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 קורס בחירה לשנה האחרונה בנושא תעופה וסביבה. הוא נשען על ההרצאה על גורמים סביבתיים ב־MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (חינם ב־MIT OpenCourseWare) ועל חומרים ציבוריים של NASA, DOE, EIA ו־EPA, שאליהם אנו מקשרים כשזה עוזר. אף אחד מהם אינו מאשר דף זה.

מה אנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית עם מקור ציבורי מצוטט, כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני הפרסום, וכל מעבדה פועלת בגיליון אלקטרוני או בסימולציה חינמיים.

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

כל הקורס הזה הוא מקטע כדור הארץ: לפי Alternative Fuels Data Center של DOE, התעופה מייצרת כ־2% מכלל ה־CO_2 בעולם ו־12% מה־CO_2 של התחבורה, ושובלי עיבוי מוסיפים התחממות מעבר ל־CO_2.

ה־Sustainable Flight National Partnership של NASA פועל לקראת יעד ענף התעופה לפליטות פחמן אפס נטו עד 2050. כל יחידה מסתיימת במקטע 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 470).
- 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

- הנעה: דחף, יעילות ו־TSFC.
- ביצועי מטוסים: עילוי, גרר ומשוואת הטווח של ברגה.
- תרמודינמיקה: אנרגיה, ערכי חום ויעילות מחזור.
- Capstone Design או Avionics & Systems Engineering: דרישות ושקלולי תמורות.

איך ללמוד

- הקפידו על יחידות: kg, גלונים, ליטרים, MJ ו־Wh.
- שאלו תמיד "לכל מה?": לטיסה, לנוסע־ק"מ, לק"ג דלק.
- הפרידו בין CO_2 מבעירה ל־CO_2 במחזור החיים.
- בדקו כל חיסכון נטען מול קו בסיס.
- זכרו השפעות שאינן CO_2, כמו שובלי עיבוי.
- 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.
- מחשב או טאבלט לסימולציה החינמית PhET Greenhouse Effect.
- רשימות ההרצאה החינמיות של MIT 16.885J בדפדפן.
- מחשבון.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

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

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	תעופה ואקלים: ספירת CO_2	ספירת CO_2; מעבדה A	EIA
2	מדדי יעילות	מדדי יעילות	NASA SFNP
3	יעילות אווירודינמית	L/D וגרר מושרה	MIT 16.885J
4	יעילות אווירודינמית	צריכת דלק לפי ברגה; מעבדה B	NASA SFNP

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
5	יעילות מנועים	יעילות מנועים; מעבדה C	MIT 16.885J
6	דלקי תעופה בני־קיימא	יסודות SAF	DOE AFDC
7	דלקי תעופה בני־קיימא	מחזור החיים של SAF; מעבדה D; תרגול אמצע	DOE AFDC
8	שובלי עיבוי והשפעות שאינן CO_2	שובלי עיבוי	NASA-DLR
9	הנעה חשמלית והיברידית	סוללות וטווח חשמלי	NASA SFNP
10	הנעה חשמלית והיברידית	מערכות היברידיות; מעבדה E	NASA SFNP
11	מטוסי מימן	מטוסי מימן	MIT 16.885J
12	תפעול, רעש ואיכות אוויר	תפעול	NASA SFNP
13	תפעול, רעש ואיכות אוויר	רעש ואיכות אוויר	EPA
14	מסלולים לאפס נטו	תרחישים; מעבדה F	DOE AFDC
15	מסלולים לאפס נטו	חזרה; תרגול למבחן הסופי	MIT 16.885J

ההתקדמות שלכם

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

יחידות

תעופה ואקלים: ספירת CO_2

מאין באות פליטות התעופה, מקדמי פליטה, CO_2 מבעירה לעומת מחזור חיים, וחלקה של התעופה בסך הכול.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשתמש במקדם פליטה לחישוב CO_2.
- להמיר בין גלונים, ליטרים וקילוגרמים.
- להסביר CO_2 מבעירה לעומת CO_2 במחזור החיים.
- לציין את חלקה של התעופה ב־CO_2 העולמי.

מושגי מפתח

- שריפת דלק סילוני הופכת את הפחמן שבו ל־CO_2; מסת ה־CO_2 היא בערך פי שלושה ממסת הדלק, כי כל אטום פחמן מקבל שני אטומי חמצן.
- ה־EIA האמריקאית נותנת 21.50 lb (9.75 kg) של CO_2 לכל גלון דלק סילוני שנשרף.
- CO_2 במחזור החיים מוסיף את ייצור הדלק והובלתו; בדלקים בני־קיימא, גידול חומר הגלם יכול לקלוט CO_2.
- לפי Alternative Fuels Data Center של DOE, התעופה אחראית ל־2% מכלל ה־CO_2 ול־12% מה־CO_2 של התחבורה בעולם.
- התעופה מחממת את האקלים גם בהשפעות שאינן CO_2, כמו שובלי עיבוי ו־NOx.

משוואות מפתח

$$m_{CO_2} = EF \times V_{fuel}$$

```
m_CO_2=EF× V_fuel
```

פליטות מנפח הדלק

$$EF = 9.75 \text{ kg/gal}$$

```
EF=9.75\ kg/gal
```

מקדם EIA לדלק סילוני

$$1 \text{ gal} = 3.785 \text{ L}$$

```
1\ gal=3.785\ L
```

המרת נפח

$$\frac{44}{12} \approx 3.67$$

יחס מסות CO_2 לפחמן

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 טיסה שורפת 5000 גלונים של דלק סילוני. כמה CO_2?

1. 9.75 × 5000.

תשובה: 48,750 kg (48.75 t).

דוגמה 1.2 בדקו את ערכי EIA בליברות ובקילוגרמים.

1. 0.45359237 × 21.50.

תשובה: 9.75 kg, עקבי.

דוגמה 1.3 כמה ליטרים הם 5000 גלונים?

1. 3.785 × 5000.

תשובה: 18,927 L.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. CO_2 מ־1000 גלונים?

   9750 kg.

2. יחס המסות של CO_2 לפחמן?

   44/12 = 3.67.

3. חלקה של התעופה ב־CO_2 של התחבורה (DOE)?

   12%.

4. מה מוסיף מחזור החיים?

   השפעות ייצור, הובלה וחומר גלם.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: ה־CO_2 שוקל פחות מהדלק.

בפועל: הוא שוקל בערך פי שלושה.

מיתוס: התעופה פולטת רק CO_2.

בפועל: גם שובלי עיבוי ו־NOx חשובים.

מיתוס: CO_2 במחזור החיים ו־CO_2 מבעירה שווים.

בפועל: הם שונים, במיוחד ב־SAF.

כרטיסיות

מקדם פליטה

CO_2 ליחידת דלק.

CO_2 מבעירה

מהשריפה.

CO_2 במחזור החיים

סך הכול מהבאר ועד השובל.

השפעות שאינן CO_2

שובלים, NOx, פיח.

Jet A

דלק סילוני רגיל.

t CO_2

טונה של CO_2.

בוחן לבדיקה עצמית

1. CO_2 מ־5000 gal…

48,750 kg

4875 kg

9750 kg

487,500 kg

48,750 kg. × 9.75.

2. מקדם EIA…

9.75 kg/gal

3.16 kg/gal

21.5 kg/gal

1 kg/gal

9.75 kg/gal. EIA.

3. חלקה של התעופה בכלל ה־CO_2…

2%

12%

25%

0.2%

.2%. DOE

4. ליטרים ב־5000 gal…

18,927

1321

5000

37,854

.18,927. × 3.785

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־EIA האמריקאית מציינת 21.50 lb (9.75 kg) של CO_2 לכל גלון דלק סילוני.

לפי Alternative Fuels Data Center של DOE, התעופה אחראית ל־2% מכלל ה־CO_2 בעולם ול־12% מכלל ה־CO_2 של התחבורה.

ב־Saving Planets: פתרונות · תצפית על כדור הארץ

מקורות: U.S. DOE · U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)
Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

מקורות לימוד חינמיים

- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): טבלת EIA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

מדדי יעילות

דלק ו־CO_2 לנוסע־קילומטר, עצימות אנרגטית, ואיך להשוות מטוסים בהגינות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב דלק לנוסע־ק"מ.
- לחשב CO_2 לנוסע־ק"מ.
- להחיל שיפור יעילות באחוזים.
- להשוות בין מטוסים בהגינות.

מושגי מפתח

- פליטות כוללות מטעות; נרמלו לפי נוסעים ומרחק.
- מקדם התפוסה חשוב: מושבים ריקים מעלים את הפליטות לנוסע.
- עצימות אנרגטית (MJ לנוסע־ק"מ) משווה דלקים שונים בסקאלה אחת.
- שיפור יעילות מקטין את הדלק ליחידת הובלה, ולא בהכרח את סך הדלק אם התנועה גדלה.
- ה־Sustainable Flight National Partnership של NASA מכוון לשיפורי יעילות אנרגטית של 25–30% במטוסי התובלה של הדור הבא.

משוואות מפתח

$$\frac{V_{fuel}}{n_{pax} d}$$

דלק לנוסע־ק"מ

$$\frac{m_{CO_2}}{n_{pax} d}$$

CO_2 לנוסע־ק"מ

$$m' = m(1 - g)$$

`m^=m(1-g)`

אחרי שיפור שברי g

$$LF = \frac{n_{pax}}{n_{seats}}$$

`LF=_paxn_seats`

מקדם עומס

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 5000 גלונים מובילים 180 נוסעים למרחק 2000 km (ערכי דוגמה). ליטרים לנוסע־ק״מ?

1. (2000 × 180)/18,927.

תשובה: 0.0526 L.

דוגמה 2.2 CO_2 לנוסע־ק״מ?

1. 48,750/360,000.

תשובה: 0.135 kg (135 g).

דוגמה 2.3 שיפור יעילות של 25% באותה נסיעה. מה ה־CO_2 החדש?

1. 0.75 × 48,750.

תשובה: 36,563 kg.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. אותה טיסה עם 150 נוסעים: כמה g CO_2 ל־pkm?

   162.5 g.

2. מקדם תפוסה, 180 מתוך 200 מושבים?

   0.9.

3. שיפור של 30% על 48750 kg?

   34,125 kg.

4. למה לנרמל?

   כדי להשוות בהגינות בין נסיעות ומטוסים שונים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מטוסים גדולים תמיד פולטים יותר לנוסע.

בפועל: לעיתים קרובות פחות לנוסע.

מיתוס: יעילות מקטינה את סך הפליטות.

בפועל: רק אם התנועה אינה גדלה מהר יותר.

מיתוס: מושבים שווים לנוסעים.

בפועל: השתמשו במקדם התפוסה.

כרטיסיות

נוסע־ק"מ

נוסע אחד שהובל ק"מ אחד.

מקדם עומס

נוסעים חלקי מושבים.

עצימות אנרגטית

MJ ל־pkm.

אפקט ריבאונד

צמיחה שמקזזת את היעילות.

קו בסיס

מקרה ייחוס.

נרמול

השוואה ליחידה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. L ל־pkm…

0.0526

0.526

5.26

0.00526

0.0526. 18,927/360,000.

2. g CO_2 ל־pkm…

135

13.5

1350

48.75

.135. 48,750/360,000

3. אחרי שיפור של 25%…

36,563 kg

12,188 kg

48,750 kg

60,938 kg

.36,563 kg. × 0.75

4. יעד SFNP…

25–30%

2–3%

50–70%

100%

.25–30%. NASA

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.

המדדים לנוסע ביחידה זו הם הדרך שבה נמדדים שיפורים כאלה.

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 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

יעילות אווירודינמית

L/D, גרר מושרה ויחס ממדים, כנפיים ביחס ממדים גבוה וכנפיים עם תמוכות, וצריכת דלק ממשוואת ברגה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב שבר דלק לפי ברגה.
- להראות כיצד L/D מקטין דלק.
- לחשב את מקדם הגרר המושרה.
- להסביר מדוע כנפיים ארוכות ודקות חוסכות דלק.

מושגי מפתח

- לפי ברגה, שבר הדלק הוא 1 − exp(−Rc/(V·L/D)).
- L/D גבוה יותר פירושו פחות דלק לאותו טווח.
- הגרר המושרה C_Di = C_L²/(πeAR) יורד ככל שיחס הממדים עולה.
- כנפיים דקות מאוד צריכות תמוכות (תכנים עם תמוכות) כדי להישאר קלות וקשיחות.
- לב השותפות של NASA הוא מטוס הדגמה X-plane בקנה מידה מלא הבוחן תכן אווירודינמי יעיל במיוחד.

משוואות מפתח

$$\frac{W_f}{W_i} = 1 - e^{-Rc/(V\,L/D)}$$

```
(W_f)/(W_i)=1-e^-Rc/(V L/D)
```

שבר דלק

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi e A R}$$

```
C_D_i=(C_L^2)/(π eAR)
```

גרר מושרה

$$AR = b^2/S$$

```
AR=b^2/S
```

יחס ממדים

$$L/D = C_L/C_D$$

```
L/D=C_L/C_D
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 3000 km ב־230 m/s, $c = 0.6$ /h, $L/D = 17$ (ערכי ספר לימוד). שבר הדלק?

1. $Rc/(V\,L/D) = 3 \times 10^{6} \times 1.667 \times 10^{-4}/(230 \times 17) = 0.1279$.
2. $1 - e^{(-0.1279)}$.

תשובה: 0.120.

דוגמה 3.2 אותו דבר עם $L/D = 20$.

1. $1 - e^{(-0.1087)}$.

תשובה: 0.103: פחות דלק ב־14.2%.

דוגמה 3.3 C_{Di} ב־$C_L = 0.5$, $e = 0.85$, $AR = 9$?

1. $0.25/(\pi \times 0.85 \times 9)$.

תשובה: 0.0104.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. C_{Di} ב־$AR = 12$?

   0.0078.

2. ב־$AR = 19$ (מחלקת כנפיים עם תמוכות)?

   0.0049.

3. יחס ממדים עבור $b = 36$ m, $S = 120$ m²?

   10.8.

4. למה להוסיף תמוכות לכנף דקה?

   כדי לשמור עליה קלה וקשיחה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הגרר הוא כולו חיכוך.

בפועל: הגרר המושרה גדול בשיוט.

מיתוס: כנפיים ארוכות יותר אינן עולות דבר.

בפועל: מגבלות משקל ושער עלייה.

מיתוס: הדלק משתנה ליניארית עם L/D.

בפועל: הוא מתנהג לפי האקספוננט.

כרטיסיות

L/D

יחס עילוי לגרר.

גרר מושרה

גרר הנובע מעילוי.

יחס ממדים

.b²/S

מקדם אוסוולד

יעילות מוטה e.

כנף עם תמוכות

כנף דקה עם תמוכות.

שבר דלק

דלק חלקי משקל המראה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. שבר דלק, L/D 17…

0.120

0.103

0.128

0.017

0.120. ברגה.

2. דלק שנחסך ב־20 L/D…

14.2%

17.6%

3%

30%

14.2%. השוו את השברים.

3. 9 AR C_Di…

0.0104

0.104

0.00104

0.0078

0.0104. $C_L^2/(\pi e AR)$.

4. AR גבוה יותר…

מקטין את הגרר המושרה

מגדיל אותו

ללא השפעה

מגדיל רק את החיכוך

מקטין את הגרר המושרה. נוסחה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לפי NASA, לב ה־Sustainable Flight National Partnership יהיה מטוס הדגמה X-plane בקנה מידה מלא שנבנה לבחון תכן אווירודינמי יעיל במיוחד, כדי להנחות את הדור הבא של מטוסים בעלי מעבר יחיד.

NASA מציינת שהטיסה הראשונה של מטוס ההדגמה לא תתקיים לפני סוף 2026.

ב־Saving Planets: אווירודינמיקה 1 · ביצועי מטוסים

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 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

יעילות מנועים

יעילות תרמית, הנעתית וכוללת, יחס עקיפה וליבות מנוע מתקדמות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב נצילות הנעה.
- שלבו נצילות תרמית ונצילות הנעה.
- הסבירו למה יחס עקיפה גבוה חוסך דלק.
- לקשר יעילות ל־TSFC.

מושגי מפתח

- היעילות הכוללת היא היעילות התרמית כפול היעילות ההנעתית.
- היעילות ההנעתית (2/(1 + V_e/V₀ עולה ככל שמהירות הפליטה מתקרבת למהירות הטיסה.
- מניפי טורבו ביחס עקיפה גבוה מזיזים יותר אוויר לאט יותר, ומעלים את היעילות ההנעתית.
- ליבות חמות יותר, בלחץ גבוה יותר וקומפקטיות מעלות את היעילות התרמית.
- עבודת Hybrid Thermally Efficient Core של NASA מפתחת ליבות טורבינה בצפיפות הספק גבוהה למטוסי תובלה מהדור הבא.

משוואות מפתח

$$\eta_p = \frac{2}{1 + V_e/V_0}$$

```
_p=(2)/(1+V_e/V_0)
```

נצילות הנעה

$$\eta_o = \eta_{th}\eta_p$$

```
_o=_th_p
```

נצילות כוללת

$$TSFC \propto \frac{V_0}{\eta_o}$$

צריכת דלק לדחף

$$BPR = \dot{m}_{bypass}/\dot{m}_{core}$$

```
BPR= m_bypass/ m_core
```

יחס עקיפה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 $V_0 = 230$ m/s, $V_e = 400$ m/s. η_p?

1. $2/(1 + 400/230)$.

תשובה: 0.730.

דוגמה 4.2 הורידו את V_e ל־300 m/s (עקיפה גבוהה יותר).

1. $2/(1 + 300/230)$.

תשובה: 0.868.

דוגמה 4.3 עם $\eta_{th} = 0.5$, מהי היעילות הכוללת ב־$V_e = 300$?

1. 0.868×0.5.

תשובה: 0.434.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. η_p ב־$V_e = 350$ m/s?

   0.793.

2. יעילות כוללת ב־$V_e = 400$, $\eta_{th} = 0.5$?

   0.365.

3. חיסכון בדלק במעבר מ־0.365 ל־0.434 כוללת?

   פחות דלק ב־15.9% לאותה עבודה.

4. מהו יחס עקיפה?

   ספיקת העקיפה חלקי ספיקת הליבה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: פליטה מהירה יותר יעילה יותר.

בפועל: היא מורידה את היעילות ההנעתית.

מיתוס: היעילות התרמית היא הכול.

בפועל: ההנעתית חשובה באותה מידה.

מיתוס: עקיפה אינה עולה דבר.

בפועל: מניפות גדולות יותר מוסיפות משקל וגרר.

כרטיסיות

נצילות הנעה

החלק המועיל מהספק הדחף.

נצילות תרמית

יעילות המחזור.

נצילות כוללת

מכפלת שתיהן.

יחס עקיפה

אוויר המניפה חלקי אוויר הליבה.

TSFC

דלק לדחף ליחידת זמן.

ליבת המנוע

מדחס, תא בעירה, טורבינה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. p_η ב־400…

0.730

0.868

0.575

1.0

(1.739 + 1)/2 .0.730.

2. p_η ב־300…

0.868

0.730

0.5

0.95

(1.304 + 1)/2 .0.868.

3. כוללת...

0.434

0.868

0.5

0.25

0.868 × 0.5 .0.434.

4. עקיפה גבוהה...

מעלה את η_p

מורידה את η_p

מעלה את V_e

ללא השפעה

מעלה את η_p. סילון איטי יותר.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לפי NASA, עבודת Hybrid Thermally Efficient Core מאיצה פיתוח והדגמה של טכנולוגיות מנועי טורבינה מתקדמות בליבה בצפיפות הספק גבוהה למטוסי תובלה מסחריים מהדור הבא.

שתי היעילויות ביחידה זו משפיעות ישירות על הדלק הנשרף לנוסע.

ב־Saving Planets: הנעה · תרמודינמיקה

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 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

דלקי תעופה בני־קיימא

מהו SAF, מסלולי ייצור, מגבלות ערבוב, הפחתות במחזור החיים ויעדים לאומיים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להגדיר SAF.
- לחשב חיסכון במחזור החיים של תערובת.
- להעריך חיסכון ברמת היעדים.
- להסביר מגבלות ערבוב.

מושגי מפתח

- DOE מגדיר SAF כדלק חלופי המיוצר מחומרי גלם שאינם נפט ומפחית זיהום אוויר מתחבורה אווירית.
- ניתן לערבב SAF בשיעורים שבין 10% ל־50%, בהתאם לחומר הגלם ולמסלול הייצור (ASTM D7566).
- SAF מעורבב פועל במטוסים ובתשתיות הקיימים.
- החיסכון במחזור החיים עומד ביחס לשבר הערבוב כפול ההפחתה של ה־SAF עצמו.
- ה־SAF Grand Challenge שואף ל־3 מיליארד גלונים ב־2030 ול־35 מיליארד ב־2050, עם הפחתה של 50% לפחות במחזור החיים.

משוואות מפתח

$$s = b \times r$$

```
s=b× r
```

חיסכון התערובת = תערובת × הפחתת ה־SAF

$$m_{saved} = V \times EF \times r$$

```
m_saved=V× EF× r
```

CO_2 שנחסך לפי נפח SAF

$$b \le 0.5$$

ערבוב מרבי (תלוי מסלול)

$$EF = 9.75 \ \text{kg/gal}$$

```
EF=9.75\ kg/gal
```

מקדם EIA

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 תערובת של 50% SAF עם הפחתה של 50% במחזור החיים. מהו החיסכון הכולל?

1. 0.5×0.5.

תשובה: 25%.

דוגמה 5.2 3 מיליארד גלונים עם הפחתה של 50%, כשמקדם EIA הוא קו הבסיס (בפישוט).

1. $0.5 \times 9.75 \times 10^{9} \times 3$.

תשובה: כ־14.6 מיליון טונות CO_2 בשנה.

דוגמה 5.3 אותו דבר עבור 35 מיליארד גלונים.

1. $0.5 \times 9.75 \times 10^{9} \times 35$.

תשובה: כ־171 מיליון טונות.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. תערובת של 10% עם הפחתה של 80%?

   8%.

2. טיסות שהשתמשו ב־SAF לפי ICAO, דרך DOE?

   יותר מ־360000 ב־46 שדות תעופה.

3. למה יש מגבלת ערבוב?

   תכונות הדלק חייבות לעמוד במפרט Jet A.

4. האם SAF דורש מנועים חדשים?

   תערובות פועלות במטוסים קיימים.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: ל־SAF אין פליטות.

בפועל: הוא נשרף ל־CO_2; החיסכון הוא במחזור החיים.

מיתוס: כל תערובת מתאימה.

בפועל: המגבלות תלויות במסלול.

מיתוס: SAF משפיע רק על CO_2.

בפועל: NASA ו־DLR מצאו פחות גבישי קרח בשובלים.

כרטיסיות

SAF

דלק תעופה בר־קיימא.

HEFA

מסלול אסטרים וחומצות שומן מעובדים במימן.

מגבלת ערבוב

החלק המרבי של SAF.

ASTM D7566

מפרט דלק סילוני סינתטי.

הפחתה במחזור החיים

הקיצוץ לעומת דלק מאובנים.

דלק תחליפי ישיר

פועל במערכות קיימות.

בוחן לבדיקה עצמית

1. חיסכון התערובת…

25%

50%

100%

75%

.25%. 0.5 × 0.5

2. חיסכון ב־2030…

≈ 14.6 Mt

≈ 1.5 Mt

≈ 146 Mt

≈ 29 Mt

≈ 14.6 Mt. × 9.75 × 0.5.

3. טווח ערבוב…

10–50%

0–5%

90–100%

בלתי מוגבל

10–50%. DOE.

4. יעד 2050…

35 מיליארד gal

3 מיליארד gal

360000 gal

46 מיליארד gal

35 מיליארד gal. DOE.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לפי Alternative Fuels Data Center של DOE, יותר מ־360000 טיסות מסחריות השתמשו ב־SAF ב־46 שדות תעופה (לפי ICAO), וה־SAF Grand Challenge שואף ל־3 מיליארד גלונים ב־2030 ול־35 מיליארד גלונים ב־2050, עם הפחתה של 50% לפחות במחזור החיים.

DOE מציין שכל שלושת המפעלים הקיימים בארה"ב משתמשים במסלול HEFA, וצפויים מפעלי אלכוהול־לדלק־סילוני.

ב־Saving Planets: פתרונות · כימיה כללית I

מקורות: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

מקורות לימוד חינמיים

- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): דף ה־SAF של DOE.
- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): מקדמי EIA.

סיימתי את היחידה הזו

שובלי עיבוי והשפעות שאינן CO_2

איך נוצרים שובלי עיבוי, למה הם מחממים, פיח וגבישי קרח, ואיך דלקים וניתוב מפחיתים אותם.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להסביר היווצרות שובלים.
- לחשב הפחתות בגבישי קרח.
- לתאר התחממות שאינה מ־CO_2.
- למנות אפשרויות מיתון.

מושגי מפתח

- שובלים נוצרים כשפליטה חמה ולחה מתערבבת באוויר קר, והמים מתעבים וקופאים על חלקיקי פיח.
- שובלים מתמשכים יכולים להתפשט לענני צירוס הלוכדים חום יוצא.
- פחות חלקיקי פיח פירושם גבישי קרח מעטים וגדולים יותר שנעלמים מוקדם יותר.
- NASA ו־DLR מצאו שדלקים בני־קיימא בעלי בעירה נקייה יותר יצרו פחות גבישי קרח ב־70%–50% בשיוט.
- ניתוב סביב אוויר רווי־על בקרח יכול למנוע שובלים מתמשכים.

משוואות מפתח

$$N = EI \times m_f$$

```
N=EI× m_f
```

גבישי קרח ממדד הפליטה ומהדלק

$$N' = N(1 - r)$$

```
N^=N(1-r)
```

אחרי הפחתה r

$$r \in [0.5, 0.7]$$

טווח NASA-DLR

$$\Delta T \propto F$$

ההתחממות עומדת ביחס לאילוץ

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 מדד פליטה לדוגמה של 10^{15} גבישי קרח לק״ג דלק. עם הפחתה של 50%?

1. 0.5×10^{15}.

תשובה: 5×10^{14} לק״ג.

דוגמה 6.2 עם הפחתה של 70%?

1. 0.3×10^{15}.

תשובה: 3×10^{14} לק״ג.

דוגמה 6.3 טיסה שורפת 15000 kg דלק בשיוט (דוגמה). כמה גבישים בהפחתה של 70%?

1. $15{,}000 \times 10^{14} \times 3$.

תשובה: 4.5×10^{18}.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. למה שובלים מחממים בלילה?

   הם לוכדים קרינה תת־אדומה יוצאת בלי אור שמש להחזיר.

2. מה מזרע את הקרח בשובלים?

   פיח וחלקיקים אחרים.

3. הפחתה מ־5×10^{14} ל־3×10^{14}?

   40%.

4. פתרון תפעולי אחד?

   ניתוב סביב אוויר רווי־על בקרח.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: שובלים הם רק מים, ולכן אינם מזיקים.
בפועל: הם יכולים להוסיף התחממות.

מיתוס: כל השובלים מתמשכים.

בפועל: רק באוויר רווי־על בקרח.

מיתוס: רק CO_2 חשוב.

בפועל: ההשפעות שאינן CO_2 משמעותיות.

כרטיסיות

שובל עיבוי

עקבת עיבוי.

צירוס שובלים

שובלים מתמשכים שהתפשטו.

רווייתּ־על בקרח

אוויר שבו קרח יכול לגדול.

פיח

חלקיקי פחמן.

מדד פליטה

כמות לק"ג דלק.

אילוץ שאינו CO_2

התחממות מלבד CO_2.

בוחן לבדיקה עצמית

1. הפחתה של 50%…

5×10^{14}

5×10^{15}

10^{14}

0

$0.5 \times .5 \times 10^{14}$.

2. טווח NASA-DLR…

50%–70%

5%–7%

90%–100%

20%

.50%–70%. NASA

3. גבישים לטיסה…

4.5×10^{18}

4.5×10^{14}

3×10^{14}

1.5×10^{19}

.4.5×10^{18}. × 15,000

4. קרח השובלים נוצר על…

חלקיקי פיח

CO_2

חנקן

אוזון

חלקיקי פיח. גרעון.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA מדווחת שדלקי סילון בעלי בעירה נקייה יותר ממקורות בני־קיימא יכולים ליצור פחות שובלי גבישי קרח ב־50%–70% בגובה השיוט, לפי מחקר משותף של NASA ו־DLR (המרכז הגרמני לתעופה וחלל).

NASA מציינת ששובלי גבישי קרח יכולים להישאר באטמוספרה העליונה שעות ולהשפיע על האופן שבו כדור הארץ מתחמם ומתקרר.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · מעבר חום

מקורות: NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/): מחקר של NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

הנעה חשמלית והיברידית

צפיפות אנרגיה של סוללות, יעילות מערכת ההינע, טווח חשמלי, והיכן מערכות היברידיות עוזרות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשוות צפיפות אנרגיה של סוללות ודלק.
- להביא בחשבון את יעילות מערכת ההינע.
- לחשב טווח של מטוס חשמלי.
- לזהות משימות מתאימות.

מושגי מפתח

- דלק סילוני אוגר כ־(11944 Wh/kg) 43 MJ/kg; סוללות של היום אוגרות כמה מאות Wh/kg (ערכי ספר לימוד).
- מערכות הינע חשמליות ממירות אנרגיה ביעילות גבוהה בהרבה (כ־90%) מטורבינות (כ־35%), וכך מצמצמות את הפער (ערכי ספר לימוד).
- טווח חשמלי בסוללות הוא R = (e η/g)(L/D)(m_b/m).
- סוללות אינן נעשות קלות יותר כשהן מתרוקנות, בניגוד לדלק.
- לפי NASA, הנעה מחושמלת פותחת אפשרויות חדשות להפחתת צריכת דלק ואנרגיה, ממטוסי נוסעים קטנים ועד מטוסים בעלי מעבר יחיד.

משוואות מפתח

$$R = \frac{e\eta}{g}\,\frac{L}{D}\,\frac{m_b}{m}$$

```
R=e/gL/D(m_b)/(m)
```

טווח בסוללות

$$\frac{e_{fuel}}{e_{batt}}$$

יחס צפיפויות אנרגיה

$$e = 250\ \mathrm{Wh/kg} = 9\times10^{5}\ \mathrm{J/kg}$$

```
e=250\ Wh/kg=9×10^5\ J/kg
```

סוללה לדוגמה

$$1\ \mathrm{Wh} = 3600\ \mathrm{J}$$

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 דלק סילוני ב־43 MJ/kg ביחידות Wh/kg, והיחס לסוללה של 250 Wh/kg?

1. $43 \times 10^6 / 3600 = 11{,}944$ Wh/kg.
2. $11{,}944 / 250$.

תשובה: פי 47.8.

דוגמה 7.2 תקנו לפי יעילות: טורבינה 0.35, חשמלי 0.9.

1. $47.8 \times 0.35 / 0.9$.

תשובה: בערך פי 18.6.

דוגמה 7.3 טווח עם $e = 250$ Wh/kg, $\eta = 0.8$, $L/D = 15$, שבר סוללה 0.3.

1. $0.3 \times 15 \times 0.8 / 9.80665 \times 10^5 \times 9$.

תשובה: כ־330 km.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. טווח אם אנרגיית הסוללה מוכפלת ל־500 Wh/kg?

   כ־661 km.

2. 250 Wh/kg ביחידות J/kg?

   9×10^5.

3. למה מערכות היברידיות עוזרות?

   הספק חשמלי מגביר המראה וטיפוס, בעוד הדלק מספק טווח.

4. המשימות הראשונות המתאימות ביותר?

   טיסות אזוריות קצרות וטיסות אימון.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: סוללות ישתוו בקרוב לדלק סילוני.

בפועל: הפער גדול גם אחרי היעילות.

מיתוס: חשמלי פירושו אפס פליטות.

בפועל: זה תלוי ברשת החשמל.

מיתוס: משקל הסוללה יורד בטיסה.

בפועל: הוא נשאר קבוע.

כרטיסיות

אנרגיה סגולית

אנרגיה ליחידת מסה.

יעילות מערכת ההינע

יעילות מהסוללה לציר.

היברידי־חשמלי

דלק בתוספת הספק חשמלי.

שבר סוללה

מסת הסוללה חלקי מסת המטוס.

Wh/kg

יחידת האנרגיה הסגולית של סוללות.

עצימות הרשת

CO_2 לקוט״ש.

בוחן לבדיקה עצמית

1. יחס אנרגיה…

47.8

4.78

478

18.6

11,944/250 .47.8.

2. מתוקן ליעילות...

18.6

47.8

2.6

100

.18.6. × 0.35/0.9

3. טווח חשמלי...

≈ 330 km

≈ 33 km

≈ 3300 km

≈ 660 km

330 km ≈. נוסחה.

4. טווח באנרגיה כפולה...

≈ 661 km

≈ 330 km

≈ 1320 km

≈ 165 km

661 km ≈. לינארי.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לפי NASA, הנעה מחושמלת פותחת אפשרויות חדשות להפחתת צריכת הדלק והאנרגיה בתעופה, ממטוסי נוסעים קטנים ועד מטוסים בעלי מעבר יחיד, בעזרת טכנולוגיות, רעיונות, מטוסי ניסוי ומתקני קרקע חדשים.

משוואת הטווח ביחידה זו מראה מדוע המטוסים החשמליים הראשונים טסים בקווים קצרים. צפיפויות האנרגיה כאן הן ערכי ספר לימוד.

ב־Saving Planets: מעגלים חשמליים · 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 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

מטוסי מימן

אנרגיית המימן ליחידת מסה ונפח, תכנון גודל מכלים, פליטת מים ושקלולי תמורות בתכן.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להשוות מימן ודלק סילוני לפי מסה ונפח.
- לחשב נפח מכל מימן.
- לחשב את המים הנוצרים.
- להסביר שקלולי תמורות בתכן.

מושגי מפתח

- מימן מכיל כ־120 MJ/kg, פי 2.8 מדלק סילוני, אך צפיפות המימן הנוזלי היא רק כ־70.8 kg/m³ (ערכי ספר לימוד).
- לליטר, מימן נוזלי מכיל כ־8.5 MJ לעומת כ־34.4 MJ בדלק סילוני, ולכן המכלים גדולים בערך פי ארבעה.
- שריפת מימן או שימוש בו בתא דלק מייצרים מים, כ־8.9 kg לכל ק"ג מימן, וללא CO_2 במטוס.
- מכלים קריוגניים מגושמים וכבדים, ומעצבים את המטוס כולו.
- מימן ירוק תלוי בחשמל נקי לאלקטרוליזה.

משוואות מפתח

$$e_v = \rho\, e_m$$

```
e_v=ρ e_m
```

אנרגיה ליחידת נפח

$$V = \frac{E}{e_v}$$

```
V=(E)/(e_v)
```

נפח המכל

$$m_{H_2O} = 8.94\, m_{H_2}$$

```
m_H_20=8.94 m_H_2
```

מים ממימן

$$\frac{e_{H_2}}{e_{jet}} = \frac{120}{43}$$

```
_H_2e_jet=120/43
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 מימן לעומת דלק סילוני לפי מסה?

1. 120/43.

תשובה: פי 2.79 יותר לק״ג.

דוגמה 8.2 האנרגיה הנפחית של מימן נוזלי?

1. 120/1000 × 70.8.

תשובה: 8.50 MJ/L.

דוגמה 8.3 יחס נפח המכל לעומת דלק סילוני (0.8 kg/L, ספר לימוד)?

1. 34.4/8.50.

תשובה: גדול בערך פי 4.05.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מים מ־100 kg מימן?

   כ־894 kg.

2. האנרגיה הנפחית של דלק סילוני?

   0.8 × 43 = 34.4 MJ/L.

3. למה מכלי מימן כבדים?

   דפנות קריוגניות מבודדות.

4. מתי מימן הוא דל פחמן?

   כשהוא מיוצר באנרגיה נקייה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מימן קל, ולכן המכלים קטנים.

בפועל: צפיפות נמוכה פירושה מכלים גדולים.

מיתוס: מטוסי מימן אינם פולטים דבר.

בפועל: הם פולטים אדי מים, שיכולים ליצור שובלים.

מיתוס: כל המימן ירוק.

בפועל: רובו כיום מיוצר מגז מאובנים.

כרטיסיות

LH_2

מימן נוזלי.

קריוגני

אחסון בקור קיצוני.

תא דלק

מקור הספק אלקטרוכימי.

אלקטרוליזה

פירוק מים בחשמל.

אנרגיה נפחית

אנרגיה ליחידת נפח.

מימן ירוק

מיוצר בחשמל נקי.

בוחן לבדיקה עצמית

1. יחס מסות…

2.79

0.36

4.05

120

.2.79. 120/43

2. MJ/L של LH_2…

8.50

34.4

120

0.85

.8.50. 70.8 × 0.12

3. יחס מכלים…

≈ 4

≈ 0.25

≈ 1

≈ 40

.≈ 4. 34.4/8.5

4. מים לק"ג H_2…

≈ 8.9 kg

≈ 1 kg

≈ 18 kg

0

.≈ 8.9 kg. 18.015/2.016

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־Sustainable Flight National Partnership של NASA פועל בתחומי טכנולוגיות כלי טיס מתקדמות, תפעול יעיל ודלקי תעופה בני־קיימא; יחידה זו מוסיפה מימן כאפשרות נוספת, שבה נפח המכל הוא אתגר התכן העיקרי.

ערכי המימן ביחידה זו הם ערכי ספר לימוד, לא נתוני NASA.

ב־Saving Planets: כימיה כללית I · תרמודינמיקה

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

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.

סיימתי את היחידה הזו

תפעול, רעש ואיכות אוויר

הסעה ומסלולים יעילים, חשבון דציבלים, רעש שדות תעופה, איכות אוויר מקומית ובנזין תעופה עם עופרת.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להעריך חיסכון בדלק בהסעה.
- לחבר מפלסי קול בדציבלים.
- להחיל את חוק ריבוע המרחק ההפוך.
- להסביר את בעיית הדלק עם העופרת.

מושגי מפתח

- התפעול חשוב: הסעה על מנוע אחד, נמיכות רציפות ומסלולים מיטביים מקטינים דלק עם המטוסים של היום.
- דציבלים מתחברים באופן לוגריתמי: שני מקורות שווים חזקים ב־3 dB, לא פי שניים במספר.
- באוויר פתוח, מפלס הקול יורד בכ־6 dB בכל הכפלה של המרחק.
- NOx, חלקיקים ו־CO ממנועים משפיעים על איכות האוויר ליד שדות תעופה.
- לפי EPA, רוב המטוסים שמשתמשים בדלק עם עופרת הם מטוסי מנוע בוכנה הנושאים 2–10 נוסעים; מטוסי סילון מסחריים אינם משתמשים בדלק עם עופרת.

משוואות מפתח

$$L = 10 \log_{10} \sum 10^{L_i/10}$$

```
L=10_1010^L_i/10
```

חיבור מפלסי קול

$$\Delta L = 20 \log_{10}(r_2/r_1)$$

```
Δ L=20_10(r_2/r_1)
```

התפשטות כדורית

$$m_f = \dot{m}_f t$$

```
m_f= m_ft
```

דלק שנצרך

$$m_{CO_2} = 3.16\, m_f$$

```
m_CO_2=3.16 m_f
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 שני מקורות של 80 dB יחד?

1. $10\,\log_{10}(2 \times 10^{8})$.

תשובה: 83.0 dB.

דוגמה 9.2 ירידת המפלס בהכפלת המרחק?

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

תשובה: 6.02 dB.

דוגמה 9.3 הסעה של 10 דקות על מנוע אחד במקום שניים, ב־0.1 kg/s כל אחד (דוגמה). כמה דלק ו־CO_2 נחסכים?

1. $0.1 \times 600 = 60$ kg.
2. 60×3.16.

תשובה: 60 kg דלק, כ־190 kg CO_2.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. עשרה מקורות שווים של 70 dB?

   80 dB.

2. הירידה כשהמרחק גדל פי ארבעה?

   12.0 dB.

3. דלק לשני מנועים במשך 10 דקות?

   120 kg.

4. אילו מטוסים משתמשים בדלק עם עופרת (EPA)?

   בעיקר מטוסי מנוע בוכנה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: דציבלים מתחברים ליניארית.

בפועל: הם מתחברים לוגריתמית.

מיתוס: תפעול אינו יכול להפחית פליטות.

בפועל: הוא מקטין דלק כבר היום.

מיתוס: מטוסי נוסעים שורפים דלק עם עופרת.

בפועל: לפי EPA, מטוסי סילון מסחריים לא.

כרטיסיות

דציבל

מדד לוגריתמי לקול.

חוק ריבוע המרחק ההפוך

העוצמה יורדת עם r^2.

הסעה על מנוע אחד

הסעה על מנוע יחיד.

נמיכה רציפה

נמיכה בסרק ללא שלבי טיסה אופקית.

NOx

תחמוצות חנקן.

Avgas

בנזין תעופה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. Two 80 dB…

83.0 dB

160 dB

80 dB

86 dB

.83.0 dB. +3 dB

2. הכפלת מרחק…

−6.02 dB

−3 dB

−10 dB

−20 dB

.−6.02 dB. 20 log 2

3. CO_2 שנחסך בהסעה…

≈ 190 kg

≈ 60 kg

≈ 19 kg

≈ 600 kg

.≈ 190 kg. 60 × 3.16

4. משתמשי דלק עם עופרת…

מטוסי בוכנה

מטוסי נוסעים

רקטות

מסוקים בלבד

מטוסי בוכנה. EPA.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לפי EPA, רוב המטוסים הפועלים בדלק עם עופרת הם מטוסי מנוע בוכנה, הנושאים בדרך כלל 10–2 נוסעים, ומטוסי סילון לתובלה מסחרית אינם משתמשים בדלק עם עופרת.

EPA פרסמה קביעה סופית שפליטות עופרת ממנועי מטוסים מסוימים מסכנות את בריאות הציבור ורווחתו, מה שמחייב את EPA ואת FAA לקבוע תקנים.

ב־Saving Planets: פתרונות · ביצועי מטוסים

מקורות: U.S. EPA: Regulations for lead emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-lead-emissions-aircraft)

מקורות לימוד חינמיים

- U.S. EPA: Regulations for lead emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-lead-emissions-aircraft): דף EPA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): הרצאה חינמית של MIT.

סיימתי את היחידה הזו

מסלולים לאפס נטו

צמיחת תנועה, יעילות, SAF, מטוסים חדשים וקיזוזים, משולבים בתרחישים לקראת 2050.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- להקרין את צמיחת התנועה.
- לשלב הפחתות באופן כפלי.
- לבנות תרחיש טריזים פשוט.
- לדון בכלי מדיניות.

מושגי מפתח

- פליטות = תנועה × אנרגיה ליחידת תנועה × פחמן ליחידת אנרגיה.
- הצמיחה מצטברת: 3% בשנה מכפילים את התנועה בתוך כ־24 שנים (שיעור לדוגמה).
- ההפחתות מוכפלות: (− 1 שיפור היעילות) × (− 1 חיסכון ה־SAF במחזור החיים).
- הפליטות הנותרות דורשות מטוסים חדשים, יותר SAF או סילוק פחמן.
- DOE מציין ש־CORSIA של ICAO מגביל את ה־CO_2 הנטו מתעופה בינלאומית לרמות 2020 עד 2035.

משוואות מפתח

$$E = T \times \frac{MJ}{T} \times \frac{CO_2}{MJ}$$

```
E=T×MJ/T×(CO_2)/(MJ)
```

זהות הפליטות

$$T_n = T_0(1+g)^n$$

```
T_n=T_0(1+g)^n
```

צמיחת התנועה

$$E' = E(1-a)(1-b)$$

```
E^=E(1-a)(1-b)
```

הפחתות משולבות

$$n_2 = \frac{\ln 2}{\ln(1+g)}$$

```
n_2=(2)/((1+g))
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 התנועה גדלה ב־3% בשנה מ־2026 עד 2050 (דוגמה). מקדם הצמיחה?

1. 1.03^{24}.

תשובה: 2.03.

דוגמה 10.2 עם שיפור יעילות של 25%, מהן הפליטות ביחס להיום?

1. 0.75×2.033.

תשובה: 1.52.

דוגמה 10.3 הוסיפו SAF עם חיסכון של 50% במחזור החיים בכל הצי.

1. 0.5×1.525.

תשובה: 0.762, עדיין 76% מהרמה של היום.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. זמן הכפלה ב־3%?

   23.4 שנים.

2. החיסכון הנדרש כדי להגיע מ־0.762 ל־0?

   כל השאר: מטוסים חדשים, יותר SAF וסילוק פחמן.

3. כמה שנים מ־2026 עד 2050?

   24.

4. מה CORSIA מגביל?

   את ה־CO_2 הנטו מתעופה בינלאומית לרמות 2020 עד 2035.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: ההפחתות מתחברות.

בפועל: הן מוכפלות.

מיתוס: יעילות לבדה מגיעה לאפס נטו.

בפועל: הצמיחה עוקפת אותה.

מיתוס: קיזוזים מפחיתים פליטות במנוע.

בפועל: הם מפצים במקום אחר.

כרטיסיות

אפס נטו

פליטות המאוזנות בסילוק.

טריז

פלח מתוכנית הפחתה.

CORSIA

מנגנון הקיזוז של ICAO.

צמיחת התנועה

עלייה בנוסע־ק״מ.

סילוק

הוצאת CO_2 מהאוויר.

תרחיש

מערך הנחות עקבי.

בוחן לבדיקה עצמית

1. מקדם צמיחה…

2.03

1.72

1.03

3.0

.2.03. 1.03²⁴

2. עם יעילות…

1.52

2.03

0.76

1.0

0.75 × 1.52.

3. עם SAF בנוסף…

0.762

0.25

1.52

0

0.5 × 0.762.

4. שנת היעד לאפס נטו…

2050

2030

2035

2100

2050. NASA.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

לפי NASA, ה־Sustainable Flight National Partnership עובד עם התעשייה, האקדמיה וסוכנויות אחרות לקראת יעד ענף התעופה לפליטות פחמן אפס נטו עד 2050.

DOE מציין ש־CORSIA של ICAO מגביל את ה־CO_2 הנטו מתעופה בינלאומית לרמות 2020 עד 2035.

ב־Saving Planets: פתרונות · Capstone Design

מקורות: NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/) · U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): דף ה־SAF של DOE.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

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

1. תעופה ואקלים: ספירת CO_2
   4 תרגילים
2. מדדי יעילות
   4 תרגילים
3. יעילות אווירודינמית
   4 תרגילים
4. יעילות מנועים
   4 תרגילים
5. דלקי תעופה בני־קיימא
   4 תרגילים
6. שובלי עיבוי והשפעות שאינן CO_2
   4 תרגילים
7. הנעה חשמלית והיברידית
   4 תרגילים
8. מטוסי מימן
   4 תרגילים
9. תפעול, רעש ואיכות אוויר
   4 תרגילים
10. מסלולים לאפס נטו
    4 תרגילים

המעבדה (Sustainable aviation lab)

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

כל מעבדה מתבצעת בגיליון אלקטרוני או בסימולציה חינמית, כך שאין סיכוני דלק, סוללות או מימן. אל תטפלו בדלקים, בסוללות או בגזים דחוסים במסגרת הקורס. עשו 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: מחשבון CO_2 לטיסה

שבוע 1

מטרה: בנו גיליון אלקטרוני שהופך דלק שנשרף ל־CO_2 ול־CO_2 לנוסע־ק"מ.

$$m = 9.75V$$

```
m=9.75V
```

מקדם EIA

מהלך הניסוי

1. הזינו דלק בגלונים לשלוש טיסות לדוגמה.
2. חשבו CO_2 עם 9.75 kg/gal של EIA.
3. חלקו בנוסעים × km.
4. השוו טיסות קצרות וארוכות.

טבלת נתונים

דלק (gal)	CO_2 (kg)
1000	9750
5000	48,750
20,000	195,000

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 5000 × 9.75 = 48,750 kg.
2. 20,000 × 9.75 = 195,000 kg.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)

הקשר לכדור הארץ: EIA: 9.75 kg CO_2 לכל גלון דלק סילוני. U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)

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

מעבדה B: L/D וצריכת דלק

שבוע 4

מטרה: ראו כיצד יחס העילוי לגרר משנה את הדלק לנסיעה של 3000 km.

$$W_f/W_i = 1 - e^{-Rc/(V\ L/D)}$$

```
W_f/W_i=1-e^-Rc/(V L/D)
```

שבר דלק

מהלך הניסוי

1. הזינו R = 3000 km, V = 230 m/s, c = 0.6 /h.
2. חשבו שבר דלק עבור L/D = 15, 17 ו־20.
3. חשבו את החיסכון ביחס ל־L/D = 17.
4. הוסיפו את השפעות יחס הממדים על הגרר המושרה.

טבלת נתונים

L/D	שבר דלק
15	0.135
17	0.120
20	0.103

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 1 − e^(−0.1449) = 0.135.
2. 1 − e^(−0.1087) = 0.103.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

הקשר לכדור הארץ: מטוס ההדגמה X-plane של NASA בוחן תכן אווירודינמי יעיל במיוחד. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

מעבדה C: חוקר היעילות ההנעתית

שבוע 5

מטרה: חשבו יעילות הנעתית וכוללת עבור מהירויות פליטה שונות.

$$\eta_p = 2/(1 + V_e/V_0)$$

_p=2/(1+V_e/V_0)

נצילות הנעה

מהלך הניסוי

1. הזינו V_0 = 230 m/s ו־η_th = 0.5.
2. חשבו η_p עבור V_e = 400, 350 ו־300 m/s.
3. חשבו את היעילות הכוללת.
4. קשרו ליחס העקיפה.

טבלת נתונים

V_e (m/s)	η_p	η_o
400	0.730	0.365
350	0.793	0.397
300	0.868	0.434

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 2/(1 + 350/230) = 0.793.
2. 0.5 × 0.793 = 0.397.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: Hybrid Thermally Efficient Core מפתח ליבות טורבינה בצפיפות הספק גבוהה. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

מעבדה D: מחשבון תערובות SAF

שבוע 7

מטרה: חשבו חיסכון במחזור החיים עבור תערובות והפחתות SAF שונות.

$$s = b \times r$$

s=b× r

חיסכון התערובת

מהלך הניסוי

1. הזינו תערובות של 10%, 30% ו־50%.
2. הזינו הפחתת SAF במחזור החיים של 50%, ואחר כך 80%.
3. חשבו את החיסכון ואת ה־CO_2 שנחסך לכל 1000 גלונים.
4. השוו ליעדי ה־Grand Challenge.

טבלת נתונים

תערובת	חיסכון ב־r = 50%	kg CO_2 שנחסכו לכל 1000 gal
10%	5%	487.5
30%	15%	1462.5
50%	25%	2437.5

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 0.3 × 0.5 = 15%.
2. 0.25 × 9750 = 2437.5 kg.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

הקשר לכדור הארץ: DOE: ניתן לערבב SAF בשיעור של 10% עד 50% לפי המסלול. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

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

מעבדה E: טווח מטוס חשמלי

שבוע 10

מטרה: חשבו טווח חשמלי בסוללות עבור כמה צפיפויות אנרגיה.

$$R = (e\eta/g)(L/D)(m_b/m)$$

```
R=(e/g)(L/D)(m_b/m)
```

טווח חשמלי

מהלך הניסוי

1. הזינו η = 0.8, L/D = 15, שבר סוללה 0.3.
2. חשבו טווח עבור 250, 400 ו־500 Wh/kg.
3. השוו לקו אזורי של 300 km.
4. שנו את שבר הסוללה.

טבלת נתונים

e (Wh/kg)	טווח (km)
250	330
400	529
500	661

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 400 × 3600 × 0.8/9.80665 × 15 × 0.3 = 529 km.
2. 500 Wh/kg מכפילים את הטווח של 250 Wh/kg.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: הנעה מחושמלת יכולה להפחית צריכת דלק ואנרגיה. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

מעבדה F: מודל טריזים לאפס נטו

שבוע 14

מטרה: חקרו התחממות ב־PhET Greenhouse Effect, ואז בנו תרחיש תעופה ל־2050–2026.

$$E = (1 + g)^{n}(1 - a)(1 - b)$$

```
E=(1+g)^n(1-a)(1-b)
```

פליטות התרחיש

מהלך הניסוי

1. ב־PhET Greenhouse Effect, הוסיפו גזי חממה וצפו בתגובת הטמפרטורה.
2. הזינו צמיחת תנועה של 3% במשך 24 שנים.
3. החילו שיפור יעילות של 25% וחיסכון SAF של 50%.
4. מצאו את שיעור הצמיחה שבו שני הצעדים שומרים על פליטות יציבות.

טבלת נתונים

מקרה	פליטות ביחס להיום
צמיחה בלבד	2.03
+ יעילות	1.52
+ SAF	0.762

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. $1.03^{24} = 2.033$.
2. $2.033 \times 0.75 \times 0.5 = 0.762$.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect)

הקשר לכדור הארץ: NASA: יעד ענף התעופה הוא פליטות פחמן אפס נטו עד 2050. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

☐ **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. CO_2 מ־2000 גלונים של דלק סילוני?

   1. 9.75 × 2000.

   תשובה: 19,500 kg.

2. CO_2 g לנוסע־ק"מ עבור 19500 kg, 150 נוסעים, 1000 km?

   1. 19,500,000/150,000.

   תשובה: 130 g.

3. שבר דלק ל־3000 km ב־L/D = 15 (ערכי יחידה 3)?

   1. 1 − e^(−0.1449).

   תשובה: 0.135.

4. η_p עבור V_0 = 250, V_e = 350 m/s?

   1. 2/(1 + 1.4).

   תשובה: 0.833.

5. חיסכון מתערובת של 40% עם הפחתה של 70% במחזור החיים?

   1. 0.7 × 0.4.

   תשובה: 28%.

סדרת תרגול מסכמת (יחידות 10–1)

1. גבישי קרח אחרי קיצוץ של 60% מ־10^{15} לק"ג?

   1. 0.4 × 10^{15}.

   תשובה: 4 × 10^{14} לק"ג.

2. טווח חשמלי עם 300 Wh/kg (ערכי יחידה 7)?

.330.4 × 1.2 .1

תשובה: כ־396 km.

3. נפח מימן נוזלי עבור 1000 MJ?

.1000/8.50 .1

תשובה: 118 L.

4. שלושה מקורות שווים של 75 dB?

.75 + 10 log₁₀ 3 .1

תשובה: 79.8 dB.

5. מקדם צמיחה ב־2% במשך 24 שנים?

.1.02²⁴ .1

תשובה: 1.61.

6. פליטות ביחס להיום עם צמיחה של 2%, יעילות של 25% ו־SAF של 50%?

.1.608 × 0.75 × 0.5 .1

תשובה: 0.603.

דף נוסחאות

$$m_{CO_2} = 9.75 V_{gal},\ m_{CO_2} = 3.16 m_f$$

$$\mathrm{CO_2/pkm} = m_{CO_2}/(n_{pax} d)$$

$$W_f/W_i = 1 - e^{-Rc/(V\,L/D)},\ C_{D_i} = C_L^2/(\pi e AR)$$

$$\eta_p = 2/(1 + V_e/V_0),\ \eta_o = \eta_{th}\eta_p$$

$$s = b\,r$$

$$N = EI\,m_f,\ N' = N(1 - r)$$

$$R = (e\eta/g)(L/D)(m_b/m)$$

$$e_v = \rho e_m,\ m_{H_2O} = 8.94 m_{H_2}$$

$$L = 10\log_{10}\sum 10^{L_i/10},\ \Delta L = 20\log_{10}(r_2/r_1)$$

$$E = (1 + g)^n (1 - a)(1 - b)$$

קבועים

קבוע	ערך
כבידה תקנית	$g = 9.80665\ m/s^2$
CO_2 של דלק סילוני (EIA)	$9.75\ kg\ CO_2$ לגלון (21.50 lb)
ערך החום של דלק סילוני (ערך ספר לימוד)	43 MJ/kg
ערך החום של מימן (ערך ספר לימוד)	120 MJ/kg
צפיפות מימן נוזלי (ערך ספר לימוד)	$70.8\ kg/m^3$
גלון	3.785411784 L

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

טקסטים ומקורות חינמיים

השתמשו בהרצאות, בדפי הנתונים ובסימולציות החינמיים האלה לצד הקורס.

- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): רשימות הרצאה חינמיות של MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): תוכנית של NASA.
- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): נתוני SAF של DOE.
- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): מקדמי פליטה של EIA.
- NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/): מחקר השובלים של NASA.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): מאזן קרינה.

מילון מונחים

יחס ממדים
ריבוע המוטה חלקי שטח הכנף.

Avgas
בנזין תעופה למנועי בוכנה.

מגבלת ערבוב
החלק המרבי של SAF בדלק סילוני.

CORSIA
מנגנון קיזוז הפחמן של ICAO.

שובל עיבוי
שובל עיבוי של גבישי קרח.

דציבל

מדד לוגריתמי לקול.

הנעה מחושמלת

הספק חשמלי או היברידי למטוסים.

מקדם פליטה

CO_2 ליחידת דלק.

עצימות אנרגטית

אנרגיה לנוסע־ק"מ.

גרר מושרה

גרר שנגרם מעילוי.

פליטות במחזור החיים

CO_2 מהבאר ועד השובל.

מימן נוזלי

דלק מימן קריוגני.

מקדם עומס

נוסעים חלקי מושבים.

אפס נטו

פליטות המאוזנות בסילוק.

השפעות שאינן CO_2

התחממות משובלים, NOx וחלקיקים.

נוסע־ק"מ

נוסע אחד שהובל ק"מ אחד.

נצילות הנעה

החלק מהספק הסילון שמייצר דחף.

SAF

דלק תעופה בר־קיימא.

פיח

חלקיקי פחמן בפליטה.

אנרגיה סגולית

אנרגיה ליחידת מסה.

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	מביא בחשבון השפעות CO_2 ושאינן CO_2 ביחידות ובקווי בסיס נכונים, משלב הפחתות נכון ומסביר במילים פשוטות את שקלולי התמורות בין האפשרויות.

רמה	איך זה נראה
3 · מיומן	פותר את סדרות התרגול והמבחן עם טעויות קלות ובודק יחידות.
2 · מתפתח	עוקב אחר הדוגמאות הפתורות, אך מבלבל בין CO_2 מבעירה ל־CO_2 במחזור החיים, או מחבר הפחתות במקום להכפיל אותן.
1 · מתחיל	מציג חיסכון ללא קווי בסיס או יחידות; 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

- פרויקט גמר (מטוס או CubeSat) AERO 490
- הנעה AERO 410
- דינמיקת טיסה ובקרה AERO 420
- כל הקורסים