארץ: נאס"א: Europa Clipper נושאת אנטנת הגבר גבוה של 3 מטר. NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

☐ **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. הקצו הערכה של 500 kg עם מרווח של 30%.

.1 .500 × 1.3

תשובה: 650 kg.

2. מצאו את זמן המחזור של מסלול מעגלי ב־550 km.

.1 .a = 6928.1 km
.2 .T = 2π√(a³/μ)

תשובה: 95.6 min.

3. שטח מערך עבור 1 kW ב־1 יחידה אסטרונומית, η = 0.30, f_d = 0.85?

.1 .1000/(1361 × 0.3 × 0.85)

תשובה: 2.88 m².

4. סוללה עבור 400 W במשך 35 min ב־DoD של 25%?

.1 .400 × 35/60/0.25

תשובה: 933 Wh.

5. רדיאטור עבור 300 W ב־300 K, ε = 0.9?

.1 .300/(0.9σ × 300⁴)

תשובה: 0.73 m².

סדרת תרגול מסכמת (יחידות 10–1)

1. תדירות טבעית עבור k = 4 × 10⁵ N/m, m = 40 kg?

.1 .(1/2π)√(10⁴)

תשובה: 15.9 Hz.

2. חומר הנעה עבור 200 m/s על 800 kg ב־Isp של 230 s?

1. 800(1 − e^(−200/2255.5)).

תשובה: 67.9 kg.

3. שגיאה קרקעית עבור 0.005° מ־600 km?

1. 8.727 × 10⁻⁵ × 600,000.

תשובה: 52.4 m.

4. הפסד ב־1500 km, 8.2 GHz?

1. 20 log₁₀(4π × 1.5 × 10⁶/0.03659).

תשובה: 174.2 dB.

5. אמינות עבור 2 × 10⁻⁶ /h = λ לאורך 7 שנים?

1. e^(−0.1226).

תשובה: 0.885.

6. זוג במקביל של יחידות 0.885?

1. 1 − 0.115².

תשובה: 0.987.

דף נוסחאות

$$m_{alloc} = m_{est}(1+M),\ S = \sum w_i s_i$$

$$T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu},\ v = \sqrt{\mu/a},\ f_e \approx \sin^{-1}(R_E/a)/\pi$$

$$P = S\eta A\cos\theta,\ S = 1361/r^2$$

$$E = P_e t_e/DoD,\ m_b = E/e_{sp}$$

$$Q = \varepsilon\sigma A T^4,\ T = (\alpha S/4\varepsilon\sigma)^{1/4}$$

$$F = nmg_0,\ f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$$

$$m_p = m_0(1 - e^{-\Delta v/v_e})$$

$$\theta = x/h,\ e = h\theta,\ H = \tau t$$

$$L = 20\log_{10}(4\pi d/\lambda),\ G = \eta(\pi D/\lambda)^2$$

$$R = e^{-\lambda t},\ R_p = 1-(1-R)^2$$

קבועים

קבוע	ערך
μ של כדור הארץ	398,600.4418 km³/s²
רדיוס כדור הארץ (משוויני)	6378.137 km
שטף שמש ב־1 יחידה אסטרונומית (ערך ספר לימוד)	1361 W/m²
קבוע סטפן–בולצמן	σ = 5.670374419 × 10⁻⁸ W/(m²·K⁴)
מהירות האור	299792458 m/s (בדוגמאות נעשה שימוש ב־3 × 10⁸)
כבידה תקנית	g_0 = 9.80665 m/s²

מקור: NIST: CODATA value, Stefan–Boltzmann constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma)

טקסטים וסימולציות בחינם

השתמשו בהרצאות החינמיות, במקורות של נאס״א ובסימולציות לצד הקורס.

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-200/3/): הרצאות MIT חינמיות בהנדסת לווויינים.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס״א.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): סקר טכנולוגי חינמי של נאס״א.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): פרק חינמי של נאס״א על הספק.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): קרינה תרמית באופן אינטראקטיבי.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): מעגלים באופן אינטראקטיבי.

מילון מונחים

ADCS

תת־מערכת קביעת מצב ובקרת מצב.

הגבר אנטנה

ריכוז האלומה ביחס למקור איזוטרופי.

Bus

פלטפורמת החללית הנושאת את המטען.

C&DH

פיקוד וטיפול בנתונים.

עומק פריקה

החלק מקיבול הסוללה שנוצל.

ליקוי
זמן בצל של כוכב לכת.

פליטות
יכולת לפלוט חום בקרינה.

סוף חיים
ביצועים אחרי התדרדרות.

קלע כבידתי
חלוף ליד כוכב לכת שמשנה מהירות.

מורשת
תכנון שהוכח בטיסה.

תקציב קישור
סכום ההגברים וההפסדים בקישור רדיו.

מרווח
עתודה מעל הצורך.

בידוד רב־שכבתי
שמיכה תרמית שחוסמת קרינה.

הפסד מסלול
הפסד התפשטות אות.

מטען
המכשירים שלשמם קיימת המשימה.

יתירות
חומרת גיבוי.

דרישה
צורך מדיד וניתן לאימות.

שטף שמש
הספק אור שמש ליחידת שטח.

הספק סגולי
הספק ליחידת מסה.

מסלול סינכרוני לשמש
מסלול שחוצה באותה שעה מקומית מדי יום.

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	מתחיל מהדרישות, מנהל תקציבים עקביים עם מרווחים, בודק יחידות וסדרי גודל, ומסביר במילים פשוטות את הפשרות בין תת־מערכות.

רמה	איך זה נראה
3 · מיומן	פותר את תרגילי התרגול עם החלקות מזדמנות ביחידות או במרווחים.
2 · מתפתח	עוקב אחר דוגמאות פתורות אך מבלבל בין הספק לאנרגיה או בין dB לערכים ליניאריים.
1 · מתחיל	מציב מספרים בנוסחאות בלי דרישה או תקציב; צריך לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

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

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- דינמיקת טיסה ובקרה AERO 420
- מעבר חום AERO 440
- הנעה AERO 410
- כל הקורסים