آخر تحديث: November 1, 2026

🗺️ خريطة طريق لأربع سنوات · السنة 4, الخريف · 🧮 الحاسبة المدمجة

عن هذه الدورة

يتضمن هذا المقرر المجاني 10 وحدات و6 مختبرات. هذه الأعداد الحقيقية وليست منهجًا أطول جرى اختصاره.

التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في صفحة مقرر يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم المعروض الرقم المعاد حسابه.

هذا مخطط دورة مجانية للتعلّم الذاتي كتبته Saving Planets. وهو ليس مقررًا جامعيًا، ولا يمنح ساعات معتمدة، ولا تشارك فيه أي مؤسسة تعليمية.

يتبع نطاقه مقررًا فصليًا للسنة الأخيرة في تصميم المركبات الفضائية لمهندسي الطيران والفضاء. وهو مبني على موضوعات ومستوى MIT 16.851 Satellite Engineering (مجاني على MIT OpenCourseWare)، ويستخدم Systems Engineering Handbook المجاني من ناسا وتقرير Small Spacecraft Technology State of the Art، ونضع روابطهما حيث يفيدان. لا يؤيد أيٌّ من هؤلاء المؤلفين أو المؤسسات أو الهيئات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي بمصدر عام موثّق (مهمات Landsat 9 وEuropa Clipper وPACE التابعة لناسا ومسح ناسا لتقنيات المركبات الفضائية الصغيرة)، وكل رقم في الصفحة يعاد حسابه بنص تحقق برمجي قبل النشر، ولكل مختبر محاكاة مجانية أو جدول بيانات.

تابعها بالترتيب. في كل وحدة أهداف وأفكار أساسية ومعادلات وأمثلة خطوة بخطوة وتمارين بإجابات كاملة وأخطاء شائعة وبطاقات تعليمية واختبار قصير. يُحفظ تقدّمك في هذا المتصفح فقط.

كيف تساعد هذه الدورة في إنقاذ الكوكب

أقمار رصد الأرض هي تصميم المركبات الفضائية وقد صار مفيدًا: يجب أن تعمل القدرة والحرارة والتوجيه والاتصالات لسنوات كي يتتبع العلماء الغابات والمياه والمحاصيل والمناخ.

والتصميم الجيد يعني أيضًا عمرًا طويلًا ونفايات أقل في المدار. تنتهي كل وحدة بقسم قصير موثّق. القيم التي لا تأتي من مصدر موسومة بأنها قيم نموذجية أو مرجعية.

للمعلمين

يمكنك تدريس هذا المقرر، أو أن يتابعه الطالب وحده. إنه مجاني. Saving Planets لا تمنح درجة ولا ساعات معتمدة.

- هذه الصفحة هي المقرر كاملًا: 10 وحدات و6 مختبرات (AERO 430).
- خطّط لخمسة عشر أسبوعًا، نحو 6 إلى 9 ساعات في الأسبوع، بما في ذلك أسابيع المختبر.

- اتبع جدول الخمسة عشر أسبوعًا. اقرأ الوحدة، حلّ التمارين على الورق، ثم افتح الإجابة. في أسبوع المختبر، نفّذ المختبر أو نسخته المنزلية.
- التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في الصفحة يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم الظاهر الرقم المعاد حسابه.
- استخدم طباعة هذه الصفحة، أو نزّل دليل الدراسة PDF. ورقة القوانين قرب النهاية.
- اسأل: كيف تساعد هذه الوحدة الناس والكوكب؟ في كل وحدة مربع أخضر فيه حقيقة مع مصدرها.
- انسخ نموذج دليل المعلم واكتب اسم صفك والوقت المتاح والأسئلة التي ستطرحها. افتح نموذج دليل المعلم

قبل أن تبدأ

المتطلبات السابقة

- الميكانيكا المدارية: المدارات والدورات وΔv.
- الديناميكا الحرارية: أساسيات انتقال الحرارة والإشعاع.
- الدوائر: القدرة والجهد والتيار.
- ديناميكا الطيران والتحكم وهياكل الطيران والفضاء: التحكم في الوضع والصلابة والأحمال.

كيف تذاكر

- ابدأ كل تصميم من المتطلبات، واحتفظ بميزانية (الكتلة والقدرة وΔv والوصلة) لكل نظام فرعي.
- احمل هوامش وبيّن أين توجد.
- تتبّع الوحدات: الواط مقابل الواط ساعة، والكلفن للإشعاع، والديسيبل للوصلات.
- تحقّق من كل إجابة مقابل رتبة مقدار مهمة حقيقية.
- ارسم المركبة الفضائية ومدارها قبل أي حساب.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاتي PhET المجانيتين Blackbody Spectrum وCircuit Construction Kit.
- برنامج جداول بيانات (أي برنامج مجاني يفي بالغرض)، أو Python.
- صفحات مهمات ناسا وتقرير Small Spacecraft Technology في متصفح ويب.
- آلة حاسبة.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

نحو 6 إلى 9 ساعات أسبوعيًا: قراءة وتمارين، وفي أسابيع المختبر، المختبر.

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	متطلبات المهمة وهندسة النظم	المتطلبات والميزانيات؛ المختبر A	NASA SE Handbook
2	المدارات والبيئة الفضائية	المدارات والبيئة؛ المختبر B	MIT 16.851
3	توليد الطاقة: المصفوفات الشمسية	المصفوفات الشمسية؛ المختبر C	NASA SST SOA
4	تخزين الطاقة وميزانية القدرة	البطاريات وميزانية القدرة؛ المختبر D	NASA SST SOA

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
5	التحكم الحراري	التحكم الحراري؛ المختبر E	MIT 16.851
6	الهياكل والآليات وأحمال الإطلاق	الهياكل وأحمال الإطلاق	MIT 16.851
7	الدفع وميزانية delta-v	ميزانيات Δv؛ تدريب لاختبار منتصف الفصل	MIT 16.851
8	نظام تحديد الوضع والتحكم فيه	متطلبات ADCS	MIT 16.851
9	نظام تحديد الوضع والتحكم فيه	المستشعرات والمشغّلات والزخم	NASA SST SOA
10	الاتصالات ومعالجة البيانات	ميزانيات الوصلة	MIT 16.851
11	الاتصالات ومعالجة البيانات	معالجة البيانات؛ المختبر F	NASA Landsat 9
12	الموثوقية والاختبار ونهاية العمر	الموثوقية والتكرار الاحتياطي	NASA SE Handbook
13	الموثوقية والاختبار ونهاية العمر	الاختبار والمعايرة	NASA Landsat 9
14	الموثوقية والاختبار ونهاية العمر	التشغيل والتخلص	NASA SE Handbook
15	الموثوقية والاختبار ونهاية العمر	المراجعة؛ تدريب للامتحان النهائي	MIT 16.851

تقدّمك

ضع علامة على الوحدات والمختبرات عند إنهائها، وخض الاختبارات. يُحفظ التقدم ونتائج الاختبارات في هذا المتصفح فقط، ولا تُرسل إلينا أبدًا.

الوحدات

متطلبات المهمة وهندسة النظم

أهداف المهمة، والمتطلبات، ودورة حياة المشروع، ودراسات المفاضلة، وميزانيات الأنظمة الفرعية، وهوامش التصميم.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حوّل أهداف المهمة إلى متطلبات قابلة للقياس.
- ابنِ ميزانية كتلة مع هامش.
- أجرِ دراسة مفاضلة موزونة بسيطة.
- اشرح لماذا تتقلص الهوامش خلال المشروع.

المفاهيم الأساسية

- تبدأ المهمة بأهداف؛ والمتطلبات تجعلها قابلة للقياس والتحقق (رقم ووحدة واختبار).
- تمر المشاريع بمراحل من المفهوم إلى التشغيل، مع مراجعات تتحقق من استيفاء المتطلبات.
- لكل مورد ميزانية: الكتلة والقدرة وΔv والبيانات والتوجيه والتكلفة، ولكلٍّ هامش.
- تحمل التصاميم المبكرة هوامش كبيرة (غالبًا 20–30%، قيم مرجعية) لأن التقديرات غير مؤكدة؛ وتتقلص الهوامش مع نضج العتاد.
- تقيّم دراسات المفاضلة الخيارات وفق معايير موزونة؛ والأوزان مهمة بقدر الدرجات.

المعادلات الأساسية

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

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

الكتلة مع الهامش

$$S = \sum w_i s_i$$

```
S= w_is_i
```

درجة المفاضلة الموزونة

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

```
Margin=-NeedNeed
```

هامش الأداء

$$\sum w_i = 1$$

```
w_i=1
```

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 تقدير الكتلة الجافة 800 kg. خصّص مع هامش 20% (قيم نموذجية).

1. 1.20 × 800.

الإجابة: 960 kg.

مثال 1.2 تقول ناسا إن Landsat 9 كان عليه جمع 400 مشهد يوميًا على الأقل وهو يجمع 740. أوجد الهامش.

1. (740 − 400)/400.

الإجابة: 85% فوق المتطلب (740/400 = 1.85).

مثال 1.3 الخيار A يحصل على 8 (التكلفة) و6 (الأداء)؛ وB على 5 و9. الأوزان 0.4 و0.6. أيهما يفوز؟

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

الإجابة: يفوز B، 7.4 مقابل 6.8.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. خصّص 1200 kg بهامش 25%.

   1500 kg.

2. إذا انعكست الأوزان إلى 0.6/0.4، فمن يفوز؟

   A: 7.2 vs B: 6.6.

3. ما الذي يجعل المتطلب قابلًا للتحقق؟

   قيمة قابلة للقياس واختبار أو تحليل للتحقق منها.

4. لماذا نحمل هامشًا؟

   التقديرات تكبر مع نضج التصاميم.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المتطلبات أمنيات.

في الحقيقة: إنها قابلة للقياس والتحقق.

خرافة: الهوامش هدر.

في الحقيقة: إنها تمتص النمو والمفاجآت.

خرافة: دراسات المفاضلة موضوعية.

في الحقيقة: الأوزان تحمل حكمًا تقديريًا.

بطاقات تعليمية

المتطلب

حاجة قابلة للقياس والتحقق.

الميزانية

تخصيص مورد.

الهامش

احتياطي فوق التقدير.

دراسة الموازنة

مقارنة موزونة.

دورة الحياة

مراحل من المفهوم إلى التخلص.

التحقق

إثبات استيفاء متطلب.

اختبار ذاتي

1. 800 kg + 20%…

960 kg

820 kg

1000 kg

640 kg

960 kg. اضرب.

2. مشاهد Landsat 9 يوميًا...

740

400

100

7400

740. NASA.

3. الفائز في المفاضلة...

B

A

تعادل

لا شيء منهما

B. 7.4 > 6.8.

4. الهوامش مع الوقت...

تتقلص

تكبر

تختفي في البداية

ثابتة

تتقلص. النضج.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول ناسا إن متطلبات برنامج Landsat 9 شملت جمع 400 مشهد يوميًا على الأقل وعمرًا تصميميًا قدره 5 سنوات؛ ويجمع Landsat 9 نحو 740 مشهدًا يوميًا، أي ضعف الحد الأدنى تقريبًا، ويحمل وقودًا يكفي للعمل 10 سنوات على الأقل.

تجاوز متطلبات كهذه يمدد سجلًا للیابسة يمتد، كما تشير ناسا، لأكثر من خمسة عقود ويدعم إنذارات إزالة الغابات ومراقبة جودة المياه وتقارير المحاصيل.

على Saving Planets: رصد الأرض · الحلول

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

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): دليل مجاني من ناسا.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.

شاهد المحاضرة

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

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

المدارات والبيئة الفضائية

اختيار المدار، والدورة والسرعة، والمدارات المتزامنة مع الشمس والثابتة بالنسبة للأرض، والمسارات الأرضية وعرض المسح، والكسوف، والفراغ، والإشعاع، والأكسجين الذري.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب الدورة والسرعة المداريتين.
- عُدّ المدارات في اليوم.
- قدّر مدة الكسوف في المدار المنخفض.
- اذكر مخاطر البيئة حسب المدار.

المفاهيم الأساسية

- الدورة T = 2π√(a³/μ)؛ والسرعة الدائرية v = √(μ/a).
- المدارات المتزامنة مع الشمس شبه قطبية وتتمادر مرة في السنة، فيعبر القمر الصناعي خط الاستواء في التوقيت المحلي نفسه كل يوم.
- تمر المدارات المنخفضة في ظل الأرض؛ ونسبة الكسوف لمدار دائري والشمس في مستوى المدار نحو (2/2π)·asin(R_E/a).
- تشمل البيئة الفضائية الفراغ ودرجات الحرارة القصوى وأحزمة الإشعاع والأكسجين الذري في المدار المنخفض والحطام.
- المدارات الأعلى ترى جزءًا أكبر من الأرض لكنها تحتاج إلى بصريات وهوائيات أكبر للدقة ومعدل البيانات نفسيهما.

المعادلات الأساسية

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

T=2π^3/μ

الدور المداري

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

v=μ/a

السرعة الدائرية

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

نسبة الكسوف (أسوأ حالة)

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

N=86400/T

المدارات في اليوم

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 يطير Landsat 9 على ارتفاع 705 km. أوجد دورته.

1. a = 6378.137 + 705 = 7083.1 km.
2. T = 2π√(7083.1³/398,600.4).

الإجابة: T = 98.9 min (تذكر ناسا 99 min).

مثال 2.2 أوجد المدارات في اليوم والسرعة.

1. 86,400/5932.7 s.
2. v = √(398,600.4/7083.1).

الإجابة: 14.56 مدارًا/يوم؛ 7.50 km/s.

مثال 2.3 قدّر الكسوف في أسوأ حالة.

1. asin(6378.1/7083.1) = 1.121 rad.
2. f = 1.121/π = 0.357.

الإجابة: نحو 35.3 min لكل مدار.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. لماذا شبه قطبي؟

   لتغطية الكرة الأرضية كلها.

2. ميل مدار Landsat 9؟

   98.2°.

3. الخطر الرئيسي للتآكل في المدار المنخفض؟

   الأكسجين الذري.

4. هل يتقلص الكسوف على ارتفاع أعلى؟

نعم، تنخفض النسبة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الفضاء بارد، لذا تتجمد المركبات الفضائية.
في الحقيقة: الأجزاء المعرضة للشمس قد ترتفع حرارتها كثيرًا؛ والتوازن مهم.

خرافة: الأعلى أفضل دائمًا.
في الحقيقة: تتضرر الدقة والوصلات.

خرافة: المتزامن مع الشمس يعني مضاءً دائمًا.
في الحقيقة: نسخ الفجر-الغسق وحدها تتجنب الكسوف.

بطاقات تعليمية

الدورة

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

متزامن مع الشمس

توقيت العبور المحلي نفسه.

الكسوف

الوقت في ظل الأرض.

النطاق

عرض الأرض المصوَّر.

الأكسجين الذري

يؤكل الأسطح في LEO.

أحزمة الإشعاع

جسيمات مشحونة محتجزة.

اختبار ذاتي

1. دورة Landsat 9...

≈99 min

24 h

45 min

12 h

≈99 min. NASA.

2. المدارات في اليوم...

≈14.5

1

100

3

≈14.5. 86,400/T.

3. أسوأ كسوف عند 705 km...

≈35 min

0

60 min

5 min

≈35 min. محسوب.

4. التزامن مع الشمس يعطي...

التوقيت المحلي نفسه

عدم الكسوف

الرؤية من GEO

سحبًا صفريًا

التوقيت المحلي نفسه. التمادر.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تذكر ناسا أن Landsat 9 في مدار شبه قطبي متزامن مع الشمس على ارتفاع 705 km بميل 98.2° ودورة مدتها 99 دقيقة ونحو 14.5 مدارًا يوميًا وعرض مسح 185 km وعبور لخط الاستواء قرب الساعة 10:12 صباحًا بالتوقيت المحلي.

ومع Landsat 8 يرصد المكان نفسه كل 8 أيام. والإضاءة في الوقت نفسه من اليوم هي ما يتيح للعلماء مقارنة الصور عبر العقود.

على Saving Planets: ميكانيكا المدارات · رصد الأرض

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

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.
- NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/): صفحة المهمة لدى ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

توليد الطاقة: المصفوفات الشمسية

التدفق الشمسي والمسافة، وكفاءة الخلايا، وزاوية الشمس، والقدرة في بداية العمر ونهايته، وتحجيم المصفوفة، والقدرة النوعية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب خرج المصفوفة لكل متر مربع.
- طبّق قانوني جيب التمام والتربيع العكسي.
- حجّم مصفوفة لحمل معين.
- قارن تقنيات الخلايا.

المفاهيم الأساسية

- التدفق الشمسي قرب الأرض نحو 1361 W/m² (قيمة مرجعية) وينخفض مع مربع المسافة عن الشمس عكسيًا.
- تنخفض القدرة مع جيب تمام الزاوية بين عمودي المصفوفة والشمس.
- يذكر مسح ناسا للمركبات الصغيرة خلايا فضائية متعددة الوصلات بكفاءة اسمية 30% (حتى 34%)، مقابل نحو 20% للسيليكون أحادي الوصلة.
- التدهور الناتج عن الإشعاع والتلوث والتقادم يخفض القدرة في نهاية العمر، لذا تُحجَّم المصفوفات لـ EOL.
- القدرة النوعية (W/kg) تحدد الجدوى غالبًا؛ وتشير ناسا إلى أن مهمات المصفوفات الشمسية تتجمع حول 30 W/kg.

المعادلات الأساسية

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

```
P=S ηAθ
```

قدرة المصفوفة

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

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

التربيع العكسي (r بالوحدة الفلكية)

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

```
A=(P)/(S η f_d)
```

مساحة المصفوفة

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

SP=P/m

القدرة النوعية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 أوجد الخرج لكل m² لخلايا 30% مواجهة للشمس عند 1 وحدة فلكية.

1. 0.30 × 1361.

الإجابة: 408.3 W/m².

مثال 3.2 أوجد المساحة لـ 2 kW مع معامل تدهور وتعبئة 0.85 (قيمة نموذجية).

1. (0.85 × 0.30 × 1361)/2000.

الإجابة: 5.76 m².

مثال 3.3 أوجد التدفق الشمسي عند المشتري (5.2 وحدة فلكية).

1. 1361/5.2².

الإجابة: 50.3 W/m²، أقل بـ 27 مرة.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. الخرج لكل m² بميل 30°؟

   353.6 W/m².

2. التدفق عند المريخ (1.524 وحدة فلكية)؟

   586 W/m².

3. الخرج لكل m² لسيليكون 20%؟

   272.2 W/m².

4. كتلة المصفوفة لـ 2 kW عند 30 W/kg؟

   66.7 kg.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المسافة لا تكاد تهم.

في الحقيقة: التدفق ينخفض كـ $1/r^2$.

خرافة: قدرة BOL كافية.

في الحقيقة: حجّم لنهاية العمر.

خرافة: الكفاءة هي كل ما يهم.

في الحقيقة: الكتلة والحجم المطوي مهمان أيضًا.

بطاقات تعليمية

التدفق الشمسي

$1361\ W/m^2 \approx$ عند 1 وحدة فلكية.

خلية متعددة الوصلات

فجوات طاقة متراصة، ~30%.

BOL/EOL

بداية/نهاية العمر.

فقد جيب التمام

$P \propto \cos\theta$.

التربيع العكسي

$S \propto 1/r^2$.

القدرة النوعية

W/kg.

اختبار ذاتي

30% .1 عند 1 وحدة فلكية لكل m^2...

- 408 W
- 1361 W
- 136 W
- 30 W

408 W. اضرب.

2. التدفق عند المشتري...

≈50 W/m²

1361

500

5

≈50 W/m². 1/r².

3. η الاسمية متعددة الوصلات (ناسا)...

30%

10%

50%

86%

30%. تقرير SOA.

4. يقلل الميل القدرة بمقدار...

cos θ

sin θ

θ²

لا شيء

cos θ. جيب التمام.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تصف ناسا Europa Clipper بأنها مركبة تعمل بالطاقة الشمسية يتجاوز امتدادها مع نشر مصفوفاتها الشمسية 100 قدم (نحو 30 مترًا)؛ أُطلقت في 14 أكتوبر 2024، وستقطع 1.8 مليار ميل لتصل إلى المشتري في أبريل 2030.

عند المشتري يكون ضوء الشمس أضعف بنحو 27 مرة منه عند الأرض، ولهذا مصفوفات Clipper كبيرة جدًا: قانون التربيع العكسي في هذه الوحدة على مقياس مهمة.

على Saving Planets: الحلول · ميكانيكا المدارات

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

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): فصل مجاني من ناسا عن القدرة.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): سلاسل على التوالي والتوازي.

أنهيت هذه الوحدة

تخزين الطاقة وميزانية القدرة

قوائم الأحمال، وتوازن الطاقة في الشمس والكسوف، وتحجيم البطارية مع عمق التفريغ، والطاقة النوعية، وإدارة القدرة وتوزيعها.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- ابنِ قائمة أحمال والقدرة المتوسطة على المدار.
- حجّم بطارية للكسوف.
- احسب كتلة البطارية من الطاقة النوعية.
- اشرح حدود عمق التفريغ.

المفاهيم الأساسية

- تجمع ميزانية القدرة كل حمل حسب النمط؛ ويجب أن تغذي المصفوفة الأحمال في الشمس وتعيد شحن البطارية للكسوف.
- طاقة البطارية = الحمل × زمن الكسوف ÷ عمق التفريغ (DoD) المسموح.
- عمق التفريغ الضحل يطيل عمر الدورات؛ وفي المدارات المنخفضة نحو 15 دورة يوميًا، لذا يُبقى DoD منخفضًا غالبًا (توجيه مرجعي).
- يذكر مسح ناسا خلايا Li-ion تجارية بنحو 150–270 Wh/kg و3.6 V في المتوسط.
- تنظم إدارة القدرة وتوزيعها جهد الناقل وتبدّل الأحمال وتعزل الأعطال.

المعادلات الأساسية

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

`E=(P_et_e)/(DoD)`

طاقة البطارية

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

`m_b=_sp`

كتلة البطارية

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

`P_avg=(P_dt_d+P_et_e)/(T)`

الحمل المتوسط على المدار

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

Ah=Wh/V

السعة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 حمل 500 W يجب أن يجتاز كسوف الوحدة 2 البالغ 35.3 دقيقة. أوجد الطاقة المستهلكة.

1. 500 × 35.28/60.

الإجابة: 294 Wh.

مثال 4.2 حجّم البطارية لـ DoD قدره 30% (قيمة نموذجية).

1. 294/0.30.

الإجابة: 980 Wh.

مثال 4.3 أوجد كتلة البطارية عند 150 Wh/kg على مستوى الحزمة.

1. 980/150.

الإجابة: 6.53 kg.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. السعة عند 28 V؟

   35 Ah.

2. الكتلة باستخدام خلايا 260 Wh/kg؟

   3.77 kg (الخلايا فقط).

3. الدورات يوميًا عند 14.56 مدارًا/يوم؟

   نحو 14.6.

4. لماذا لا يكون DoD بنسبة 100%؟

   ينهار عمر الدورات.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الواط والواط ساعة شيء واحد.
في الحقيقة: القدرة مقابل الطاقة.

خرافة: التفريغ العميق لا بأس به.
في الحقيقة: إنه يقصّر العمر.

خرافة: طاقة الخلايا = طاقة الحزمة.
في الحقيقة: الحزم تضيف كتلة للهيكل والإدارة.

بطاقات تعليمية

قائمة الأحمال

القدرة لكل نظام فرعي ونمط.

DoD

جزء السعة المستخدم.

الطاقة النوعية

.Wh/kg

PMAD

إدارة القدرة وتوزيعها.

الكسوف

لا طاقة شمسية.

القدرة المتوسطة على المدار

حمل موزون بالزمن.

اختبار ذاتي

1. طاقة الكسوف...

294 Wh

500 Wh

35 Wh

1000 Wh

.294 Wh. P × t

2. البطارية عند DoD قدره 30%...

980 Wh

294 Wh

88 Wh

3000 Wh

980 Wh. اقسم.

3. جهد خلية Li-ion...

3.6 V

1.5 V

12 V

28 V

3.6 V. NASA.

4. كتلة البطارية...

6.53 kg

65 kg

0.65 kg

1 kg

980/150. 6.53 kg.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يدرج مسح ناسا لتقنيات المركبات الفضائية الصغيرة خلايا ليثيوم أيون 18650 ذات سجل طيران في مهمات ناسا، منها خلايا LG Chem INR18650-MJ1 بقدرة 260 Wh/kg لمهمة PACE التابعة لناسا وخلايا LG Chem ICR18650 B3 بقدرة 191–205

Europa Clipper ـ Wh/kg.

تقيس PACE، التي أُطلقت في فبراير 2024، العوالق النباتية والهباء الجوي والسحب للمساعدة في رصد صحة المحيطات وجودة الهواء والمناخ. وتبقيها بطارياتها عاملة خلال كل كسوف.

على Saving Planets: المحيطات · الدوائر الكهربائية

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

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): فصل مجاني من ناسا عن القدرة.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

التحكم الحراري

توازن الإشعاع، والامتصاصية والانبعاثية، ودرجة حرارة الاتزان، وتحجيم المشعّات، والطلاءات، والسخانات، والعزل متعدد الطبقات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب درجة حرارة اتزان.
- حجّم مشعًّا.
- اختر الطلاءات حسب α/ε.
- اشرح السخانات والعزل.

المفاهيم الأساسية

- في الفراغ تغادر الحرارة أساسًا بالإشعاع: Q = εσAT⁴.
- ضوء الشمس الممتص هو αSA_proj؛ والنسبة α/ε للسطح تحدد درجة حرارة اتزانه.
- كرة سوداء عند 1 وحدة فلكية مع α = ε تستقر قرب 278 K ≈ ¼^(S/4σ).
- المشعّات تطرد الحرارة الضائعة؛ والدهانات البيضاء والمرايا لها α/ε منخفضة فتبقى باردة في الشمس.
- العزل متعدد الطبقات يحجب الإشعاع؛ والسخانات تبقي البطاريات والوقود الدافع دافئة أثناء الكسوف.

المعادلات الأساسية

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

```
Q=σ AT^4
```

الحرارة المشعة

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

```
T=((α S)/(4σ))^1/4
```

اتزان الكرة

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

```
A_r=(Q)/(σ T^4)
```

مساحة المشع

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

`Q_abs=α SA_p`

ضوء الشمس الممتص

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 أوجد درجة حرارة اتزان كرة عند 1 وحدة فلكية مع α = ε.

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

الإجابة: T = 278.3 K (5 °C).

مثال 5.2 حجّم مشعًّا لطرد 500 W عند 290 K مع ε = 0.85 (بإهمال ضوء الشمس الممتص).

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

الإجابة: A = 1.47 m².

مثال 5.3 كيف تتغير درجة حرارة الاتزان مع α/ε؟

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

الإجابة: مضاعفة α/ε ترفع T بعامل $2^{1/4} = 1.189$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. T عند α/ε = 2؟

   331 K.

2. مشع عند 260 K لـ 500 W؟

   2.27 m².

3. ماذا يفعل MLI؟

   يحجب تدفق الحرارة الإشعاعي.

4. لماذا السخانات أثناء الكسوف؟

   لإبقاء القطع فوق درجات حرارتها الدنيا.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الفضاء ينقل الحرارة بالتوصيل.
في الحقيقة: في الفراغ يهيمن الإشعاع.

خرافة: الأسود حار دائمًا.
في الحقيقة: يعتمد على α/ε.

خرافة: الحرارة أمر ثانوي.
في الحقيقة: إنها تحدد التخطيط والقدرة.

بطاقات تعليمية

الامتصاصية α

جزء ضوء الشمس الممتص.

الانبعاثية ε

القدرة على الإشعاع.

MLI

العزل متعدد الطبقات.

المشع

سطح طارد للحرارة.

السخان

يبقي القطع دافئة.

σ

5.6704×10^{-8} W/(m²·K⁴).

اختبار ذاتي

1. كرة عند 1 وحدة فلكية...

278 K

373 K

200 K

0 K

278 K. محسوب.

2. Q = …

$\varepsilon\sigma AT^4$

$hA\Delta T$

$kA\Delta T/L$

$mc\Delta T$

$\varepsilon\sigma AT^4$. الإشعاع.

3. مثال مساحة المشع…

1.47 m²

14.7 m²

0.15 m²

5 m²

1.47 m². محسوب.

4. سطح منخفض α/ε…

يبقى باردًا

يسخن

بلا أثر

يتوهج

يبقى باردًا. التوازن.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح ناسا أن Thermal Infrared Sensor في Landsat 9 يقيس درجة حرارة سطح اليابسة ويحتوي على مشع لمبرّد التبريد العميق، ودرع أرضي، وجسم أسود مع رؤية للفضاء العميق للمعايرة.

التصميم الحراري هنا هو الأداة نفسها: يقيس TIRS الحرارة الصادرة من الأرض، وهو ما تقول ناسا إنه يساعد في تتبع استخدام المياه وإدارته، وذلك فقط لأن كواشفه تُبقى باردة ومستقرة.

على Saving Planets: الديناميكا الحرارية · رصد الأرض

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

مصادر تعلّم مجانية

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

أنهيت هذه الوحدة

الهياكل والآليات وأحمال الإطلاق

أحمال الإطلاق، وأحمال التصميم شبه الساكنة، ومتطلبات الصلابة والتردد الطبيعي، والمواد، والعناصر القابلة للنشر، والمنصات ذات السجل.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب حمل إطلاق شبه ساكن.
- احسب ترددًا طبيعيًا.
- اشرح متطلبات الصلابة.
- وازن بين التصميم ذي السجل والتصميم الجديد.

المفاهيم الأساسية

- يعرّض الإطلاق المركبة لتسارع ثابت واهتزاز وضوضاء وصدمات؛ ويبدأ التصميم من معاملات أحمال شبه ساكنة (غالبًا عدة g، قيم مرجعية).
- تشترط مركبات الإطلاق بقاء التردد الأساسي للمركبة الفضائية فوق حد أدنى كي لا يقترن بالصاروخ.
- لنموذج كتلة-نابض بسيط f = (1/2π)√(k/m): الصلابة ترفع التردد والكتلة تخفضه.
- قرص العسل من الألمنيوم والمواد المركبة يعطيان صلابة بكتلة قليلة؛ والآليات تنشر المصفوفات والهوائيات والأذرع.
- إعادة استخدام منصة مجرّبة في الطيران (ذات سجل) تقلل المخاطر والجدول الزمني.

المعادلات الأساسية

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

```
F=n m g_0
```

الحمل شبه الساكن

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

```
f=(1)/(2π)/m
```

التردد الطبيعي

$$\sigma = F/A$$

الإجهاد

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

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 أوجد حمل التصميم لمركبة 1000 kg عند 6 g (قيم نموذجية).

1. 9.80665 × 1000 × 6.

الإجابة: 58.8 kN.

مثال 6.2 أداة 100 kg على حامل صلابته 10^6 N/m (قيم نموذجية). أوجد f.

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

الإجابة: f = 15.9 Hz.

مثال 6.3 ما الصلابة اللازمة للحامل لمضاعفة f؟

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

الإجابة: 4×10^6 N/m (31.8 Hz).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. f إذا تضاعفت الكتلة؟

   11.3 Hz.

2. الحمل عند 4 g لـ 500 kg؟

   19.6 kN.

3. لماذا حد أدنى للتردد؟

   لتجنب الاقتران مع ديناميكا مركبة الإطلاق.

4. ما المنصة ذات السجل؟

   منصة مركبة فضائية مجرّبة في الطيران.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المتانة هي الهدف الوحيد.

في الحقيقة: الصلابة كثيرًا ما تحكم التصميم.

خرافة: الأثقل أكثر أمانًا.

في الحقيقة: الكتلة تخفض التردد وتكلّف الإطلاق.

خرافة: العناصر القابلة للنشر بسيطة.

في الحقيقة: إنها نقاط فشل منفردة شائعة.

بطاقات تعليمية

الحمل شبه الساكن

g ثابتة مكافئة.

التردد الطبيعي

(1/2π)√(k/m).

قرص العسل

لوح خفيف وصلب.

قابل للنشر

ينفتح في المدار.

السجل

تصميم مجرّب في الطيران.

Bus

منصة المركبة الفضائية.

اختبار ذاتي

1. 6 g على 1000 kg...

58.8 kN

6 kN

9.8 kN

588 kN

58.8 kN. nmg.

2. مثال f…

15.9 Hz

100 Hz

1 Hz

159 Hz

15.9 Hz. صيغة.

3. مضاعفة f تتطلب × k…

4

2

2√

8

4. f ∝ √k.

4. السجل يقلل…

المخاطر

الكتلة دائمًا

القدرة

المدار

المخاطر. مجرّب.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول ناسا إن Northrop Grumman صممت مركبة Landsat 9 وبنتها بتكييف تصميم منصة LEOStar المستخدمة في Landsat 8، ودمجت الأداتين وأجرت الاختبارات على مستوى القمر الصناعي.

إعادة استخدام منصة مجرّبة قرار تصميمي يقلل المخاطر ويساعد على إبقاء سجل Landsat متصلًا، وهو بحسب ناسا أطول سجل فضائي متصل لسطح اليابسة.

على Saving Planets: هياكل الطيران والفضاء · رصد الأرض

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

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): مسح تقني مجاني من ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

الدفع وميزانية delta-v

ميزانيات Δv للإدخال المداري والحفاظ على الموقع والوضع والتخلص؛ ومعادلة الصاروخ لكتلة الوقود الدافع؛ ومساعدات الجاذبية؛ وخيارات الدفع.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- ابنِ ميزانية Δv.
- احسب كتلة الوقود الدافع من Δv.
- احسب Δv من الوقود الدافع.
- اشرح مساعدات الجاذبية.

المفاهيم الأساسية

- تدرج ميزانية Δv كل مناورة: الإدخال، والحفاظ على المدار، والتحكم في الوضع، وتجنب الاصطدام، والتخلص، إضافة إلى هامش.
- الوقود الدافع اللازم: m_p = m₀(1 − e^(−Δv/v_e)).
- دوافع الوقود الأحادي بسيطة؛ والثنائي يعطي Isp أعلى؛ والكهربائي يعطي Isp مرتفعًا جدًا بدفع منخفض.
- تستعير مساعدات الجاذبية زخمًا من كوكب لتغيير السرعة والاتجاه دون وقود دافع.
- الوقود الدافع المتبقي يمكن أن يمدد المهمة بعد عمرها التصميمي.

المعادلات الأساسية

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

```
m_p=m_0(1-e^-Δ v/v_e)
```

كتلة الوقود الدافع

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

```
Δ v=v_e(m_0)/(m_f)
```

معادلة الصاروخ

$$v_e = I_{sp} g_0$$

```
v_e=I_spg_0
```

سرعة العادم

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

Δ v_tot=Δ v_i(1+M)

ميزانية مع هامش

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 مركبة 1000 kg تحتاج إلى 100 m/s مع Isp قدره 300 s (قيم نموذجية). أوجد الوقود الدافع.

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

الإجابة: 33.4 kg.

مثال 7.2 ما Δv الذي تعطيه 50 kg من الوقود الدافع؟

1. 2942 ln(1000/950).

الإجابة: 150.9 m/s.

مثال 7.3 الميزانية: 60 m/s لتصحيح الإدخال، و30 m/s للحفاظ على الموقع، و10 m/s للتخلص، وهامش 20%.

1. 1.2 × 100.

الإجابة: 120 m/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. الوقود الدافع لـ 120 m/s؟

   39.9 kg.

2. v_e لـ Isp قدره 220 s؟

   2157 m/s.

3. ماذا توفر مساعدة الجاذبية؟

   الوقود الدافع لنفس Δv.

4. لماذا نخصص Δv للتخلص؟

   لمغادرة المدار بمسؤولية.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الوقود الدافع يزداد خطيًا مع Δv.
في الحقيقة: بل أسيًا.

خرافة: مساعدات الجاذبية طاقة مجانية.
في الحقيقة: يُتبادل الزخم مع الكوكب.

خرافة: التخلص اختياري.
في الحقيقة: إنه يحمي المدارات للآخرين.

بطاقات تعليمية

ميزانية Δv

مجموع المناورات.

الحفاظ على الموقع

الإبقاء على مدار.

وقود أحادي

وقود واحد، بسيط.

وقود ثنائي

وقود + مؤكسد.

مساعدة الجاذبية

دفعة من تحليق قرب كوكب.

التخلص

خروج من المدار أو مدار مقبرة في نهاية العمر.

اختبار ذاتي

1. m_p لـ 100 m/s...

33.4 kg

100 kg

3.3 kg

334 kg

33.4 kg. صيغة.

2. Δv من 50 kg...

151 m/s

50 m/s

500 m/s

15 m/s

151 m/s. معادلة الصاروخ.

3. الميزانية مع الهامش...

120 m/s

100 m/s

80 m/s

200 m/s

1.2× .120 m/s.

4. مرور Clipper قرب الأرض في ديسمبر 2026 هو...

مساعدة جاذبية

هبوط

تزود بالوقود

إطلاق

مساعدة جاذبية. NASA.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول ناسا إن Europa Clipper حلّقت قرب المريخ عام 2025 وستمر قرب الأرض مجددًا في 3 ديسمبر 2026 لمساعدة جاذبية تمنحها دفعة لبقية رحلتها إلى المشتري، حيث ستنفذ 49 تحليقًا قريبًا من أوروبا.

مساعدات الجاذبية تطيل كمية وقود دافع ثابتة، وهو الهدف نفسه الذي تخدمه ميزانية Δv في هذه الوحدة لمركبات تدور حول الأرض مثل Landsat 9، التي تقول ناسا إنها تحمل وقودًا يكفي 10 سنوات على الأقل.

على Saving Planets: ميكانيكا المدارات · الدفع

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

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): مسح تقني مجاني من ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

نظام تحديد الوضع والتحكم فيه

متطلبات التوجيه من الحمولات، والمستشعرات والمشغّلات، وعزوم الاضطراب، وميزانيات الزخم، وخطأ التوجيه على الأرض.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اشتق متطلب توجيه من الدقة الأرضية.
- احسب الخطأ الأرضي من الخطأ الزاوي.
- ابنِ ميزانية زخم.
- اختر المستشعرات والمشغّلات.

المفاهيم الأساسية

- الحمولات تحدد التوجيه: بكسل جهاز التصوير يقابل زاوية قدرها (البكسل الأرضي)/(الارتفاع).
- الخطأ الأرضي ≈ الارتفاع × الخطأ الزاوي (زوايا صغيرة).
- المستشعرات: متتبعات النجوم، ومستشعرات الشمس، ومقاييس المغناطيسية، والجيروسكوبات؛ والمشغّلات: عجلات رد الفعل، والعزّامات المغناطيسية، والدوافع.
- الاضطرابات (تدرج الجاذبية، والسحب، والضغط الشمسي، والمغناطيسية) تراكم زخمًا H = τt يجب أن تخزنه العجلات.
- يُفرَّغ الزخم بالعزّامات المغناطيسية أو الدوافع قبل تشبع العجلات.

المعادلات الأساسية

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

زاوية البكسل

$$e = h\theta$$

الخطأ الأرضي

$$H = \tau t$$

```
H=τ t
```

الزخم المتراكم

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

```
1"=(π)/(648000) rad
```

الثانية القوسية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 لـ Landsat 9 بكسلات 30 m من ارتفاع 705 km. أوجد الزاوية لكل بكسل.

1. 30/705000 rad.

الإجابة: 8.78×10^{-5} rad = 4.26 ثانية قوسية.

مثال 8.2 خطأ توجيه 0.01° من 705 km يزيح الصورة بكم؟

1. 0.0001745 × 705,000.

الإجابة: 123 m، نحو أربعة بكسلات.

مثال 8.3 اضطراب 10^{-5} N·m يؤثر لربع مدار مدته 98.9 دقيقة (قيمة نموذجية). أوجد الزخم.

1. 1483 s × 10^{-5}.

الإجابة: 0.0148 N·m·s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. الزاوية لبكسل 15 m؟

   4.39 ثانية قوسية.

2. الخطأ الأرضي لـ 0.001°؟

   12.3 m.

3. أي مستشعر يعطي الوضع المطلق؟

   متتبع النجوم.

4. كيف تُفرَّغ العجلات في LEO؟

   بالعزّامات المغناطيسية أو الدوافع.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: معرفة التوجيه تساوي التحكم فيه.

في الحقيقة: إنهما ميزانيتان منفصلتان.

خرافة: العجلات تستطيع امتصاص الزخم إلى ما لا نهاية.

في الحقيقة: إنها تتشبع.

خرافة: الزوايا الصغيرة لا تهم.

في الحقيقة: الارتفاع يضاعفها.

بطاقات تعليمية

دقة التوجيه

خطأ التحكم.

معرفة التوجيه

خطأ القياس.

متتبع النجوم

الوضع من النجوم.

العزّام المغناطيسي

ملف يتفاعل مع مجال الأرض.

تدرج الجاذبية

عزم مدّي.

تفريغ الزخم

تفريغ العجلات.

اختبار ذاتي

1. زاوية بكسل Landsat…

8.78"

1°

0.1"

60"

.30/705 km .8.78"

2. 0.01° عند 705 km…

123 m

12 m

1.2 km

1 m

.123 m. hθ

... 3. H =

τt

Iα

τ/t

mv

τt. الزخم.

4. مستشعر الوضع المطلق...

متتبع النجوم

الجيروسكوب

العجلة

السخان

متتبع النجوم. النجوم.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تذكر ناسا أن الدقة المكانية لـ Landsat 9 تبلغ 30 m للنطاقات المرئية وتحت الحمراء قصيرة الموجة، و15 m للنطاق البانكروماتي، و100 m للنطاق الحراري، من ارتفاع 705 km.

إبقاء بكسل 30 m ثابتًا من ذلك الارتفاع يتطلب تحكمًا على مستوى الثانية القوسية، ولهذا تتطابق صور Landsat عبر السنين لرصد التغيرات.

على Saving Planets: ديناميكا الطيران والتحكم · رصد الأرض

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

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): مسح تقني مجاني من ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

الاتصالات ومعالجة البيانات

حجم البيانات، ومعدلات الوصلة الهابطة، وميزانية الوصلة بالديسيبل، وفقد المسار في الفضاء الحر، وكسب الهوائي، والحوسبة والتخزين على متن المركبة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب فقد المسار في الفضاء الحر.
- احسب كسب هوائي طبقي.
- ابنِ ميزانية وصلة بسيطة.
- قدّر حجم البيانات اليومي.

المفاهيم الأساسية

- فقد المسار في الفضاء الحر L = 20 log₁₀(4πd/λ) dB يزداد مع المسافة والتردد.
- كسب الطبق G = η(πD/λ)² ؛ الأطباق الأكبر والترددات الأعلى تعطي حزمًا أضيق وأقوى.
- ميزانية الوصلة: القدرة المستقبلة = قدرة الإرسال + الكسوب − الفقد (كلها بـ dB)؛ ويجب أن يكون الهامش فوق ما يحتاجه المستقبل موجبًا.
- حجم البيانات = الصور × البتات لكل صورة؛ ويجب أن يتجاوزه المعدل × زمن الاتصال.
- حواسيب الأوامر ومعالجة البيانات تخزن البيانات وتشغّل البرمجيات وتدير الأعطال.

المعادلات الأساسية

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

L=20_10(4π d)/()

فقد المسار في الفضاء الحر

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

G=((π D)/())^2

كسب الطبق

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

P_r=P_t+G_t+G_r-L

ميزانية الوصلة (dB)

$$\lambda = c / f$$

الطول الموجي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 أوجد فقد المسار في النطاق X (8.2 GHz) عند $c = 3 \times 10^8$ m/s) 2000 km.

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

الإجابة: $L = 176.7$ dB.

مثال 9.2 أوجد كسب طبق 3 m عند 8.2 GHz مع $\eta = 0.55$ (قيمة نموذجية).

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

الإجابة: $G = 45.6$ dBi.

مثال 9.3 ماذا يحدث لفقد المسار إذا تضاعفت المسافة؟

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

الإجابة: +6.0 dB (182.8 dB عند 4000 km).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. الطول الموجي عند 8.2 GHz؟

   3.66 cm.

2. تغير الكسب لطبق 6 m؟

   +6.0 dB.

3. مشاهد Landsat 9 يوميًا؟

   نحو 740.

4. البتات لكل بكسل في OLI لـ Landsat 9؟

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الديسيبلات تُجمع مثل الواط.
في الحقيقة: الـ dB تُجمع للنواتج.

خرافة: التردد الأعلى أسوأ دائمًا.
في الحقيقة: الفقد يزداد لكن كسب الطبق يزداد أيضًا.

خرافة: حجم البيانات صغير.
في الحقيقة: كثيرًا ما يحكم تصميم المحطات الأرضية.

بطاقات تعليمية

فقد المسار

فقد الانتشار بـ dB.

كسب الهوائي

تركيز الحزمة.

هامش الوصلة

المستقبَل ناقص المطلوب.

النطاق X

≈8 GHz.

C&DH

الأوامر ومعالجة البيانات.

حجم البيانات

البتات يوميًا.

اختبار ذاتي

1. فقد المسار عند 2000 km في النطاق X…

176.7 dB

100 dB

50 dB

250 dB

176.7 dB. صيغة.

2. كسب طبق 3 m...

45.6 dBi

10 dBi

90 dBi

3 dBi

45.6 dBi. صيغة.

3. مضاعفة المسافة...

فقد +6 dB

+3 dB

×2 dB

لا شيء

فقد +6 dB. 20 log 2.

4. ميزانية الوصلة تستخدم...

مجاميع dB

نواتج الواط فقط

الفولت

الجول

مجاميع dB. وحدات لوغاريتمية.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول ناسا إن Europa Clipper تحمل تسع أدوات علمية إضافة إلى تجربة جاذبية تستخدم نظام اتصالاتها، وتعرض هوائيها عالي الكسب بقطر 10 أقدام (3 أمتار) الذي رُكّب في أغسطس 2023.

وأقرب إلينا، تفيد ناسا بأن Landsat 9 تسجل بيانات بدقة 14 بت وتجمع أكثر من 700 مشهد يوميًا. ونقل هذا القدر من البيانات إلى الأرض كل يوم مسألة تصميم اتصالات أولًا.

على Saving Planets: رصد الأرض · الدوائر الكهربائية

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

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): مسح تقني مجاني من ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

الموثوقية والاختبار ونهاية العمر

معدلات الأعطال والموثوقية، والتكرار الاحتياطي، والاختبارات البيئية، والمعايرة والتحقق، والتشغيل والتخلص المسؤول.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب الموثوقية من معدل أعطال.
- احسب فائدة التكرار الاحتياطي.
- صف الاختبارات البيئية.
- خطّط للتخلص في نهاية العمر.

المفاهيم الأساسية

- مع معدل أعطال ثابت λ تكون الموثوقية R(t) = e^(−λt) ومتوسط الزمن بين الأعطال 1/λ.
- وحدتان على التوازي: R = 1 − (1 − R₁)²؛ والتكرار الاحتياطي يبادل الكتلة والتكلفة بالموثوقية.
- «اختبر كما تطير»: اختبارات الاهتزاز والصوت والصدمة والفراغ الحراري والتوافق الكهرومغناطيسي قبل الإطلاق.
- المعايرة تحافظ على دقة البيانات العلمية مع الوقت؛ والمعايرة المتبادلة مع أقمار أخرى تربط السجلات معًا.
- في نهاية العمر يجب إخراج المركبات من المدار أو نقلها إلى مدار تخلص للحد من الحطام.

المعادلات الأساسية

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

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

الموثوقية

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

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

اثنتان على التوازي

$$MTBF = 1/\lambda$$

```
MTBF=1/
```

متوسط الزمن بين الأعطال

$$R_s = \prod R_i$$

```
R_s= R_i
```

نظام على التوالي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 لوحدة $\lambda = 10^{-5}$ في الساعة (قيمة نموذجية). أوجد موثوقيتها لـ 5 سنوات.

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

الإجابة: $R = 0.645$.

مثال 10.2 أضف وحدة احتياطية على التوازي.

1. $1 - 0.355^2$.

الإجابة: $R = 0.874$.

مثال 10.3 أوجد MTBF.

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

الإجابة: 11.4×100000 h سنة.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. موثوقية وحدة واحدة لـ 10 سنوات؟

   0.416.

2. نظام على التسلسل من 0.95 و0.90؟

   0.855.

3. اذكر اختبارًا بيئيًا قبل الإطلاق.

   الفراغ الحراري أو الاهتزاز.

4. لماذا المعايرة المتبادلة؟

   لإبقاء السجلات متسقة بين الأقمار.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: التكرار الاحتياطي مجاني.
في الحقيقة: إنه يكلّف كتلة وقدرة ومالًا.

خرافة: الاختبار يثبت انعدام المخاطر.
في الحقيقة: إنه يقلل المخاطر.

خرافة: التخلص مهمة شخص آخر.
في الحقيقة: يُصمَّم من البداية.

بطاقات تعليمية

الموثوقية

احتمال العمل.

معدل الأعطال λ

الأعطال في الساعة.

التكرار الاحتياطي

وحدات احتياطية.

اختبار الفراغ الحراري

ظروف الفضاء على الأرض.

المعايرة

الحفاظ على دقة القياسات.

التخلص

إخراج من المدار في نهاية العمر.

اختبار ذاتي

1. R لـ 5 سنوات…

0.645

0.95

0.5

0.1

0.645. e^(−0.438).

2. زوج على التوازي…

0.874

0.645

0.416

1

$0.874 \cdot 1 - 0.355^2$.

3. MTBF...

100,000 h

10^{-5} h

1000 h

1 h

$\lambda/1$ .100,000 h.

4. غرض التحليق السفلي لـ Landsat...

المعايرة المتبادلة

تزود بالوقود

الالتحام

التخلص

المعايرة المتبادلة. NASA.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد ناسا بأن Landsat 9 طارت بعد الإطلاق مباشرة أسفل Landsat 8 في «تحليق سفلي» يحدث مرة واحدة في المهمة، وجمعت 2396 صورة من 12 إلى 16 نوفمبر 2021، كي يقارن خبراء المعايرة قياسات القمرين ويضمنوا استمرارية البيانات.

تشير ناسا إلى أن المعايرة على المتن والتكرار الاحتياطي يساعدان Landsat 9 على جمع بيانات دقيقة وموثوقة طوال عمر مهمتها: هندسة الموثوقية في خدمة سجل كوكبي.

على Saving Planets: رصد الأرض · الحلول

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

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): دليل مجاني من ناسا.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

هذه التمارين داخل كل وحدة. حلّها على الورق أولًا، ثم افتح الإجابة.

1. متطلبات المهمة وهندسة النظم
   4 مسائل
2. المدارات والبيئة الفضائية
   4 مسائل
3. توليد الطاقة: المصفوفات الشمسية
   4 مسائل
4. تخزين الطاقة وميزانية القدرة
   4 مسائل
5. التحكم الحراري
   4 مسائل
6. الهياكل والآليات وأحمال الإطلاق
   4 مسائل
7. الدفع وميزانية delta-v
   4 مسائل
8. نظام تحديد الوضع والتحكم فيه
   4 مسائل
9. الاتصالات ومعالجة البيانات
   4 مسائل
10. الموثوقية والاختبار ونهاية العمر
    4 مسائل

المختبر (Spacecraft design lab)

المختبر هو الجزء العملي من المقرر. وهو هنا مجاني وللتدريب فقط، دون ساعات معتمدة.

كل مختبر يُجرى في محاكاة مجانية أو جدول بيانات، فلا توجد مخاطر مادية. لا تبنِ حزم بطاريات أو تشحنها أو تعدّلها لهذا المقرر. خذ استراحات من الشاشة، واجلس بوضعية سليمة، وأبعد الكابلات عن الممرات.

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

المختبر A: ميزانيتا الكتلة والقدرة مع الهامش

الأسبوع 1

الهدف: ابنِ في جدول بيانات ميزانية كتلة وقدرة لقمر صغير لرصد الأرض وطبّق الهوامش.

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

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

التخصيص مع الهامش

الإجراء

1. أدرج الأنظمة الفرعية: الحمولة، والهيكل، والقدرة، والحرارة، وADCS، والدفع، والاتصالات، وC&DH.
2. أدخل تقديرات كتلة نموذجية مجموعها 800 kg وتقديرات قدرة مجموعها 500 W.
3. طبّق هامش 20% على كل مجموع.
4. أعد المفاضلة الموزونة بخيارين من الوحدة 1 وغيّر الأوزان.

جدول البيانات

الميزانية	التقدير	مع هامش 20%
الكتلة الجافة	800 kg	960 kg
القدرة	500 W	600 W

قيم نموذجية.

مثال حسابي

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

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

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

الصلة بالكوكب: ناسا: Landsat 9 تجمع 740 مشهدًا يوميًا مقابل متطلب 400 مشهد. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر B: حاسبة الدورة المدارية والكسوف

الأسبوع 2

الهدف: احسب الدورة والكسوف في أسوأ حالة لعدة ارتفاعات في المدار المنخفض.

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

T=2π^3/μ

الدور المداري

الإجراء

1. أدخل ارتفاعات 400 و705 و1000 km.
2. احسب a وT والمدارات في اليوم.
3. احسب نسبة الكسوف ودقائقه.
4. قارن 705 km بقيم ناسا لـ Landsat 9.

جدول البيانات

الارتفاع (km)	T (min)	الكسوف (min)
400	92.6	36.1
705	98.9	35.3
1000	105.1	34.9

قيم محسوبة لأسوأ حالة (الشمس في مستوى المدار).

مثال حسابي

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

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

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

الصلة بالكوكب: تذكر ناسا أن Landsat 9 على ارتفاع 705 km بدورة 99 دقيقة. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر C: الخلايا الشمسية على التوالي والتوازي

الأسبوع 3

الهدف: صِل المصادر كبطاريات في PhET Circuit Construction Kit لترى السلاسل على التوالي والتوازي، ثم حجّم المصفوفات عبر المجموعة الشمسية.

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

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

مساحة المصفوفة

الإجراء

1. في PhET Circuit Construction Kit، صِل المصادر على التوالي والتوازي وسجّل الجهد والتيار.
2. في جدول بيانات، احسب مساحة المصفوفة لـ 500 W مع η = 0.30 و f_d = 0.85.
3. كرّر عند 1 و1.524 و5.2 وحدة فلكية.
4. اشرح لماذا تحتاج مهمات الكواكب الخارجية إلى مصفوفات ضخمة.

جدول البيانات

المسافة (وحدة فلكية)	المساحة لـ 500 W (m²)
1	1.44
1.524	3.35
5.2	39.0

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

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

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي متصفح وجدول بيانات.

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

sst-soa/power-subsystems/)

الصلة بالكوكب: ناسا: يتجاوز امتداد مصفوفات Europa Clipper المنشورة 30 مترًا. NASA Science: Europa Clipper (ht
tps://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر D: تحجيم البطارية للكسوف

الأسبوع 4

الهدف: حجّم البطاريات لأحمال مختلفة خلال كسوف مدته 35.3 دقيقة.

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

E=(P_et_e)/(DoD)

طاقة البطارية

الإجراء

1. استخدم كسوف 705 km من المختبر B.
2. أدخل أحمالًا قدرها 300 و500 و800 W.
3. احسب طاقة البطارية عند DoD قدره 30% والكتلة عند 150 Wh/kg.
4. كرّر مع DoD قدره 20% وناقش عمر الدورات.

جدول البيانات

الحمل (W)	البطارية (Wh)	الكتلة (kg)
300	588	3.92
500	980	6.53
800	1568	10.45

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

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

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

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

الصلة بالكوكب: تدرج ناسا خلايا 18650 بقدرة 260 Wh/kg ذات سجل في مهمة PACE. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر E: توازن الإشعاع وتحجيم المشع

الأسبوع 5

الهدف: استكشف الإشعاع الحراري في PhET Blackbody Spectrum، ثم احسب درجات حرارة الاتزان ومساحات المشعات.

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

T=((α S)/(4σ))^1/4

اتزان الكرة

الإجراء

1. في PhET Blackbody Spectrum، قارن الأطياف عند 250 و290 و6000 K.
2. احسب درجات حرارة الكرة لـ α/ε = 0.5 و1 و2.
3. احسب مساحة المشع لـ 500 W عند 250 و290 و320 K مع ε = 0.85.
4. اختر درجة حرارة للمشع واشرح المفاضلة.

جدول البيانات

الحالة	النتيجة
α/ε = 0.5	234.0 K
α/ε = 1	278.3 K
α/ε = 2	331.0 K
مشع عند 250 K	2.66 m²
مشع عند 320 K	0.99 m²

قيم محسوبة.

مثال حسابي

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

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي متصفح وجدول بيانات.

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

الصلة بالكوكب: ناسا: يستخدم TIRS في Landsat 9 مشغّلًا لمبرّد التبريد العميق وجسمًا أسود على المتن. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر F: ميزانية الوصلة الهابطة

الأسبوع 11

الهدف: ابنِ ميزانية وصلة بالديسيبل وانظر كيف تغيّر المسافة وحجم الهوائي الهامش.

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

```
L=20_10(4π d)/()
```

فقد المسار في الفضاء الحر

الإجراء

1. استخدم $f = 8.2$ GHz و$c = 3 \times 10^8$ m/s.
2. احسب فقد المسار عند 1000 و2000 و4000 km.
3. أضف قدرة الإرسال وكسبي الهوائيين والفقد الآخر.
4. أوجد حجم الطبق الذي يعيد الهامش عند 4000 km.

جدول البيانات

المسافة (km)	فقد المسار (dB)
1000	170.7
2000	176.7
4000	182.8

قيم محسوبة.

مثال حسابي

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

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

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

الصلة بالكوكب: ناسا: تحمل Europa Clipper هوائيًا عالي الكسب بقطر 3 أمتار. NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

مجموعات تدريب للامتحان

وقّت نفسك: نحو 10 دقائق لكل مسألة. ثم قارن بالحلول الكاملة.

مجموعة تمارين منتصف الفصل (الوحدات 5–1)

1. خصّص تقديرًا قدره 500 kg بهامش 30%.

   1. 1.3 × 500.

   الإجابة: 650 kg.

2. أوجد دورة مدار دائري على ارتفاع 550 km.

   1. $a = 6928.1$ km.
   2. $T = 2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

   الإجابة: 95.6 min.

3. مساحة المصفوفة لـ 1 kW عند 1 وحدة فلكية، $\eta = 0.30$، $f_d = 0.85$؟

   1. (0.85 × 0.3 × 1361)/1000.

   الإجابة: 2.88 m².

4. البطارية لـ 400 W خلال 35 min عند DoD قدره 25%؟

   1. 400 × 35/60/0.25.

   الإجابة: 933 Wh.

5. المشع لـ 300 W عند 300 K، $\varepsilon = 0.9$؟

   1. $300/(0.9\sigma \times 300^4)$.

   الإجابة: 0.73 m².

مجموعة التدريب النهائية (الوحدات 10–1)

1. التردد الطبيعي لـ $k = 4 \times 10^5$ N/m، $m = 40$ kg؟

   1. $(1/2\pi)\sqrt{(10^4)}$.

الإجابة: 15.9 Hz.

2. الوقود الدافع لـ 200 m/s على 800 kg عند Isp قدره 230 s؟

1. 800(1 − e^(−200/2255.5)).

الإجابة: 67.9 kg.

3. الخطأ الأرضي لـ 0.005° من 600 km؟

1. $8.727 \times 10^{-5} \times 600{,}000$.

الإجابة: 52.4 m.

4. فقد المسار عند 1500 km و8.2 GHz؟

1. $20 \log_{10}(4\pi \times 1.5 \times 10^{6} / 0.03659)$.

الإجابة: 174.2 dB.

5. الموثوقية لـ 2×10^{-6}/h = λ على مدى 7 سنوات؟

1. e^(−0.1226).

الإجابة: 0.885.

6. زوج على التوازي من وحدات 0.885؟

1. 1 − 0.115².

الإجابة: 0.987.

ورقة الصيغ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

الثوابت

الثابت	القيمة
μ للأرض	$398{,}600.4418\ km^3/s^2$
نصف قطر الأرض (الاستوائي)	$6378.137\ km$
التدفق الشمسي عند 1 وحدة فلكية (قيمة مرجعية)	$1361\ W/m^2$
ثابت ستيفان-بولتزمان	$\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8}\ W/(m^2 \cdot K^4)$
سرعة الضوء	$299792458\ m/s$ (استُخدم 3×10^8 في الأمثلة)
الجاذبية المعيارية	$g_0 = 9.80665\ m/s^2$

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

نصوص ومحاكاة مجانية

استخدم هذه المحاضرات المجانية ومراجع ناسا والمحاكاة إلى جانب المقرر.

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): محاضرات MIT مجانية في هندسة الأقمار الصناعية.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): دليل مجاني من ناسا.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): مسح تقني مجاني من ناسا.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): فصل مجاني من ناسا عن القدرة.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): الإشعاع الحراري بشكل تفاعلي.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): الدوائر بشكل تفاعلي.

مسرد المصطلحات

ADCS
نظام تحديد الوضع والتحكم فيه.

كسب الهوائي
تركيز الحزمة بالنسبة إلى المشع المتماثل.

Bus
منصة المركبة الفضائية التي تحمل الحمولة.

C&DH
الأوامر ومعالجة البيانات.

عمق التفريغ
جزء سعة البطارية المستخدم.

الكسوف
الوقت في ظل كوكب.

الانبعاثية
القدرة على إشعاع الحرارة.

نهاية العمر
الأداء بعد التدهور.

مساعدة الجاذبية
تحليق قرب كوكب يغيّر السرعة.

السجل
تصميم مجرّب في الطيران.

ميزانية الوصلة
مجموع الكسوب والفقد في وصلة راديوية.

الهامش
احتياطي فوق الحاجة.

العزل متعدد الطبقات
غطاء حراري يحجب الإشعاع.

فقد المسار
فقد انتشار الإشارة.

الحمولة
الأدوات التي توجد المهمة من أجلها.

التكرار الاحتياطي
عتاد احتياطي.

المتطلب
حاجة قابلة للقياس والتحقق.

التدفق الشمسي
قدرة ضوء الشمس لكل مساحة.

القدرة النوعية
القدرة لكل كتلة.

مدار متزامن مع الشمس
مدار يعبر في التوقيت المحلي نفسه يوميًا.

معايير التقييم الذاتي

لا تُمنح درجة ولا ساعات معتمدة. استخدم هذا لتقيّم بصدق أين أنت في كل وحدة.

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يبدأ من المتطلبات، ويحافظ على ميزانيات متسقة بهوامش، ويتحقق من الوحدات ورتب المقادير، ويشرح مقايضات الأنظمة الفرعية بلغة واضحة.
3 · متمكن	يحل مسائل التدريب مع هفوات عرضية في الوحدات أو الهوامش.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يخلط بين القدرة والطاقة أو بين dB والقيم الخطية.
1 · مبتدئ	يعوّض الأرقام في الصيغ دون متطلب أو ميزانية؛ يحتاج إلى مراجعة الوحدة.

الأوزان المقترحة إذا أردت درجة

الجزء	الوزن
تمارين	20%
المختبرات	25%
مجموعة تدريب منتصف الفصل	25%
مجموعة التدريب النهائية	30%

استهدف المستوى 3 أو أعلى في كل وحدة قبل الانتقال إلى الدورة التالية.

دورات ذات صلة

- ديناميكا الطيران والتحكم AERO 420
- انتقال الحرارة AERO 440
- الدفع AERO 410
- كل الدورات