עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 4, 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 פרויקט גמר סמסטריאלי בהנדסת אווירונאוטיקה וחלל בשנה האחרונה. הוא בנוי לפי גישת הגה־תכנן־ממש־תפעל של MIT 16.83X Space Systems Engineering (חינם ב־MIT OpenCourseWare) ושל NASA Systems Engineering Handbook, שאליהם אנו מקשרים היכן שהם מועילים. לא MIT ולא NASA מעניקים חסות לדף זה.

מה שאנו מוסיפים: שני מסלולים מקבילים (רחפן חשמלי קטן או 3U CubeSat), כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית עם מקור ציבורי מצוטט, כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני פרסומו, וכל מעבדה בגיליון אלקטרוני חינמי.

עברו עליו לפי הסדר, לבד או בצוות. לכל יחידה מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן זה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

צוותי פרויקטי גמר בונים את הלווויינים וכלי הטיס שמודדים ומגנים על כדור הארץ: לווייני CubeSat של סטודנטים טסים דרך CubeSat Launch Initiative של NASA, ולווויינים קטנים כמו PREFIRE חוקרים כיצד הארקטי פולט חום.

בצד המטוסים, Sustainable Flight National Partnership של NASA שואפת לשיפורי יעילות אנרגטית של 25–30%. כל יחידה מסתיימת בקטע קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכים לדוגמה או כערכי 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 490).
- 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

- אוויוניקה והנדסת מערכות: דרישות, אמינות ואימות.
- תכן חלליות: תקציבי הספק, תרמיקה וקשר.
- ביצועי מטוסים: עילוי, גרר, טווח וטיפוס.
- מבנים אווירונאוטיים: מאמצים, מקדמי ביטחון ומרווחים.

איך ללמוד

- נהלו מחברת תכן או גיליון אלקטרוני אחד שממנו נובע כל מספר.
- קשרו כל החלטת תכן לדרישה.
- סגרו תקציבים עם מרווח לפני הוספת פרטים.
- קיימו סקרים שבועיים קצרים, גם כשאתם עובדים לבד.
- כתבו תוך כדי: כל יחידה מוסיפה פרק לדוח המסכם שלכם.
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שאתם פותחים את התשובה, וחזרו על הבחנים כעבור כמה ימים.

מה צריך

- תוכנת גיליון אלקטרוני (כל תוכנה חינמית מתאימה), או Python.
- NASA Systems Engineering Handbook החינמי בדפדפן.
- תוכנת מצגות חינמית לסקרי התכן שלכם.
- מחשבון.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

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

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	משימה, בעלי עניין ודרישות	משימה ודרישות; מעבדה A	NASA SE Handbook
2	יצירת תפיסות ובחירתן	בחירת תפיסה; מעבדה B	MIT 16.83X
3	מסלול מטוס: תכנון משקל וטווח	תכנון משקל המטוס	NASA SFNP
4	מסלול מטוס: תכנון משקל וטווח	טווח ולולאת תכנון; מעבדה C	MIT 16.83X

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
5	מסלול מטוס: עומס כנף והספק	עומס כנף והספק	NASA SFNP
6	מסלול CubeSat: תכנון ממדים ומסלול	תכנון ממדים ומסלול ל־CubeSat; מעבדה D	NASA PREFIRE
7	מסלול CubeSat: תקציבי הספק וקשר	תקציבי הספק וקשר; מעבדה E; תרגול לבוחן אמצע	NASA SST SOA
8	בדיקות מבניות ותרמיות	בדיקות מבניות ותרמיות	MIT 16.83X
9	עלות, לוח זמנים וסיכונים	מבנה פירוק עבודה ולוח זמנים	NASA SE Handbook
10	עלות, לוח זמנים וסיכונים	ערך מזוכה וסיכונים; מעבדה F	NASA SE Handbook
11	אב טיפוס, בדיקות ואימות	תכנון אב טיפוס	MIT 16.83X
12	אב טיפוס, בדיקות ואימות	בדיקות	NASA CSLI
13	אב טיפוס, בדיקות ואימות	סגירת אימות	NASA SE Handbook
14	סקרי תכן ודוח מסכם	סקר תכן קריטי	MIT 16.83X
15	סקרי תכן ודוח מסכם	דוח מסכם; תרגול מסכם	NASA SE Handbook

ההתקדמות שלכם

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

יחידות

משימה, בעלי עניין ודרישות

בחירת מסלול, הגדרת המשימה, זיהוי בעלי עניין, כתיבת דרישות ניתנות לאימות וקביעת הקצאות עם מרווח.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- כתבו הצהרת משימה במשפט אחד.
- פרטו בעלי עניין וצורכיהם.
- כתבו דרישות ניתנות לאימות.
- חשבו מרווח ביחס להקצאה.

מושגי מפתח

- בחרו מסלול אחד: רחפן חשמלי קטן הנושא חיישן, או 3U CubeSat הצופה בכדור הארץ.
- הצהרת משימה אומרת מי צריך מה ולמה; הדרישות הופכות אותה למדידה.
- בעלי עניין כוללים משתמשים, גורמי מימון, רשויות שיגור או מרחב אווירי, ואת הצוות עצמו.
- לכל דרישה יש מספר, יחידה ושיטת אימות (בדיקה, ניתוח, בחינה או הדגמה).
- הקצאות כוללות מרווח מוקדם, כי הערכות גדלות ככל שהתכן מבשיל.

משוואות מפתח

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

`Margin=(A-E)/(E)`

מרווח ההקצאה מעל ההערכה

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

`m_alloc=m_est(1+M)`

הקצאה עם מרווח

$$m_{3U} \approx 3 \times 1.33\ \text{kg}$$

מסת 3U מותרת (ערך ספר לימוד)

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

סכום המשקלים הוא אחד

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 ל־3U CubeSat הקצאה של 4.0 kg (ערך ספר לימוד) והערכה של 3.4 kg. מרווח?

1. (4.0 − 3.4)/3.4.

תשובה: 17.6%.

דוגמה 1.2 חיישן של רחפן מוערך ב־0.8 kg. הקצו עם מרווח של 25% (ערכים לדוגמה).

1. 0.8 × 1.25.

תשובה: 1.0 kg.

דוגמה 1.3 כתבו דרישה ניתנת לאימות לזמן השהייה באוויר של הרחפן.

1. מספר, יחידה, שיטה.

תשובה: "הרחפן יטוס לפחות 30 דקות ב־15 m/s, באימות בניסוי טיסה."

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מרווח אם ההערכה גדלה ל־3.8 kg?

   5.26%.

2. שלוש יחידות של 1.33 kg (ערך ספר לימוד)?

   3.99 kg, כ־4 kg.

3. מנו ארבעה בעלי עניין ל־CubeSat של סטודנטים.

   לדוגמה: משתמשי המדע, האוניברסיטה, ספק השיגור והרגולטור של תדרי הרדיו.

4. האם "ה־CubeSat יהיה אמין" ניתנת לאימות?

   לא; הוסיפו מספר ושיטה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: דרישות מתארות את התכן.

בפועל: הן מבטאות צרכים, לא פתרונות.

מיתוס: אפשר להוסיף מרווח מאוחר יותר.

בפועל: הכי זול להחזיק אותו מוקדם.

מיתוס: בעל עניין אחד מספיק.

בפועל: בעלי עניין שנשכחו גורמים להפתעות מאוחרות.

כרטיסיות

הצהרת משימה	**בעל עניין**
מי צריך מה ולמה.	כל מי שיש לו צורך או השפעה.
דרישה	**הקצאה**
צורך ניתן לאימות.	נתח מתוקצב.
מרווח	**מסלול**
רזרבה מעל ההערכה.	מסלול פרויקט רחפן או CubeSat.

בוחן לבדיקה עצמית

1. מרווח מסה…

17.6%

15%

0.6%

85%

.17.6%. (4.0 − 3.4)/3.4

2. 0.8 kg + 25%…

1.0 kg

0.85 kg

1.25 kg

0.6 kg

1.0 kg. הכפילו.

3. שיטות אימות…

בדיקה, ניתוח, בחינה, הדגמה

ניחוש, תקווה, המתנה, משלוח

עלות, לוח זמנים, סיכון, היקף

PDR, CDR, TRR, FRR

בדיקה, ניתוח, בחינה, הדגמה. ארבע שיטות.

4. הצהרת משימה אומרת…

מי צריך מה ולמה

מידות הברגים

רק את התקציב

רק את מועד השיגור

מי צריך מה ולמה. תכלית.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

CubeSat Launch Initiative של NASA מציעה ללווייני CubeSat שנבנו בידי מוסדות חינוך וארגונים ללא מטרות רווח בארה"ב, כולל מוזיאונים ומרכזי מדע, הזדמנויות לטוס בשיגורים קרובים; NASA אומרת ששיגרה יותר מ־150 לווייני CubeSat.

NASA אומרת שהודעת הזדמנויות השותפות שלה מתפרסמת בדרך כלל בכל אוגוסט עם הגשת הצעות בנובמבר, כך שאפשר לעצב פרויקט גמר כמו הצעה אמיתית.

ב־Saving Planets: תכנון חלליות · אוויוניקה והנדסת מערכות

מקורות: NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס"א.
- NASA CSLI: NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/).

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

יצירת תפיסות ובחירתן

סיעור מוחות, טבלאות מורפולוגיות, מטריצות Pugh, מטריצות החלטה משוקללות ורגישות למשקלות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- צרו כמה תפיסות.
- בנו טבלה מורפולוגית.
- דרגו תפיסות במטריצה משוקללת.
- בדקו רגישות למשקלות.

מושגי מפתח

- צרו הרבה תפיסות לפני ששופטים אחת מהן; כמות קודם, איכות אחר כך.
- טבלה מורפולוגית מפרטת אפשרויות לכל פונקציה ומשלבת אותן לתפיסות.
- מטריצת Pugh משווה תפיסות לנקודת ייחוס עם 0, +ו־−.
- מטריצת החלטה משוקללת מכפילה ציונים במשקלות ומסכמת.
- אם שינויים קטנים במשקלות הופכים את המנצח, ההחלטה זקוקה לנתונים נוספים.

משוואות מפתח

$$S = \sum w_i s_i$$

S= w_is_i

ציון משוקלל

$$N = \prod n_i$$

N= n_i

צירופים מורפולוגיים

$$P = n_+ - n_-$$

P=n_+-n_-

ציון Pugh נטו

$$\sum w_i = 1$$

w_i=1

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 תפיסה A מקבלת 6 (עלות), 9 (ביצועים), 5 (סיכון); B מקבלת 8, 6, 8. משקלות 0.3, 0.5, 0.2. מי מנצחת?

1. A = 1.8 + 4.5 + 1.0 = 7.3.
2. B = 2.4 + 3.0 + 1.6 = 7.0.

תשובה: A, 7.3 מול 7.0.

דוגמה 2.2 שנו את המשקלות ל־0.4, 0.3, 0.3.

1. A = 2.4 + 2.7 + 1.5 = 6.6.
2. B = 3.2 + 1.8 + 2.4 = 7.4.

תשובה: B מנצחת: הבחירה רגישה למשקלות.

דוגמה 2.3 בטבלה 3 אפשרויות הספק, 2 מבנים ו־4 חיישנים. כמה צירופים?

1. 4 × 2 × 3.

תשובה: 24.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. Pugh: 4 פלוסים, 1 מינוס. נטו?

   +3.

2. צירופים עבור 2 × 3 × 3 × 2?

   36.

3. מדוע לבדוק רגישות למשקלות?

   כדי לראות אם המנצח יציב.

4. מדוע לסער מוחות לפני מתן ציונים?

   שיפוט מוקדם הורג רעיונות טובים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הציון הגבוה ביותר תמיד צודק.

בפועל: בדקו רגישות והנחות.

מיתוס: המשקלות אובייקטיביים.

בפועל: הם מקודדים שיקול דעת.

מיתוס: תפיסה אחת מספיקה.

בפועל: השוו כמה.

כרטיסיות

טבלה מורפולוגית

אפשרויות לכל פונקציה.

מטריצת Pugh

השוואה לנקודת ייחוס.

מישור ייחוס

תפיסת ייחוס.

מטריצה משוקללת

ציונים כפול משקלות.

רגישות

כיצד התוצאות משתנות עם הקלטים.

סינון

בחירת תפיסה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הציון של A…

7.3

7.0

6.6

20

7.3. סכום משוקלל.

2. הציון של B…

7.0

7.3

7.4

22

7.0. סכום משוקלל.

3. אחרי שקלול מחדש…

B מנצחת

A מנצחת

תיקו

אף אחד מהם

B מנצחת. 6.6 < 7.4.

4. צירופים…

24

9

12

48

4 × 2 × 3 .24.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

Sustainable Flight National Partnership של NASA פועלת בשלושה תחומים: טכנולוגיות כלי טיס מתקדמות, תפעול יעיל של חברות תעופה ודלקי תעופה בני־קיימא.

שקילת אפשרויות בין תחומים כאלה היא בעיית בחירת תפיסה: המשקלות הנכונים תלויים במה שבעלי העניין מעריכים, כולל פליטות.

ב־Saving Planets: פתרונות · ביצועי מטוסים

מקורות: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס"א.

צפו בהרצאה

Session 4: System Architecture and Concept Generation (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-4-system-architecture-and-concept-generation/) (באנגלית)

MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015), 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**

מסלול מטוס: תכנון משקל וטווח

הערכת משקל המראה משברי משקל, משוואת הטווח של ברגה, וכיצד שיפורי יעילות משנים טווח ודלק.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- העריכו משקל המראה משברים.
- החילו את משוואת הטווח של ברגה.
- הראו כיצד L/D משנה טווח.
- בצעו איטרציה בלולאת תכנון.

מושגי מפתח

- משקל ההמראה שווה למטען חלקי אחד פחות שברי המשקל הריק והאנרגיה.
- אם סכום שברי המשקל הריק והאנרגיה מתקרב ל־1, התכן אינו נסגר.
- למטוסי סילון, טווח ברגה הוא (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f).
- הטווח יחסי ל־L/D, ולכן שיפור של 30% ב־L/D נותן 30% יותר טווח באותו שבר דלק.
- התכנון איטרטיבי: להעריך, לחשב, לעדכן שברים ולחזור עד שהמשקל מתכנס.

משוואות מפתח

$$W_0 = \frac{W_{pay}}{1 - W_e/W_0 - W_f/W_0}$$

```
W_0=_pay1-W_e/W_0-W_f/W_0
```

משקל המראה

$$R = \frac{V}{c}\frac{L}{D}\ln\frac{W_i}{W_f}$$

```
R=V/cL/D(W_i)/(W_f)
```

טווח ברגה (סילון)

$$R \propto L/D$$

הטווח גדל עם L/D

$$W = mg$$

```
W=mg
```

משקל

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 רחפן נושא מטען של 1 kg עם שבר משקל ריק 0.5 ושבר סוללה 0.3 (ערכים לדוגמה). מסת המראה?

1. $1/(1 - 0.5 - 0.3)$.

תשובה: 5 kg.

דוגמה 3.2 מטוס תובלה טס ב־230 m/s עם $c = 0.6$ לשעה, $L/D = 17$ ו־$W_i/W_f = 1.25$ (ערכי ספר לימוד). טווח?

1. $c = 1.667 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$.
2. $R = (230/1.667 \times 10^{-4}) \times 17 \times \ln 1.25 = 1.38 \times 10^{6} \times 17 \times 0.2231$.

תשובה: כ־5235 km.

דוגמה 3.3 הגדילו את L/D ב־30%.

1. הטווח גדל עם L/D.

תשובה: כ־6805 km.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מסת המראה אם שבר הסוללה עולה ל־0.35?

   6.67 kg.

2. משקל הרחפן של 5 kg?

   49.0 N.

3. מדוע השברים לא יכולים להסתכם ל־1?

   לא יישאר דבר למטען.

4. $\ln 1.25$?

   0.223.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: יותר סוללה פירושו תמיד יותר טווח.

בפועל: היא גם מעלה משקל; השבר הוא שקובע.

מיתוס: ברגה מתאים למטוסים חשמליים.

בפועל: סוללות לא נעשות קלות יותר; השתמשו בצורה אנרגטית.

מיתוס: מעבר אחד מספיק.

בפועל: בצעו איטרציה עד שהמשקל מתכנס.

כרטיסיות

שבר משקל ריק

משקל ריק חלקי משקל המראה.

שבר דלק

דלק חלקי משקל המראה.

ברגה

משוואת הטווח.

L/D

יחס עילוי לגרר.

TSFC

צריכת דלק סגולית לדחף.

לולאת תכנון

איטרציה עד התכנסות.

בוחן לבדיקה עצמית

1. מסת המראה של הרחפן…

5 kg

2 kg

1.25 kg

10 kg

.5 kg. 1/0.2

2. טווח מטוס התובלה…

≈ 5235 km

≈ 523 km

≈ 52,000 km

≈ 1380 km

≈ 5235 km. ברגה.

3. עם +30% ב־L/D…

≈ 6805 km

≈ 5235 km

≈ 4027 km

≈ 10,470 km

≈ 6805 km. × 1.3.

4. הטווח גדל עם…

L/D

c

W_f

גרר

L/D. ברגה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לפי NASA, ה־Sustainable Flight National Partnership שואף לאפשר שיפורי יעילות אנרגטית של 25–30% במטוסי תובלה מהדור הבא שיכולים להשתמש ב־100% דלק תעופה בר־קיימא ולטוס במסלולים מיטביים.

גולת הכותרת היא מטוס ניסוי X-plane בקנה מידה מלא הבודק תכן אווירודינמי יעיל במיוחד, עם טיסה ראשונה לא לפני סוף 2026; L/D גבוה יותר הוא בדיוק המנוף שמשוואת ברגה ביחידה זו מתגמלת.

ב־Saving Planets: ביצועי מטוסים · פתרונות

מקורות: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

מסלול מטוס: עומס כנף והספק

תכנון לפי אילוצים: עומס כנף ממהירות הזדקרות, שטח כנף והספק טיפוס לכלי טיס חשמלי קטן.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מצאו עומס כנף ממהירות הזדקרות.
- תכננו את שטח הכנף.
- חשבו הספק טיפוס.
- שרטטו דיאגרמת אילוצים פשוטה.

מושגי מפתח

- מהירות ההזדקרות קובעת את עומס הכנף המרבי: W/S = ½ρV_s²C_Lmax.
- שטח הכנף נובע מהמשקל חלקי עומס הכנף.
- הספק הציר בטיפוס מכסה את הגרר ((W V/(L/D)) ועוד את איבר הטיפוס (× W קצב טיפוס), חלקי נצילות ההנעה.
- כל דרישה משרטטת קו בגרף של W/S מול יחס הספק למשקל; נקודת התכן נמצאת באזור שמקיים את כולן.
- רחפנים קטנים טסים במספרי ריינולדס נמוכים, לכן בדקו נתוני פרופילים בקנה מידה קטן.

משוואות מפתח

$$\frac{W}{S} = \frac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max}$$

W/S=12ρ V_s^2C_L,max

עומס כנף בהזדקרות

$$S = \frac{W}{W/S}$$

S=(W)/(W/S)

שטח כנף

$$P = \frac{W}{\eta}\left(\frac{V}{L/D} + RC\right)$$

P=(W)/()((V)/(L/D)+RC)

הספק טיפוס

$$q = \frac{1}{2}\rho V^2$$

q=12ρ V^2

לחץ דינמי

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 הזדקרות ב־12 m/s, C_Lmax = 1.2, גובה פני הים. עומס כנף?

1. ½ × 1.225 × 144 × 1.2.

תשובה: 105.8 N/m².

דוגמה 4.2 שטח כנף לרחפן של 5 kg?

1. 49.03/105.84.

תשובה: 0.463 m².

דוגמה 4.3 הספק טיפוס ב־15 m/s, L/D = 10, טיפוס של 2 m/s, η = 0.7?

1. 49.03 × (1.5 + 2) = 171.6 W.
2. 171.6/0.7.

תשובה: 245 W.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. עומס כנף להזדקרות ב־10 m/s?

73.5 N/m².

2. הספק בלי איבר הטיפוס?

105.1 W.

3. לחץ דינמי ב־15 m/s?

137.8 Pa.

4. מדוע ההזדקרות קובעת W/S מרבי?

W/S גבוה יותר דורש מהירות הזדקרות גבוהה יותר.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: כנפיים גדולות יותר תמיד עדיפות.

בפועל: הן מוסיפות משקל וגרר.

מיתוס: הספק הטיפוס קטן.

בפועל: הוא עשוי לשלוט ברחפנים קטנים.

מיתוס: η = 1.

בפועל: מדחפים ומנועים מאבדים אנרגיה.

כרטיסיות

עומס כנף

משקל ליחידת שטח כנף.

C_Lmax

מקדם עילוי מרבי.

דיאגרמת אילוצים

דרישות בגרף אחד.

קצב טיפוס

מהירות אנכית.

נצילות הנעה

חלק ההספק המועיל.

מהירות הזדקרות

מהירות יציבה מזערית.

בוחן לבדיקה עצמית

W/S .1…

105.8 N/m²

88.2

1058

10.6

105.8 N/m². ½ρV²C_L.

2. שטח כנף…

0.463 m²

4.63 m²

0.0463 m²

1 m²

.0.463 m². W/(W/S)

3. הספק טיפוס…

245 W

171.6 W

49 W

490 W

245 W. חלקו ב־ח.

4. נקודת התכן נמצאת…

היכן שכל האילוצים מתקיימים

על קו כלשהו

בראשית

בחוץ

היכן שכל האילוצים מתקיימים. אזור ישים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

Sustainable Flight National Partnership של NASA מכוונת גם לתפעול יעיל של חברות תעופה ולמסלולים מיטביים, היכן שבחירות ההספק והטיפוס פוגשות את צריכת הדלק.

רחפנים חשמליים קטנים שתוכננו היטב כמו ביחידה זו כבר משמשים לסקרי גידולים, יערות וקווי חוף. הערכים ביחידה זו הם ערכים לדוגמה.

ב־Saving Planets: ביצועי מטוסים · אווירודינמיקה 1

מקורות: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

מסלול CubeSat: תכנון ממדים ומסלול

תצורות CubeSat, מסה מותרת, זמן מחזור מסלולי, מעברים ביום ושבר ליקוי במסלול נמוך סביב כדור הארץ.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- תכננו תקציב מסה ל־3U CubeSat.
- חשבו זמן מחזור מסלולי.
- חשבו מסלולים ביום.
- חשבו את הליקוי במקרה הגרוע.

מושגי מפתח

- לווייני CubeSat באים ביחידות (U) של 10 cm; 3U הוא כ־34 cm × 10 × 10 (ערך ספר לימוד).
- המסה המותרת היא כ־1.33 kg ל־U (ערך ספר לימוד); אשרו מול ספק השיגור.
- זמן המחזור תלוי רק בציר הראשי למחצה: T = 2π√(a³/μ).
- במקרה הגרוע (השמש במישור המסלול), שבר הליקוי הוא asin(R_E/a)/π.
- מסלולים נמוכים דועכים מהר יותר בשל גרר; רוב לווייני ה־CubeSat של סטודנטים חוזרים לאטמוספרה תוך שנים.

משוואות מפתח

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

T=2π^3/μ

זמן מחזור מסלולי

$$f_e = \frac{1}{\pi}\sin^{-1}\frac{R_E}{a}$$

f_e=(1)/(π)^-1(R_E)/(a)

שבר ליקוי במקרה הגרוע

$$n = 1440/T$$

n=1440/T

מסלולים ביום (T בדקות)

$$a = R_E + h$$

a=R_E+h

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 זמן מחזור בגובה 500 km?

.1 $a = 6878.1\ \text{km}$.
.2 $T = 2\pi\sqrt{(6878.1^3/398{,}600.4)}$.

תשובה: 94.6 min.

דוגמה 5.2 מסלולים ביום?

.1 $1440/94.6$.

תשובה: 15.2.

דוגמה 5.3 ליקוי במקרה הגרוע?

.1 $\alpha = \arcsin(6378.1/6878.1) = 0.378$.
.2 94.6×0.378.

תשובה: 35.8 min.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מסה מותרת ל־3U ב־1.33 kg/U?

   3.99 kg.

2. זמן בשמש בכל מסלול?

   58.9 min.

3. האם זמן המחזור תלוי במסת ה־CubeSat?

   No.

4. מדוע מסלולים נמוכים דועכים?

   גרר אטמוספרי.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: לוויינים כבדים יותר מקיפים לאט יותר.

בפועל: זמן המחזור תלוי רק ב־a.

מיתוס: הליקוי תמיד 50%.

בפועל: הוא תלוי בגובה ובזווית השמש.

מיתוס: להשתמש בגובה בחוק קפלר.

בפועל: השתמשו ב־a = R_E + h.

כרטיסיות

CubeSat

לוויין קטן תקני ביחידות של 10 cm.

3U

CubeSat בן שלוש יחידות.

זמן מחזור

זמן למסלול.

שבר ליקוי

החלק מהמסלול שבצל.

ציר ראשי למחצה

R_E + h למסלולים מעגליים.

דעיכה

אובדן מסלול בשל גרר.

בוחן לבדיקה עצמית

1. זמן מחזור…

94.6 min

90 min

100 min

84.4 min

94.6 min. 2π√(a³/μ).

2. מסלולים ביום…

15.2

14.5

16

24

.15.2. 1440/T

3. ליקוי…

35.8 min

47 min

20 min

0 min

.35.8 min. 0.378 × 94.6

4. מסת 3U…

≈ 4 kg

≈ 1.33 kg

≈ 12 kg

≈ 40 kg

.≈ 4 kg. 3 × 1.33

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת ש־PREFIRE משתמש בזוג לווייניים זעירים, לווייני CubeSat ששוגרו במאי 2024, כדי למדוד חלק שנחקר מעט מהאנרגיה הקרינתית שכדור הארץ פולט, בחיפוש אחר רמזים לאובדן קרח ים, להפשרת יריעות קרח ולהתחממות הארקטי.

NASA מכנה את הארקטי האזור שמתנהג כמו התרמוסטט של כוכב הלכת שלנו, ופורק עודפי אנרגיה שהתקבלו באזורים הטרופיים, ולכן זוג לוויינים קטנים שם חשוב.

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

מקורות: NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): NASA PREFIRE.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): דוח NASA חינמי.

סיימתי את היחידה הזו

מסלול CubeSat: תקציבי הספק וקשר

תפוקת לוחות סולאריים, הספק ממוצע למסלול, תכנון סוללה לליקוי, הנחתת מסלול בקשר UHF ונפח נתונים יומי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו את תפוקת הלוחות באור השמש.
- חשבו הספק ממוצע למסלול.
- קבעו גודל סוללה לליקוי.
- העריכו הנחתת מסלול ונתונים ליום.

מושגי מפתח

- הספק הלוחות = שטף שמש × נצילות התאים × שטח cos ×(זווית).
- הייצור הממוצע למסלול מופחת בשבר הליקוי (ובפועל גם בשל הכיוון).
- הסוללה מכסה את העומס בזמן הליקוי; הגבלת עומק הפריקה מאריכה את חייה במחזורים.
- הנחתה במרחב חופשי גדלה כמו $20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$; תחומי UHF של חובבי רדיו נפוצים בלווייני CubeSat של סטודנטים.
- נפח הנתונים ליום הוא קצב ביטים × משך מעבר × מספר מעברים.

משוואות מפתח

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

```
P=S ηA cosθ
```

תפוקת לוחות

$$\bar{P} = P(1 - f_e)$$

```
P=P(1-f_e)
```

ייצור ממוצע למסלול

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

```
E=(P_et_e)/(DoD)
```

קיבולת סוללה

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

```
L=20log10(4π d)/(λ)
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 לוחות של 0.06 m² עם תאים של 28% פונים לשמש (ערכים לדוגמה). תפוקה?

1. 0.06 × 0.28 × 1361.

תשובה: 22.9 W.

דוגמה 6.2 ממוצע למסלול עם שבר הליקוי 0.378 מיחידה 5?

1. 0.622 × 22.86.

תשובה: 14.2 W.

דוגמה 6.3 סוללה עבור 8 W לאורך ליקוי של 35.8 min בעומק פריקה של 30%?

1. 8 × 35.75/60 = 4.77 Wh.
2. 4.77/0.3.

תשובה: 15.9 Wh.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. הנחתת מסלול ב־437 MHz לאורך 1000 km?

λ = 0.686 m; L = 145.3 dB.

2. נתונים ליום ב־9600 bit/s, ארבעה מעברים של 10 דקות?

23.04 Mbit = 2.88 MB.

3. תפוקה בזווית שמש של 60°?

11.4 W.

4. מדוע להגביל עומק פריקה?

יותר מחזורים לפני שהסוללה נשחקת.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הספק השמש קבוע לאורך המסלול.

בפועל: ליקוי וכיוון מקטינים אותו.

מיתוס: סוללה = אנרגיית הליקוי.

בפועל: חלקו ב־DoD.

מיתוס: יותר ביטים לשנייה זה בחינם.

בפועל: זה דורש מרווח קשר גדול יותר.

כרטיסיות

הספק ממוצע למסלול

ייצור לאורך מסלול שלם.

DoD

עומק פריקה.

הפסד מסלול

הפסד התפשטות.

UHF

תחום תדרים גבוה במיוחד.

מעבר

הזמן שבו תחנת קרקע רואה את הלוויין.

נפח נתונים

ביטים שהורדו ביום.

בוחן לבדיקה עצמית

1. תפוקת לוחות…

22.9 W

2.29 W

229 W

38 W

22.9 W. SηA.

2. ממוצע למסלול…

14.2 W

22.9 W

8.6 W

11.4 W

14.2 W. × 0.622.

3. סוללה…

15.9 Wh

4.77 Wh

47.7 Wh

8 Wh

15.9 Wh. ÷ 0.3.

4. הנחתת מסלול…

145.3 dB

125 dB

165 dB

14.5 dB

145.3 dB. 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

דוח NASA על חלליות קטנות אומר שכאשר יצאה המהדורה הראשונה שלו ב־2013, שוגרו ברחבי העולם 247 לווייני CubeSat ו־105 חלליות קטנות אחרות מתחת ל־50 kg, פחות מ־2% מהמסה ששוגרה למסלול.

NASA אומרת שמאז הפכו חלליות קטנות לאמצעי העיקרי של מוסדות מסחריים, ממשלתיים, פרטיים ואקדמיים להגיע לחלל, ולכן תקציבי הספק וקשר מוקפדים תומכים כיום בחלק גדול מהתצפית על כדור הארץ.

ב־Saving Planets: תכנון חלליות · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): דוח NASA חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

בדיקות מבניות ותרמיות

מקדמי עומס, מרווחי ביטחון, עומסי שיגור וטיסה, והערכה ראשונה של שיווי משקל תרמי לשני המסלולים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו עומס תכן ממקדם עומס.
- לחשב שולי ביטחון.
- העריכו טמפרטורת שיווי משקל.
- החליטו מה דורש ניתוח מפורט.

מושגי מפתח

- עומסי תכן הם המשקל כפול מקדם עומס (שיגור או תמרון), כפול מקדם ביטחון.
- מרווח הביטחון = MS = מותר/(× FS מופעל) 1 − חייב להיות חיובי.
- אלומיניום 6061-T6 נכנע סביב 276 MPa (ערך ספר לימוד), בחירה נפוצה גם לרחפנים וגם לשלדות CubeSat.
- הערכה תרמית ראשונה מאזנת אור שמש נבלע מול אינפרה־אדום נפלט; עבור ε = α גוף מואר ליד כדור הארץ נמצא בממוצע סביב 278 K.
- בדיקות ידניות מוצאות את המקרים הקריטיים; מודלים של אלמנטים סופיים ומודלים תרמיים מעדנים אותם אחר כך.

משוואות מפתח

$$F = nmg$$

F=nmg

עומס ממקדם עומס

$$MS = \frac{\sigma_{allow}}{FS \cdot \sigma} - 1$$

MS=σ_allowFS·σ-1

שולי ביטחון

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

T=((α S)/(4σ))^1/4

טמפרטורת שיווי משקל ממוצעת

$$\sigma = F/A$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 CubeSat של 4 kg חווה 10 g (מקדם עומס לדוגמה). עומס?

1. 9.80665 × 4 × 10.

תשובה: 392 N.

דוגמה 7.2 מסילה חווה 80 MPa; הכניעה היא 276 MPa; FS = 1.25. מהו MS?

1. 1 − (80 × 1.25)/276.

תשובה: 1.76, חיובי.

דוגמה 7.3 טמפרטורת שיווי משקל ממוצעת עם ε = α?

1. ¼^((5.670374419 × 10⁻⁸) × 4)/1361).

תשובה: 278 K.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. MS אם המאמץ עולה ל־200 MPa?

.0.10

2. עומס ב־6 g על 5 kg?

.294 N

3. כמה הם 278.3 K ב־°C?

.5.2 °C

4. למה מקדם ביטחון?

אי־ודאות בעומסים, בחומרים ובניתוח.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: MS = 0 זה בסדר.

בפועל: שמרו עליו חיובי.

מיתוס: החלל קר, אז אין בעיה תרמית.

בפועל: חלקים מוארים עלולים להתחמם יתר על המידה.

מיתוס: בדיקות ידניות מחליפות ניתוח.

בפועל: הן מכוונות אותו.

כרטיסיות

מקדם עומס

כפולה של המשקל.

מקדם ביטחון

מכפיל על העומסים.

שולי ביטחון

מותר חלקי נדרש פחות אחד.

חוזק כניעה

מאמץ הגורם לעיוות קבוע.

טמפרטורת שיווי משקל

נבלע = נפלט.

FEA

ניתוח אלמנטים סופיים.

בוחן לבדיקה עצמית

1. עומס…

392 N

39 N

3920 N

40 N

392 N. nmg.

2. MS…

1.76

2.76

0.76

−0.24

.1.76. 276/100 − 1

3. T שיווי משקל…

278 K

255 K

300 K

373 K

.278 K. (S/4σ)^¼

4. MS חייב להיות…

חיובי

שלילי

אפס

מעל 10

חיובי. הגדרה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת שזוג לווייני ה־CubeSat של PREFIRE מודדים פליטה באינפרה־אדום הרחוק מכדור הארץ, אותה קרינה שיחידה זו מאזנת בהערכה התרמית שלה.

NASA מדווחת שמשימת PREFIRE הוארכה כך שהלוויינים התאומים יפעלו לפחות עד ספטמבר 2026, תוך הרחבת המיקוד מהקטבים לכל כוכב הלכת, פרי של תכן ששרד את השיגור והמסלול.

ב־Saving Planets: מבנים אווירונאוטיים וחלליים · מעבר חום

מקורות: NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס"א.

צפו בהרצאה

Lecture 5: Orbiter Structure + Thermal Protection System (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-5/) (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

עלות, לוח זמנים וסיכונים

מבני פירוק עבודה, לוחות זמנים לפי נתיב קריטי, ערך מזוכה, מטריצות סיכון ותוכניות מיתון.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- בנו מבנה פירוק עבודה.
- מצאו את הנתיב הקריטי.
- חשבו CPI, SPI והערכה בסיום.
- דרגו סיכונים ומתנו אותם.

מושגי מפתח

- מבנה פירוק עבודה מחלק את הפרויקט לתוצרים שאפשר להעריך ולהקצות.
- הנתיב הקריטי הוא השרשרת הארוכה ביותר של משימות תלויות; כל עיכוב בו מעכב את הפרויקט.
- ערך מזוכה משווה בין ערך מתוכנן, ערך מזוכה ועלות בפועל.
- CPI = EV/AC ו־SPI = EV/PV; ערכים מתחת ל־1 פירושם חריגה מהתקציב או פיגור בלוח הזמנים.
- סיכונים מדורגים כסבירות × השלכה ונעקבים עם אחראים ואמצעי מיתון.

משוואות מפתח

$$CPI = EV / AC$$

CPI=EV/AC

מדד ביצועי עלות

$$SPI = EV / PV$$

SPI=EV/PV

מדד ביצועי לוח זמנים

$$EAC = BAC / CPI$$

EAC=BAC/CPI

הערכה בסיום

$$R = L \times C$$

R=L× C

ציון סיכון

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 PV = 50k$, EV = 45k$, AC = 48k$ (ערכים לדוגמה). חשבו CPI ו־SPI.

1. CPI = EV / AC = 45/48.
2. SPI = EV / PV = 45/50.

תשובה: CPI = 0.9375, SPI = 0.90.

דוגמה 8.2 התקציב בסיום הוא BAC = 100k$. מהו EAC אם CPI נשמר?

1. EAC = BAC / CPI = 100/0.9375.

תשובה: 106.7k$.

דוגמה 8.3 משימות ברצף נמשכות 3, 4, 5 ו־2 שבועות בסמסטר של 15 שבועות. מרווח?

1. נתיב = 14 שבועות.
2. 15 − 14.

תשובה: 1 שבוע.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ציון סיכון לסבירות 4 והשלכה 5?

   20 מתוך 25.

2. מה פירוש CPI = 1.1?

   מתחת לתקציב.

3. סטייה בסיום עבור EAC של 106.7k$?

   −6.7k$.

4. מהו WBS?

   מבנה פירוק עבודה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הוצאה לפי התוכנית פירושה עמידה בלוח הזמנים.

בפועל: השוו ערך מזוכה, לא הוצאה.

מיתוס: כל משימה קריטית.

בפועל: רק הנתיב הארוך ביותר.

מיתוס: סיכונים נעלמים כשמפרטים אותם.

בפועל: הם צריכים אחראים ופעולות.

כרטיסיות

WBS

מבנה פירוק עבודה.

נתיב קריטי

שרשרת התלויות הארוכה ביותר.

ערך מזוכה

ערך העבודה שבוצעה.

CPI

EV/AC.

SPI

EV/PV.

מטריצת סיכונים

סבירות × השלכה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. CPI…

0.9375

0.90

1.067

0.96

0.9375. EV/AC.

2. SPI…

0.90

0.9375

1.11

0.96

.0.90. EV/PV

3. EAC…

106.7k $

100k $

93.8k $

111k $

.106.7k. BAC/CPI$

4. מרווח…

1 שבוע

0 שבועות

14 שבועות

3 שבועות

1 שבוע. 14 – 15.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־Systems Engineering Handbook של NASA כולל פרק שלם על ניהול טכני רוחבי, לצד תכן מערכת ומימוש מוצר.

פרויקטים שעומדים בתקציב ובלוח הזמנים משוגרים מוקדם יותר, ונתוני התצפית על כדור הארץ מתחילים לזרום מוקדם יותר. ערכי העלות ביחידה זו הם ערכים לדוגמה.

ב־Saving Planets: פתרונות · אוויוניקה והנדסת מערכות

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

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך NASA חינמי, סעיף 6.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

אב טיפוס, בדיקות ואימות

מטריצות אימות, תכנון בדיקות, סטטיסטיקה של מדידות, השוואת תוצאות לחיזויים וסגירת דרישות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- בנו מטריצת אימות.
- חשבו ממוצע וסטיית תקן.
- השוו מדידה להקצאה.
- סגרו דרישה או אשרו ויתור עליה.

מושגי מפתח

- מטריצת אימות מפרטת כל דרישה, את שיטתה, את הבדיקה או הניתוח ואת התוצאה.
- חזרו על מדידות כדי להעריך ממוצע ופיזור; דווחו על שניהם.
- השוו תוצאות לחיזויים; הבדלים גדולים חושפים מוקדם שגיאות במודל.
- בדקו כפי שתטוסו: השתמשו בתצורות ובנהלים דמויי־טיסה.
- 16.83X של MIT עוקב אחר שלבי הגה, תכנן, ממש ותפעל, ומסתיים בבדיקות בסביבה המיועדת.

משוואות מפתח

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i$$

```
x=1n x_i
```

ממוצע

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

```
s=((x_i- x)^2)/(n-1)
```

סטיית תקן מדגמית

$$\text{Margin} = \frac{A - \bar{x}}{\bar{x}}$$

```
Margin=(A- x)/( x)
```

מרווח נמדד

$$e = \frac{x_m - x_p}{x_p}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 חמש מדידות מסה: 3.38, 3.42, 3.40, 3.45, 3.35 kg. ממוצע?

1. Sum 17.00/5.

תשובה: 3.40 kg.

דוגמה 9.2 סטיית תקן מדגמית?

1. סטיות −0.02, 0.02, 0, 0.05, −0.05.
2. √(0.0058/4).

תשובה: 0.038 kg.

דוגמה 9.3 מרווח מול ההקצאה של 4.0 kg?

1. 3.40/(4.0 − 3.40).

תשובה: 17.6%: הדרישה נסגרת.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. חוזה 3.30 kg, נמדד 3.40 kg. שגיאה?

   +3.03%.

2. מדוע לחזור על מדידות?

   כדי להעריך פיזור ולתפוס טעויות.

3. מה פירוש "בדקו כפי שתטוסו"?

   להשתמש בחומרה ובנהלים דמויי־טיסה.

4. מי מאשר ויתור?

   ועדת הסקר של הפרויקט או הלקוח.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מדידה אחת מספיקה.

בפועל: דווחו על ממוצע ופיזור.

מיתוס: בדיקות מוכיחות שתכן מושלם.

בפועל: הן מראות שהוא עומד בדרישות בתנאי הבדיקה.

מיתוס: נתונים סותרים הם רעים.

בפועל: הם מלמדים אתכם על המודל.

כרטיסיות

מטריצת אימות

טבלת דרישה־ראיה.

ממוצע

ממוצע.

סטיית תקן

פיזור.

בדקו כפי שתטוסו

בדיקות דמויות־טיסה.

ויתור

חריגה מאושרת.

CDIO

הגה, תכנן, ממש, תפעל.

בוחן לבדיקה עצמית

1. ממוצע…

3.40 kg

3.38 kg

3.45 kg

17 kg

3.40 kg. Sum/n.

2. סטיית תקן…

0.038 kg

0.38 kg

0.0058 kg

0.1 kg

0.038 kg. נוסחה מדגמית.

3. מרווח…

17.6%

15%

0.6%

−15%

.17.6%. (4 − 3.4)/3.4

4. שגיאת חיזוי…

+3.03%

−3.03%

+0.1%

+30%

.+3.03%. 0.1/3.3

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

MIT OpenCourseWare מתאר את 16.83X כעוקב אחר מודל הגה־תכנן־ממש־תפעל, עם שלב אחרון שבו המערכת נבדקת ומוכנה לסביבתה המיועדת.

CubeSat Launch Initiative של NASA מטיסה לווייניים של סטודנטים שעוברים בדיקות כאלה, והופכת פרויקטי גמר למכשירים פעילים במסלול.

ב־Saving Planets: אוויוניקה והנדסת מערכות · הסתברות וסטטיסטיקה

מקורות: MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/) · NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך NASA חינמי, סעיף 5.

סיימתי את היחידה הזו

סקרי תכן ודוח מסכם

סקרי תכן מקדמי וקריטי, הצגת חלופות ותקציבים, מענה לשאלות וכתיבת הדוח המסכם.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- תכננו סקר תכן.
- הציגו תקציבים עם מרווחים.
- עקבו אחר משימות פתוחות מהסקר.
- כתבו דוח מסכם ברור.

מושגי מפתח

- סקר תכן מקדמי מראה שהתפיסה עומדת בדרישות עם מרווח; סקר תכן קריטי מראה שהתכן המפורט מוכן לבנייה.
- פתחו בדרישות, אחר כך התכן, ואז תקציבים, סיכונים, תוכניות בדיקה ונושאים פתוחים.
- כל סקר מייצר משימות עם אחראים ותאריכי יעד.
- הדוח המסכם מספר את הסיפור מהצורך ועד התכן המאומת, עם מספרים שאפשר לעקוב אחריהם עד הגיליון.
- דיון כן במה שלא עבד הוא חלק מהנדסה טובה.

משוואות מפתח

$$t_{talk} = n_{slides} \times t_{slide}$$

```
t_talk=n_slides× t_slide
```

אורך ההרצאה

$$\text{Closure} = \frac{n_{closed}}{n_{total}}$$

```
Closure=_closedn_total
```

סגירת משימות

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

```
Margin=(A-E)/(E)
```

מרווח תקציב

$$\text{Coverage} = \frac{n_{verified}}{n_{req}}$$

```
Coverage=_verifiedn_req
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 סקר של 20 דקות ב־1.5 דקות לשקופית. כמה שקופיות?

.1 20/1.5.

תשובה: כ־13.

דוגמה 10.2 סקר משאיר 12 משימות; 9 נסגרו. שיעור סגירה?

.1 9/12.

תשובה: 75%.

דוגמה 10.3 30 מתוך 32 דרישות אומתו. כיסוי?

.1 30/32.

תשובה: 93.75%.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. שקופיות לסקר של 30 דקות ב־2 min לכל אחת?

   .15

2. מה בא אחרי PDR?

   .CDR

3. שיעור סגירה כש־11 מתוך 12 נסגרו?

   .91.7%

4. מדוע להציג נושאים פתוחים?

   הסוקרים יכולים לעזור, וזה בונה אמון.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: סקרים הם מבחנים.

בפועל: הם עוזרים לפרויקט.

מיתוס: יותר שקופיות זה טוב יותר.

בפועל: בהירות עדיפה על כמות.

מיתוס: להסתיר בעיות.

בפועל: הציגו אותן עם תוכניות.

כרטיסיות

PDR

סקר תכן מקדמי.

CDR

סקר תכן קריטי.

משימה פתוחה

משימה שעלתה בסקר.

דוח מסכם

הסיפור מהצורך ועד האימות.

כיסוי

שיעור הדרישות שאומתו.

לקחים

מה לעשות אחרת.

בוחן לבדיקה עצמית

1. שקופיות…

≈ 13

20

30

5

≈ 13. 20/1.5.

2. סגירה…

75%

9%

25%

133%

.75%. 9/12

3. כיסוי…

93.75%

30%

96%

6.25%

.93.75%. 30/32

4. CDR מראה…

תכן מוכן לבנייה

את הרעיון הראשון

שיגור שהושלם

רק את התקציב

תכן מוכן לבנייה. תכן קריטי.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת ש־Sustainable Flight National Partnership תומכת ביעד של קהילת התעופה לאפס פליטות פחמן נטו עד 2050.

NASA אומרת שהמשימה המורחבת של PREFIRE בוחנת כעת את כל כוכב הלכת; סקרים ודוחות חזקים הם הדרך שבה תכנים של סטודנטים ושל אנשי מקצוע מגיעים להשפעה כזו.

ב־Saving Planets: פתרונות · תצפית על כדור הארץ

מקורות: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/) · NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס"א.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

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

1. משימה, בעלי עניין ודרישות
   4 תרגילים
2. יצירת תפיסות ובחירתן
   4 תרגילים
3. מסלול מטוס: תכנון משקל וטווח
   4 תרגילים
4. מסלול מטוס: עומס כנף והספק
   4 תרגילים
5. מסלול CubeSat: תכנון ממדים ומסלול
   4 תרגילים
6. מסלול CubeSat: תקציבי הספק וקשר
   4 תרגילים
7. בדיקות מבניות ותרמיות
   4 תרגילים
8. עלות, לוח זמנים וסיכונים
   4 תרגילים
9. אב טיפוס, בדיקות ואימות
   4 תרגילים
10. סקרי תכן ודוח מסכם
    4 תרגילים

המעבדה (Design studio)

סטודיו התכן הוא החלק המעשי של הקורס. כאן הוא חינמי ומיועד לתרגול בלבד, ללא נקודות זכות.

כל מעבדה היא כלי תכן בגיליון אלקטרוני, כך שאין סכנות. אל תבנו ואל תטיסו רחפן אמיתי, אל תטעינו סוללות ליתיום ואל תטפלו בחומרת שיגור במסגרת קורס זה ללא פיקוח מוסמך ובהתאם לכללים המקומיים. 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: מעקב דרישות ומרווחים

שבוע 1

מטרה: בנו את גיליון הדרישות שכל הפרויקט שלכם ישתמש בו, עם מרווחים מתעדכנים.

$$\text{Margin} = (A - E)/E$$

```
Margin=(A-E)/E
```

מרווח

מהלך הניסוי

1. פרטו 20–10 דרישות עם מספר, יחידה ושיטת אימות.
2. הזינו הקצאת מסה של 4.0 kg (ערך ספר לימוד ל־3U) או הקצאה של 5 kg לרחפן.
3. הזינו הערכות של 3.4, 3.6 ו־3.8 kg וחשבו מרווח.
4. צבעו באדום מרווחים מתחת ל־10%.

טבלת נתונים

הערכה (kg)	מרווח
3.4	17.6%
3.6	11.1%
3.8	5.26%

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. (4.0 − 3.6)/3.6 = 11.1%.
2. (4.0 − 3.8)/3.8 = 5.26%.

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: CubeSat Launch Initiative של NASA שיגרה יותר מ־150 לווייני CubeSat. NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

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

מעבדה B: מטריצת בחירת תפיסה עם רגישות

שבוע 2

מטרה: דרגו שתי תפיסות ובדקו כיצד המשקלות משנים את המנצחת.

$$S = \sum w_i s_i$$

S= w_is_i

ציון משוקלל

מהלך הניסוי

1. הזינו את הציונים מיחידה 2: A (6, 9, 5), B (8, 6, 8).
2. דרגו עם שלוש קבוצות משקלות.
3. שרטטו את המנצחת כפונקציה של משקל הביצועים.
4. כתבו פסקה המצדיקה את בחירתכם.

טבלת נתונים

משקלות (עלות, ביצועים, סיכון)	A	B
0.3, 0.5, 0.2	7.3	7.0
0.4, 0.3, 0.3	6.6	7.4
0.2, 0.6, 0.2	7.6	6.8

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. A = 0.2 × 6 + 0.6 × 9 + 0.2 × 5 = 7.6.
2. B = 0.2 × 8 + 0.6 × 6 + 0.2 × 8 = 6.8.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

הקשר לכדור הארץ: ה־SFNP של NASA פועלת בתחומי כלי טיס, תפעול ודלקים בני־קיימא. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

מעבדה C: לולאת תכנון הרחפן

שבוע 4

מטרה: תכננו את מסת ההמראה של מסלול הרחפן עבור כמה שברי סוללה.

$$W_0 = W_{pay} / (1 - f_e - f_b)$$

```
W_0=W_pay/(1-f_e-f_b)
```

מסת המראה

מהלך הניסוי

1. הזינו מטען של 1 kg ושבר משקל ריק של 0.5.
2. חשבו את מסת ההמראה עבור שברי סוללה של 0.25, 0.30 ו־0.35.
3. הוסיפו שטח כנף מתוך W/S = 105.84 N/m².
4. בחרו נקודת תכן ונמקו אותה.

טבלת נתונים

שבר סוללה	מסת המראה (kg)
0.25	4.0
0.30	5.0
0.35	6.67

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 1/(1 − 0.5 − 0.25) = 4.0 kg.
2. 1/(1 − 0.5 − 0.35) = 6.67 kg.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

הקשר לכדור הארץ: ה־SFNP של NASA מכוונת לשיפורי יעילות אנרגטית של 25–30%. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

מעבדה D: מסלול וליקוי של CubeSat

שבוע 6

מטרה: חשבו זמן מחזור וליקוי במקרה הגרוע עבור גבהים מועמדים.

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

T=2π^3/μ

זמן מחזור

מהלך הניסוי

1. הזינו גבהים של 400, 500 ו־600 km.
2. חשבו את T ואת מספר המסלולים ביום.
3. חשבו את דקות הליקוי במקרה הגרוע.
4. בחרו גובה ורשמו את שקלול התמורות מול אורך החיים בשל גרר.

טבלת נתונים

גובה (km)	T (min)	ליקוי (min)
400	92.6	36.1
500	94.6	35.8
600	96.7	35.5

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. T(600) = 2π√(6978.1³/398600.4) = 96.7 min.
2. ליקוי(400) = 0.390 × 92.6 = 36.1 min.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: לווייני ה־CubeSat של PREFIRE שוגרו במאי 2024. NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

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

מעבדה E: תקציב הספק ונתונים

שבוע 7

מטרה: סגרו את תקציבי ההספק והנתונים של ה־CubeSat עם מרווח.

$$V = R_b t_p n_p$$

V=R_bt_pn_p

נפח נתונים יומי

מהלך הניסוי

1. הזינו תפוקת לוחות של 22.9 W וממוצע למסלול של 14.2 W.
2. פרטו את העומסים והשוו לממוצע למסלול.
3. חשבו נתונים ליום ב־9600 bit/s עבור 2, 4 ו־6 מעברים של עשר דקות.
4. השוו לנתונים היומיים של המטען שלכם.

טבלת נתונים

מעברים ביום	נתונים (Mbit)
2	11.52
4	23.04
6	34.56

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 2 × 600 × 9600 = 11.52 Mbit.
2. 6 × 600 × 9600 = 34.56 Mbit.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: חלליות קטנות הן כיום האמצעי העיקרי של קבוצות רבות להגיע לחלל. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

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

מעבדה F: מעקב ערך מזוכה

שבוע 10

מטרה: עקבו אחר ביצועי עלות ולוח זמנים בשלושה מועדי סטטוס.

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV$$

```
CPI=EV/AC,\ SPI=EV/PV
```

מדדי ביצועים

מהלך הניסוי

1. הזינו PV, EV ו־AC לשלושה מועדים.
2. חשבו CPI ו־SPI.
3. חשבו EAC עם BAC = 100k$.
4. כתבו שורת סטטוס אחת לכל מועד.

טבלת נתונים

PV, EV, AC ($k)	CPI	SPI
20, 20, 22	0.909	1.00
50, 45, 48	0.9375	0.90
80, 76, 80	0.95	0.95

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 20/22 = 0.909.
2. 76/80 = 0.95.

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: המדריך של NASA עוסק בניהול טכני רוחבי. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

☐ **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. מרווח של הקצאה של 4.0 kg מעל הערכה של 3.6 kg?

   .1 0.4/3.6.

   תשובה: 11.1%.

2. מסת המראה עבור מטען של 2 kg, שבר ריק 0.45, סוללה 0.3?

   .1 2/0.25.

   תשובה: 8 kg.

3. עומס כנף להזדקרות ב־14 m/s, C_{Lmax} 1.3?

   .1 1.3 × 196 × 1.225 × ½.

   תשובה: 156.1 N/m².

4. זמן מחזור ב־400 km?

   .1 a = 6778.1 km.

   תשובה: 92.6 min.

5. טווח ברגה עם L/D = 20 במקום 17 (ערכי יחידה 3)?

   .1 20/17 × 5235.

   תשובה: 6159 km.

סדרת תרגול מסכמת (יחידות 10–1)

1. לוח של 0.09 m² בנצילות 30%?

   .1 0.09 × 0.3 × 1361.

   תשובה: 36.7 W.

2. סוללה עבור 10 W במשך 36 min ב־25% DoD?

1. 0.6/0.25 × 10.

תשובה: 24 Wh.

3. MS עבור 100 MPa, כניעה 276 MPa, FS 1.4?

1. 1 − 276/140.

תשובה: 0.971.

4. EAC עם BAC 200k$, EV 60, AC 64?

1. CPI = 0.9375.
2. 200/0.9375.

תשובה: 213.3k$.

5. ממוצע וסטיית תקן מדגמית של 2, 4, 6?

1. ממוצע 4.
2. √(8/2).

תשובה: 4 ו־2.

6. כיסוי אימות, 45 מתוך 50?

1. 45/50.

תשובה: 90%.

דף נוסחאות

$$\text{Margin} = (A - E)/E,\ m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

$$S = \sum w_i s_i,\ N = \prod n_i$$

$$W_0 = W_{pay}/(1 - f_e - f_b),\ R = (V/c)(L/D)\ln(W_i$$

$$W/S = \tfrac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max},\ P = W(V/(L/D) + RC)/\eta$$

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

$$P = S\eta A\cos\theta,\ E = P_e t_e/DoD,\ L = 20\log_{10}(4\pi d$$

$$F = nmg,\ MS = \sigma_{allow}/(FS\,\sigma) - 1$$

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV,\ EAC = BAC$$

$$\bar{x} = \sum x_i/n,\ s = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2/(n-1)}$$

$$\text{Coverage} = n_{verified}/n_{req}$$

קבועים

קבוע	ערך
הפרמטר הכבידתי של כדור הארץ (ערך ספר לימוד)	μ = 398,600.4418 km³/s²
רדיוס כדור הארץ בקו המשווה (ערך ספר לימוד)	6378.137 km
כבידה תקנית	g = 9.80665 m/s²
הקבוע הסולארי (ערך ספר לימוד)	1361 W/m²
צפיפות אוויר בגובה פני הים (ערך ספר לימוד)	1.225 kg/m³
מהירות האור	c = 299792458 m/s (מדויק)

מקור: NIST: CODATA value, speed of light in vacuum (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c)

טקסטים ומשאבים חינמיים

השתמשו במדריכים, בהרצאות ובדפי המשימות החינמיים האלה לצד הקורס.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): מדריך חינמי של נאס״א.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): חומרי פרויקט גמר חינמיים של MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): דוח NASA חינמי על חלליות קטנות.
- NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/): הזדמנויות שיגור של NASA.
- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): משימת CubeSat של NASA.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): תעופה בת־קיימא ב־NASA.

מילון מונחים

משימה פתוחה
משימה שהוקצתה בסקר.

הקצאה
נתח מתוקצב ממשאב.

משוואת ברגה
משוואת הטווח של כלי טיס.

CDR
סקר תכן קריטי.

CPI

מדד ביצועי עלות.

דיאגרמת אילוצים
דרישות משורטטות כנגד עומס כנף.

נתיב קריטי
השרשרת הארוכה ביותר של משימות תלויות.

CubeSat
לוויין קטן הבנוי ביחידות של 10 cm.

עומק פריקה
החלק מקיבולת הסוללה שנוצל.

ערך מזוכה
הערך המתוקצב של העבודה שבוצעה.

שבר ליקוי
החלק ממסלול שנמצא בצל.

שולי ביטחון
מותר חלקי נדרש פחות אחד.

טבלה מורפולוגית
אפשרויות לכל פונקציה.

PDR
סקר תכן מקדמי.

מטריצת Pugh
השוואה מול רעיון ייחוס.

דרישה
הצהרת צורך הניתנת לאימות.

SPI
מדד ביצועי לוח זמנים.

מטריצת אימות
טבלת דרישה־ראיה.

עומס כנף
משקל ליחידת שטח כנף.

מבנה פירוק עבודה
פרויקט המחולק לתוצרים.

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	מספק תכן שמקשר כל מספר לדרישה, סוגר את כל התקציבים עם מרווח, מאמת דרישות בראיות ומציג בבהירות שקלולי תמורות, סיכונים ולקחים.
3 · מיומן	סוגר את רוב התקציבים עם מרווח ומציג תכן ברור עם פערים קלים.
2 · מתפתח	יש רעיון וכמה תקציבים, אך עקיבות דרישות חלשה או מרווחים חסרים.
1 · מתחיל	מציג תכן ללא דרישות, תקציבים או אימות; צריך לחזור על היחידות.

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

- אוויוניקה והנדסת מערכות AERO 450
- תעופה בת־קיימא AERO 470
- הנעה AERO 410
- כל הקורסים