آخر تحديث: November 1, 2026

🗺️ خريطة طريق لأربع سنوات · السنة 4, الخريف

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 انتقال الحرارة للمهندسين. وهو مبني على موضوعات ومستوى الكتاب المجاني على الإنترنت A Heat Transfer Textbook لـ Lienhard وLienhard وMIT 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (مجاني على MIT OpenCourseWare)، 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 (موازنة طاقة الأرض لدى ناسا، وParker Solar Probe، والمضخات الحرارية ENERGY STAR)، 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

مناخ الأرض مسألة انتقال حرارة: يدخل ضوء الشمس، ويخرج الإشعاع تحت الأحمر الحراري، وينقل الحمل والتبخر الحرارة بينهما. والفيزياء نفسها تحدد مقدار الطاقة التي تهدرها مبانينا ومحركاتنا وإلكترونياتنا.

العزل والمضخات الحرارية والمبادلات الفعّالة من أرخص الحلول المناخية. 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 440).
- 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

- الديناميكا الحرارية: موازنات الطاقة والقانونان الأول والثاني.
- ميكانيكا الموائع: الطبقات الحدية وعدد رينولدز والجريان في الأنابيب.
- المعادلات التفاضلية: المعادلات التفاضلية العادية من الرتبة الأولى وفصل المتغيرات.
- التفاضل والتكامل III: التدرجات والتكاملات على المساحات والحجوم.

كيف تذاكر

- ارسم النظام وكل سهم لتدفق الحرارة قبل كتابة أي معادلة.
- استخدم الكلفن للإشعاع وفروق درجات الحرارة للتوصيل والحمل.
- حوّل كل مسألة إلى شبكة مقاومات حرارية حين يمكنك ذلك.
- تحقّق من الأعداد اللابعدية (Bi وRe وPr وNu وRa) لاختيار العلاقة التجريبية الصحيحة.
- قارن الإجابات بالتجربة اليومية: بيت دافئ، وكوب يبرد، ومقلاة ساخنة.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاة PhET المجانية Energy Forms and Changes وBlackbody Spectrum وGreenhouse Effect.
- برنامج جداول بيانات (أي برنامج مجاني يفي بالغرض)، أو Python.
- الكتاب المجاني على الإنترنت A Heat Transfer Textbook 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	أنماط انتقال الحرارة وموازنات الطاقة	الأنماط وموازنات الطاقة	Lienhard AHTT
2	التوصيل المستقر والمقاومة الحرارية	المقاومة الحرارية؛ المختبر A	Lienhard AHTT

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
3	الأسطوانات والكرات والزعانف	الأسطوانات ونصف القطر الحرج	Lienhard AHTT
4	الأسطوانات والكرات والزعانف	الزعانف؛ المختبر B	MIT 2.51
5	التوصيل العابر	التوصيل العابر؛ المختبر C	Lienhard AHTT
6	الحمل القسري الخارجي	الطبقات الحدية	MIT 2.51
7	الحمل القسري الخارجي	علاقات الصفيحة المستوية؛ المختبر D؛ تدريب لاختبار منتصف الفصل	Lienhard AHTT
8	الجريان الداخلي والمبادلات الحرارية	الجريان الداخلي	MIT 2.51
9	الجريان الداخلي والمبادلات الحرارية	المبادلات الحرارية	Lienhard AHTT
10	الحمل الطبيعي والغليان	الحمل الطبيعي والغليان	Lienhard AHTT
11	أساسيات الإشعاع	أساسيات الإشعاع؛ المختبر E	NASA Earth Observatory
12	التبادل الإشعاعي والدروع	معاملات الرؤية	Lienhard AHTT
13	التبادل الإشعاعي والدروع	الدروع وParker Solar Probe	NASA Parker Solar Probe
14	المضخات الحرارية والمباني وموازنة طاقة الأرض	المضخات الحرارية وموازنة الأرض؛ المختبر F	ENERGY STAR
15	المضخات الحرارية والمباني وموازنة طاقة الأرض	المراجعة؛ تدريب للامتحان النهائي	MIT 2.51

تقدّمك

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

الوحدات

أنماط انتقال الحرارة وموازنات الطاقة

التوصيل والحمل والإشعاع، ومعادلات معدلاتها، وموازنات الطاقة على الأسطح وأحجام التحكم.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- سمِّ الأنماط الثلاثة وقوانين معدلاتها.
- احسب معدلات التوصيل والحمل والإشعاع.
- اكتب موازنة طاقة لسطح.
- اقرأ موازنة طاقة الأرض بوصفها موازنة حرارية.

المفاهيم الأساسية

- انتقال الحرارة طاقة منتقلة بسبب فرق في درجة الحرارة؛ الديناميكا الحرارية تقول كم، وانتقال الحرارة يقول بأي سرعة.
- ينقل التوصيل الطاقة عبر جسم صلب أو مائع ساكن بالتلامس الجزيئي (قانون فوريه).
- ينقل الحمل الطاقة بين سطح ومائع متحرك (قانون نيوتن للتبريد، مع معامل انتقال حرارة h).
- ينقل الإشعاع الطاقة بموجات كهرومغناطيسية، ولا يحتاج إلى وسط، ويزداد مع T^4 بالكلفن (قانون ستيفان-بولتزمان).
- السطح لا يخزن طاقة، فما يصل بنمط يجب أن يغادر بالأنماط الأخرى.

المعادلات الأساسية

$$q = kA\frac{\Delta T}{L}$$

```
q=kA(Δ T)/(L)
```

قانون فوريه، جدار مستوٍ

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

```
q=hA(T_s-T_∞)
```

قانون نيوتن للتبريد

$$q = \varepsilon \sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

```
q=σ A(T_s^4-T_sur^4)
```

الإشعاع الصافي نحو محيط واسع

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st}$$

```
E_in- E_out+ E_g= E_st
```

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 جدار خرساني سمكه 0.2 m ($k = 1.4$ W/(m·K)، نموذجية) ومساحته 10 m² عليه فرق 15 K. أوجد q.

1. $q = 1.4 \times 10 \times 15/0.2$.

الإجابة: 1050 W.

مثال 1.2 صفيحة $\varepsilon = 0.9$ عند 400 K في محيط عند 300 K. ما الإشعاع الصافي لكل m²؟

1. $0.9\sigma(400^4 - 300^4) = 0.9 \times 5.670374419 \times 10^{-8} \times 1.75 \times 10^{10}$.

الإجابة: 893 W/m².

مثال 1.3 تقول ناسا إن نحو 29% من ضوء الشمس الوارد ينعكس وإن المتوسط العالمي نحو 340 W/m². كم يُمتص؟

1. المنعكس: $0.29 \times 340 = 98.6$ W/m².
2. الممتص: $340 - 98.6$.

الإجابة: 241.4 W/m²، بما يوافق قيمة ناسا البالغة نحو 240 W/m².

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أعد مثال الجدار مع $k = 0.04$ W/(m·K).

   30 W.

2. الحمل مع $h = 25$ W/(m²·K)، $A = 2$ m²، $\Delta T = 40$ K؟

   2000 W.

3. لماذا يجب أن يستخدم الإشعاع الكلفن؟

   T^4 تعتمد على درجة الحرارة المطلقة.

4. لماذا 1360/4 هو متوسط ضوء الشمس العالمي؟

   مساحة الكرة 4 أضعاف قرص ظلها: $1360/4 = 340$ W/m².

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الحرارة ودرجة الحرارة شيء واحد.

في الحقيقة: درجة الحرارة حالة؛ والحرارة طاقة منتقلة.

خرافة: الإشعاع يحتاج إلى هواء.

في الحقيقة: إنه ينتقل عبر الفراغ.

خرافة: h خاصية للمادة.

في الحقيقة: يعتمد على الجريان والشكل الهندسي.

بطاقات تعليمية

التوصيل

انتقال الطاقة الجزيئي عبر المادة.

الحمل

انتقال من سطح إلى مائع متحرك.

الإشعاع

تبادل الطاقة الكهرومغناطيسية.

h

معامل الحمل، W/(m²·K).

k

الموصلية الحرارية، W/(m·K).

موازنة السطح

الداخل = الخارج عند سطح.

اختبار ذاتي

1. q للجدار الخرساني...

1050 W

105 W

4200 W

210 W

15/0.2 × 10 × 1.4 = 1050 W.

2. يتناسب الإشعاع مع...

T^4 (K)

T (°C)

T^2

T^3

T^4 (K). ستيفان-بولتزمان.

3. تمتص الأرض نحو...

240 W/m²

1360 W/m²

29 W/m²

0.8 W/m²

240 W/m². NASA.

4. النمط الذي لا يحتاج إلى وسط...

الإشعاع

التوصيل

الحمل

الغليان

الإشعاع. الموجات.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يقول NASA Earth Observatory إن الإشعاع الشمسي الكلي نحو 1360 W/m²، بمتوسط نحو 340 W/m² على الكرة الأرضية؛ ينعكس نحو 29%، ويمتص الغلاف الجوي 23% والسطح 48%، فتمتص الأرض نحو 240 W/m².

ولكي تبقى درجة الحرارة مستقرة يجب أن تشع الأرض الـ 240 W/m² نفسها عائدة إلى الفضاء كإشعاع تحت أحمر حراري، وهي الموازنة الحرارية التي يعود إليها هذا المقرر في الوحدة 10.

على Saving Planets: رصد الأرض · الديناميكا الحرارية

المصادر: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصل 1.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): شرح من ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

التوصيل المستقر والمقاومة الحرارية

معادلة الحرارة، والتوصيل المستقر أحادي البعد، وشبكات المقاومات الحرارية، والجدران المركبة، والعزل.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اذكر معادلة الحرارة وصيغتها المستقرة 1D.
- ابنِ شبكات مقاومات على التوالي والتوازي.
- احسب الفقد الحراري عبر جدار مركب.
- حدد مقدار الوفر الناتج عن العزل.

المفاهيم الأساسية

- توازن معادلة الحرارة بين التوصيل والتوليد والتخزين؛ وفي الحالة المستقرة دون توليد يكون للجدار المستوي توزيع حراري خطي.
- كل طبقة تعمل كمقاومة كهربائية: R = L/(kA) للتوصيل، و1/(hA) للحمل.
- المقاومات على التوالي تُجمع؛ وتدفق الحرارة يساوي ΔT الكلي مقسومًا على المقاومة الكلية، مثل التيار.
- أكبر مقاومة تتحكم في تدفق الحرارة، ولهذا يكون العزل (k منخفض) هو الأهم.
- مقاومة التلامس بين الطبقات قد تضيف مقاومة مفاجئة في الإلكترونيات والوصلات.

المعادلات الأساسية

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

```
·(k T)+ q=ρ c( T)/( t)
```

معادلة الحرارة

$$R_{cond} = \frac{L}{kA}$$

```
R_cond=L/kA
```

مقاومة التوصيل

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

```
R_conv=1/hA
```

مقاومة الحمل

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\sum R}$$

q=_∞,1-T_∞,2 R

شبكة على التوالي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 جدار فيه هواء داخلي (h = 8)، وعزل 0.1 m (k = 0.04)، وطوب 0.1 m (k = 0.7)، وهواء خارجي (h = 25)، وكلها قيم نموذجية. أوجد المقاومة لكل m².

1. 1/8 + 0.1/0.04 + 0.1/0.7 + 1/25 = 0.125 + 2.5 + 0.1429 + 0.04.

الإجابة: 2.808 m²·K/W.

مثال 2.2 مع 20 K بين الداخل والخارج، أوجد الفيض الحراري والفقد عبر 100 m².

1. "q = 20/2.808 = 7.12 W/m² =.
2. q = 100 × 7.12 = q.

الإجابة: 712 W.

مثال 2.3 أزل العزل. بكم يزداد الفقد؟

1. "R = 0.3079 m²·K/W =.
2. "q = 20/0.3079 = 64.97 W/m² =.

الإجابة: نحو 9.1 مرة؛ يقلل العزل الفقد بنسبة 89.0%.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ضاعف العزل إلى 0.2 m. ما "q الجديد؟

   "R = 5.308, q "= 3.77 W/m² =.

2. أي طبقة تهيمن في الجدار الأصلي؟

   العزل، 2.5 من 2.808 m²·K/W.

3. اكتب R لطبقتين على التوازي.

   1/R = 1/R₁ + 1/R₂.

4. شكل T(x) في جدار مستوٍ في الحالة المستقرة؟

خطي.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الطبقات الرقيقة لا تهم أبدًا.
في الحقيقة: طبقة رقيقة منخفضة k قد تهيمن.

خرافة: المقاومات على التوالي تُضرب.
في الحقيقة: بل تُجمع.

خرافة: أغشية الهواء لا تضيف شيئًا.
في الحقيقة: مقاومة الحمل حقيقية.

بطاقات تعليمية

المقاومة الحرارية

ΔT لكل وحدة تدفق حراري.

معادلة الحرارة

موازنة الطاقة في جسم صلب.

الجدار المركب

طبقات على التوالي.

العزل

مادة منخفضة k.

مقاومة التلامس

مقاومة عند سطح بيني.

قيمة U

المعامل الكلي، 1/R".

اختبار ذاتي

1. R" الكلية...

2.808 m²·K/W

2.5

0.308

28.08

2.808 m²·K/W. اجمع الطبقات.

2. الفقد عبر 100 m² ...

712 W

71 W

6497 W

2000 W

7.12 × 100 = 712 W.

3. وفر العزل ...

89.0%

50%

9.1%

25%

1 − 0.3079/2.808 = 89.0%.

4. المقاومات على التوالي ...

تُجمع

تُضرب

يؤخذ متوسطها

تلغي بعضها

تُجمع. تشبيه الدائرة الكهربائية.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول ENERGY STAR إن فاتورة الطاقة النموذجية للأسرة الأمريكية نحو $1900 سنويًا وإن نصفها تقريبًا يذهب إلى التدفئة والتبريد.

يبيّن الجدار النموذجي في هذه الوحدة لماذا يأتي الإحكام والعزل أولًا: إضافة العزل خفّضت فقد التوصيل بنحو 89%، فيصبح على أي نظام تدفئة تعويض حرارة أقل بكثير.

على Saving Planets: الحلول · الديناميكا الحرارية

المصادر: ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصل 2.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

الأسطوانات والكرات والزعانف

التوصيل القطري، وعزل الأنابيب ونصف القطر الحرج، والأسطح الممتدة، وكفاءة الزعانف، وتبريد الإلكترونيات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب مقاومة التوصيل القطري.
- أوجد نصف قطر العزل الحرج.
- احسب معامل الزعنفة m وكفاءة الزعنفة.
- قدّر الحرارة من زعنفة.

المفاهيم الأساسية

- في الأسطوانة تزداد المساحة مع نصف القطر، لذا يكون التوزيع الحراري لوغاريتميًا و$R = \ln(r_2/r_1)/(2\pi kL)$.
- إضافة عزل إلى سلك صغير قد تزيد الفقد الحراري حتى يتجاوز نصف القطر الخارجي نصف القطر الحرج k/h.
- تضيف الزعانف مساحة حيث يكون h منخفضًا (عادةً الغازات)، كما في أسطوانات المحركات والمشتتات الحرارية والمشعات.
- معامل الزعنفة ($m = \sqrt{(hP/(kA_c))}$) يحدد سرعة اضمحلال درجة حرارة الزعنفة من قاعدتها.
- تقارن كفاءة الزعنفة الحرارة الفعلية بالحرارة لو كانت الزعنفة كلها عند درجة حرارة القاعدة.

المعادلات الأساسية

$$R_{cyl} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L}$$

```
R_cyl=((r_2/r_1))/(2π kL)
```

المقاومة القطرية

$$r_{cr} = \frac{k}{h}$$

```
r_cr=k/h
```

نصف القطر الحرج (أسطوانة)

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}}$$

```
m=(hP)/(kA_c)
```

معامل الزعنفة

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c}$$

_f=((mL_c))/(mL_c)

كفاءة الزعنفة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 عزل أنبوب من r = 0.05 إلى 0.1 m، k = 0.04 W/(m·K)، بطول 1 m وفرق 100 K (قيم نموذجية). أوجد R وq.

1. R = ln 2/(2π × 0.04) = 2.758 K/W.
2. q = 100/2.758.

الإجابة: 36.3 W لكل متر.

مثال 3.2 زعنفة دبوسية من الألمنيوم (k = 200) قطرها 5 mm مع h = 50 W/(m²·K) وطول فعال 20 mm. أوجد η.

1. m = √(4h/(kD)) = √(200/1) = 14.14 m⁻¹.
2. mL = 0.2828.
3. η = tanh(0.2828)/0.2828.

الإجابة: 0.974.

مثال 3.3 الحرارة من تلك الزعنفة مع فائض 50 K عند القاعدة؟

1. A_f = πDL = 3.142 × 10⁻⁴ m².
2. q = ηhA_fθ = 0.974 × 50 × 3.142 × 10⁻⁴ × 50.

الإجابة: 0.765 W.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. نصف القطر الحرج لـ k = 0.04 وh = 8؟

   5 mm.

2. كفاءة الزعنفة عند L = 40 mm؟

   mL = 0.566, η = 0.905.

3. لماذا تناسب الزعانف الهواء أكثر من الماء؟

   h المنخفض للهواء يجعل المساحة عنق الزجاجة.

4. شكل التوزيع في جدار أسطواني؟

لوغاريتمي.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المزيد من العزل يساعد دائمًا.
في الحقيقة: ليس دون نصف القطر الحرج.

خرافة: الزعانف الأطول تساعد كثيرًا دائمًا.
في الحقيقة: تنخفض الكفاءة مع الطول.

خرافة: الزعانف تعمل في أي وسط.
في الحقيقة: إنها مجدية حيث يكون h منخفضًا.

بطاقات تعليمية

نصف القطر الحرج

k/h للأسطوانات.

Fin

سطح ممتد.

كفاءة الزعنفة

الحرارة الفعلية على الحرارة المثالية للزعنفة.

m

معامل اضمحلال الزعنفة.

المشتت الحراري

مجموعة زعانف.

توزيع لوغاريتمي

درجة الحرارة المستقرة في أسطوانة.

اختبار ذاتي

1. R للأنبوب...

2.758 K/W

0.276

27.6

1.0

.2.758 K/W. ln 2/(2π × 0.04)

2. نصف القطر الحرج...

5 mm

50 mm

0.5 mm

200 mm

.5 mm. k/h

3. كفاءة الزعنفة...

0.974

0.5

0.283

1.2

.0.974. tanh(mL)/mL

4. حرارة الزعنفة...

0.765 W

7.65 W

76.5 W

0.0765 W

.0.765 W. ηhAθ

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تنتقل الحرارة في جدار الأنبوب كما في قشرة كوكب: من الساخن إلى البارد، عبر مقاومات على التوالي.

عزل أنابيب الماء الساخن والبخار من أبسط خطوات الكفاءة في المباني والصناعة. جميع القيم في هذه الوحدة قيم مرجعية نموذجية.

على Saving Planets: الحلول · الدوائر الكهربائية

المصادر: J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصل 4.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

التوصيل العابر

عدد بيوت، ونموذج السعة المجمّعة، والثوابت الزمنية، ومتى تهم تدرجات درجة الحرارة المكانية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب عدد بيوت.
- استخدم النموذج المجمّع عندما Bi < 0.1.
- احسب ثابتًا زمنيًا حراريًا.
- أوجد الزمن اللازم لبلوغ درجة حرارة مستهدفة.

المفاهيم الأساسية

- يقارن عدد بيوت مقاومة التوصيل الداخلية بمقاومة الحمل الخارجية.
- عندما Bi < 0.1 يكون الجسم شبه متجانس في درجة الحرارة ويصلح النموذج المجمّع.
- في النموذج المجمّع يضمحل فائض درجة الحرارة أسيًا بثابت زمني τ = ρcV/(hA).
- لقيم Bi الأكبر استخدم حلول المتسلسلات بحد واحد أو المخططات (Heisler) أو طريقة عددية.
- السعة الحرارية العالية تبطئ الاستجابة: المحيطات والجدران السميكة حدافات حرارية.

المعادلات الأساسية

$$Bi = \frac{hL_c}{k},\ L_c = V/A$$

```
Bi=(hL_c)/(k),\ L_c=V/A
```

عدد بيوت

$$\tau = \frac{\rho c V}{hA}$$

```
τ=(ρ cV)/(hA)
```

الثابت الزمني

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-t/\tau}$$

```
(T-T_∞)/(T_i-T_∞)=e^-t/τ
```

الاستجابة المجمّعة

$$t = \tau \ln \frac{\theta_i}{\theta}$$

$t = \tau \ln(\theta_i/\theta)$

الزمن حتى الهدف

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 كرة ألمنيوم قطرها 10 mm ($k = 237$، $\rho = 2700$، $c = 900$) تبرد في الهواء مع $h = 50$. أوجد Bi.

1. $L_c = D/6 = 1.667 \times 10^{-3}$ m.
2. $Bi = 50 \times 1.667 \times 10^{-3}/237$.

الإجابة: 3.52×10^{-4}، لذا يصلح النموذج المجمّع.

مثال 4.2 أوجد τ لتلك الكرة.

1. $\tau = 2700 \times 900 \times 1.667 \times 10^{-3}/50$.

الإجابة: 81 s.

مثال 4.3 كم يستغرق التبريد من 300 °C إلى 50 °C في هواء 20 °C؟

1. $\theta_i = 280$ K, $\theta = 30$ K.
2. $t = 81 \ln(280/30) = 81 \times 2.234$.

الإجابة: 181 s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. جزء الفائض المتبقي بعد τ واحد؟

   $e^{-1} = 0.368$.

2. الزمن لتنصيف الفائض؟

   $\tau \ln 2 = 56.1$ s.

3. $Bi = 0.5$. هل النموذج المجمّع صالح؟

   لا؛ استخدم حلول المتسلسلات أو الحلول العددية.

4. ضاعف h. ماذا يحدث لـ τ؟

ينخفض إلى النصف، 40.5 s.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: Bi هو عدد نوسلت.
في الحقيقة: Bi يستخدم k للجسم الصلب؛ وNu يستخدم k للمائع.

خرافة: النموذج المجمّع يصلح لأي حجم.
في الحقيقة: فقط عندما Bi < 0.1.

خرافة: التبريد خطي مع الزمن.
في الحقيقة: إنه أسي.

بطاقات تعليمية

عدد بيوت

المقاومة الداخلية على الخارجية.

السعة المجمّعة

نموذج درجة حرارة متجانسة.

الثابت الزمني

pcV/(hA).

مخطط Heisler

مخطط الحل العابر بحد واحد.

الكتلة الحرارية

سعة حرارية تبطئ التغير.

L_c

الطول المميز V/A.

اختبار ذاتي

1. الثابت الزمني...

- 81 s
- 8.1 s
- 810 s
- 181 s
- 81 s. pcV/(hA).

2. زمن التبريد إلى 50 °C...

181 s

81 s

56 s

300 s

181 s. τ ln(280/30).

3. النموذج المجمّع صالح عندما...

Bi < 0.1

Bi > 1

$Re > 5 \times 10^5$

Nu < 1

Bi < 0.1. جسم متجانس.

4. بعد τ واحد...

يتبقى 36.8%

يتبقى 50%

يتبقى 0%

يتبقى 63.2%

يتبقى e^{-1}. 36.8%.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يذكر Earth Observatory التابع لـ NASA أن متوسط حرارة سطح الأرض نحو 15 °C، أي أدفأ بأكثر من 30 °C مما لو لم يكن هناك غلاف جوي.

بلغة هذه الوحدة، السعة الحرارية الكبيرة تعني ثابتًا زمنيًا طويلًا؛ وسعة المحيطات الحرارية تمنح مناخ الأرض استجابة بطيئة (فكرة من الكتب الدراسية، لا رقم من NASA).

على Saving Planets: المحيطات · رصد الأرض

المصادر: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصل 5.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

الحمل القسري الخارجي

الطبقات الحدية، وأعداد رينولدز وبرانتل ونوسلت، وعلاقات الصفيحة المستوية، والجريان حول الأسطوانات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب Re وPr وNu.
- استخدم علاقة الصفيحة المستوية الطباقية.
- أوجد h ومعدل الحرارة.
- تحقق من الانتقال عند $Re \approx 5 \times 10^5$.

المفاهيم الأساسية

- تتكون طبقات حدية للسرعة والحرارة على السطح؛ وتعبر الحرارة الطبقة الرقيقة من المائع البطيء بالتوصيل.
- عدد نوسلت $Nu = hL/k$ هو معامل انتقال الحرارة اللابعدي.
- يقارن عدد برانتل بين انتشارية الزخم والانتشارية الحرارية (نحو 0.7 للهواء، ونحو 7 للماء قرب درجة حرارة الغرفة، قيم مرجعية).
- على الصفيحة المستوية يكون الجريان عادةً طباقيًا دون $Re \approx 5 \times 10^5$؛ والاضطراب يرفع h.
- العلاقات مطابقات لتجارب؛ استخدمها ضمن نطاقاتها المعلنة.

المعادلات الأساسية

$$Re_L = \frac{VL}{\nu}$$

`Re_L=(VL)/(ν)`

عدد رينولدز

$$Nu_L = \frac{\bar{h}L}{k}$$

`Nu_L=( hL)/(k)`

عدد نوسلت

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

`_L=0.664Re_L^1/2Pr^1/3`

صفيحة مستوية طباقية (متوسط)

$$\overline{Nu}_L = 0.037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$$

`_L=0.037Re_L^4/5Pr^1/3`

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 يجري هواء ($\nu = 1.5 \times 10^{-5}$، $k = 0.026$، $Pr = 0.71$) بسرعة 5 m/s فوق صفيحة طولها 0.5 m. أوجد Re.

1. $Re = 5 \times 0.5 / 1.5 \times 10^{-5}$.

الإجابة: 166667، طباقي.

مثال 5.2 أوجد متوسط Nu وh.

1. $Nu = 0.664 \times 166{,}667^{1/2} \times 0.71^{1/3} = 0.664 \times 408.2 \times 0.892 = 241.8$.
2. $h = 241.8 \times 0.026 / 0.5$.

الإجابة: 12.6 W/(m²·K).

مثال 5.3 الحرارة من صفيحة 1 m × 0.5 أعلى من الهواء بـ 30 K؟

1. $q = 12.58 \times 0.5 \times 30$.

الإجابة: 189 W.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أعد حساب h عند 10 m/s.

   Re = 333333، h = 17.8 W/(m²·K) (أعلى بـ 2× مرة).

2. Re عند 1 m/s؟

   33,333.

3. سمِّ h اللابعدي.

   عدد نوسلت.

4. لماذا يرفع الاضطراب h؟

   الخلط يرقق الطبقة البطيئة قرب الجدار.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: Nu يستخدم k للجسم الصلب.
في الحقيقة: بل يستخدم k للمائع.

خرافة: علاقة واحدة تناسب كل الجريانات.
في الحقيقة: تحقق من النطاق والشكل الهندسي.

خرافة: h ثابت على طول الصفيحة.
في الحقيقة: h الموضعي ينخفض مع نمو الطبقة.

بطاقات تعليمية

عدد رينولدز

القصور الذاتي على اللزوجة.

عدد برانتل

ν/α.

عدد نوسلت

hL/k.

الطبقة الحدية

منطقة رقيقة قرب الجدار.

الارتباط

مطابقة لتجارب.

الانتقال

من الطباقي إلى المضطرب.

اختبار ذاتي

1. Re عند 5 m/s…

166,667

16,667

1.67×10^{6}

6000

VL/ν .166,667.

2. متوسط h...

12.6 W/(m²·K)

126

1.26

242

.12.6 W/(m²·K). Nu k/L

3. معدل الحرارة...

189 W

18.9 W

377 W

63 W

.189 W. hAΔT

4. الانتقال قرب...

5×10^5

2300

10^3

10^9

$10^5 \times 5$. صفيحة مستوية.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يقول Earth Observatory التابع لـ NASA إن الحمل ينقل نحو 5% من الطاقة الشمسية الواردة من السطح إلى الغلاف الجوي، بينما ينقل التبخر نحو 25%.

سرعة الرياح تحدد h فوق المحيطات واليابسة كما تحدد السرعة h على صفيحة هذه الوحدة، ولهذا تحدد الرياح سرعة فقدان السطح لحرارته.

على Saving Planets: ميكانيكا الموائع · المحيطات

المصادر: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصلان 7–6.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

الجريان الداخلي والمبادلات الحرارية

الحمل في الأنابيب، ودرجة الحرارة المتوسطة، وعلاقة Dittus–Boelter، وأنواع المبادلات الحرارية، وLMTD والفعالية–NTU.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدم علاقات الأنابيب الطباقية والمضطربة.
- احسب فرق درجة الحرارة اللوغاريتمي المتوسط.
- صمّم مبادلًا حراريًا باستخدام UA وLMTD.
- استخدم طريقة الفعالية–NTU.

المفاهيم الأساسية

- في الأنبوب تتغير درجة الحرارة الكتلية (المتوسطة) على طوله مع دخول الحرارة أو خروجها.
- الجريان الطباقي كامل التطور مع درجة حرارة جدار ثابتة له Nu = 3.66؛ ويستخدم الجريان المضطرب Dittus–Boelter (علاقات مرجعية).
- المبادلات ذات الجريان المعاكس تتفوق على الجريان المتوازي لأن فرق درجة الحرارة يبقى أكثر انتظامًا.
- تناسب طريقة LMTD التصميم عندما تكون درجات الحرارة الأربع معلومة.
- تناسب طريقة ε-NTU تقييم الأداء عندما تكون درجات حرارة المخرج مجهولة.

المعادلات الأساسية

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{0.4}$$

```
Nu_D=0.023Re_D^4/5Pr^0.4
```

Dittus–Boelter (تسخين)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

```
Δ T_lm=(Δ T_1-Δ T_2)/((Δ T_1/Δ T_2))
```

فرق درجة الحرارة اللوغاريتمي المتوسط

$$q = U A \Delta T_{lm}$$

```
q=UAΔ T_lm
```

معدل حرارة المبادل

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \ (C_r = 0)$$

=1-e^-NTU\ (C_r=0)

الفعالية، مكثف أو مبخر

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 يجري ماء (k = 0.6، Pr = 7، قيم مرجعية) عند Re = 20000 في أنبوب قطره 20 mm. أوجد h.

1. Nu = 0.023 × 20,000^0.8 × 7^0.4 = 138.2.
2. h = 138.2 × 0.6/0.02.

الإجابة: نحو 4150 W/(m²·K).

مثال 6.2 جريان معاكس: الساخن 90 → 50 °C، البارد 20 → 40 °C. أوجد LMTD.

1. $\Delta T_1 = 90 - 40 = 50$ K; $\Delta T_2 = 50 - 20 = 30$ K.
2. LMTD = 20/ln(50/30).

الإجابة: 39.15 K.

مثال 6.3 مع U = 500 W/(m²·K) و A = 2 m²، أوجد q.

1. q = 500 × 2 × 39.15.

الإجابة: 39.2 kW.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ε عند NTU = 2 عندما يتكثف أحد التيارين (C_r = 0)؟

   1 − e⁻² = 0.865.

2. Nu الطباقي لدرجة حرارة جدار ثابتة؟

   3.66.

3. لماذا يُفضَّل الجريان المعاكس؟

   ΔT أكثر انتظامًا، وحرارة أكبر لكل مساحة.

4. Nu وفق Dittus–Boelter عند Pr = 0.7 وRe = 20000؟

.55.0

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: استخدم متوسط ΔT الحسابي.
في الحقيقة: استخدم المتوسط اللوغاريتمي.

خرافة: يمكن أن تتجاوز ε القيمة 1.
في الحقيقة: لا يمكن.

خرافة: العلاقات الطباقية تصلح للجريان المضطرب.
في الحقيقة: تحقق من Re أولًا.

بطاقات تعليمية

LMTD

ΔT اللوغاريتمي المتوسط.

NTU

UA/C_min.

الفعالية

الحرارة الفعلية على الحرارة القصوى.

الجريان المعاكس

تياران باتجاهين متعاكسين.

الترسبات

رواسب تضيف مقاومة.

Dittus–Boelter

علاقة الأنابيب المضطربة.

اختبار ذاتي

1. LMTD…

39.15 K

40 K

30 K

50 K

39.15 K. 20/ln(5/3).

2. q للمبادل...

39.2 kW

3.92 kW

20 kW

78 kW

.39.2 kW. UA LMTD

3. ε عند NTU 2...

0.865

0.5

0.98

2

.0.865. 1 − e^{-2}

4. h للماء...

≈ 4150 W/(m²·K)

≈ 41

≈ 415,000

≈ 1.4

.≈ 4150 W/(m²·K). Nu k/D

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يوضح ENERGY STAR أن المضخة الحرارية الهوائية تنقل الحرارة بين الهواء الداخلي والخارجي بدل توليدها من الوقود، باستخدام مبادلات حرارية (ملفات) على الجانبين.

المبادلات الأفضل تحتاج فرق درجة حرارة أصغر لنقل الحرارة نفسها، وهذا أحد أسباب تقديم المضخات الحرارية الحديثة حرارة أكبر لكل وحدة كهرباء.

على Saving Planets: الحلول · الديناميكا الحرارية

المصادر: ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصلان 3 و7.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

الحمل الطبيعي والغليان

الجريان المدفوع بالطفو، وعددا غراسهوف ورايلي، وعلاقات الصفيحة الرأسية، ومقدمة عن الغليان والتكثف.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب عدد رايلي.
- استخدم علاقة الصفيحة الرأسية.
- قارن h الطبيعي والقسري.
- صِف منحنى الغليان.

المفاهيم الأساسية

- المائع الدافئ أخف فيرتفع؛ الطفو، لا مروحة، هو ما يحرك الجريان.
- عدد رايلي Ra = gβΔTL³/(να) يؤدي الدور الذي يؤديه Re في الجريان القسري.
- على الصفيحة الرأسية يكون الجريان طباقيًا دون نحو $Ra = 10^9$ (قيمة مرجعية).
- h للحمل الطبيعي في الهواء لا يتجاوز بضع W/(m²·K)، لذا يكون الإشعاع غالبًا مماثلًا.
- ينقل الغليان والتكثف حرارة كبيرة عند ΔT صغير بفضل الحرارة الكامنة.

المعادلات الأساسية

$$Ra_L = \frac{g\beta \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$

```
Ra_L=(gβΔ TL^3)/(να)
```

عدد رايلي

$$\overline{Nu}_L = 0.59 Ra_L^{1/4}$$

```
_L=0.59Ra_L^1/4
```

صفيحة رأسية طباقية

$$\beta = 1/T$$

معامل تمدد الغاز المثالي

$$Gr = Ra/Pr$$

```
Gr=Ra/Pr
```

عدد غراسهوف

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 صفيحة رأسية طولها $0.3\ \text{m}$ أعلى من الهواء بـ $30\ \text{K}$ ($\beta = 1/300\ \text{K}^{-1}$، $\nu = 1.6 \times 10^{-5}$، $\alpha = 2.2 \times 10^{-5}$، قيم نموذجية). أوجد Ra.

1. $\text{Ra} = 9.80665 \times (1/300) \times 30 \times 0.3^3 / (1.6 \times 10^{-5} \times 2.2 \times 10^{-5})$.

الإجابة: 7.52×10^{7}، طباقي.

مثال 7.2 أوجد Nu وh مع $k = 0.026$.

1. $\text{Nu} = 0.59 \times (7.52 \times 10^{7})^{1/4} = 54.9$.
2. $h = 54.9 \times 0.026 / 0.3$.

الإجابة: $4.76\ \text{W/(m}^2\text{·K)}$.

مثال 7.3 الحرارة من صفيحة $1\ \text{m} \times 0.3$؟

1. $q = 4.76 \times 0.3 \times 30$.

الإجابة: $42.9\ \text{W}$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. قارن مع h القسري البالغ 12.6 في الوحدة 5.

القسري أعلى بنحو 2.64 مرة.

2. الحد الطباقي لـ Ra؟

نحو 10^{9}.

3. لماذا الغليان فعال جدًا؟

الحرارة الكامنة تنقل الطاقة عند ΔT صغير.

4. β لغاز مثالي عند 300 K؟

$1/300\ \text{K}^{-1} = 3.33 \times 10^{-3}$.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الحمل الطبيعي مهمل.

في الحقيقة: كثيرًا ما يعادل الإشعاع.

خرافة: Ra يستخدم السرعة.

في الحقيقة: بل يستخدم الطفو.

خرافة: h للغليان منخفض.

في الحقيقة: إنه من أعلى القيم.

بطاقات تعليمية

عدد رايلي

شدة الطفو.

عدد غراسهوف

الطفو على اللزوجة.

β

معامل التمدد.

منحنى الغليان

الفيض الحراري مقابل التسخين الزائد للجدار.

الفيض الحراري الحرج

أقصى فيض في الغليان النووي.

التكثف

تحول البخار إلى سائل على جدار بارد.

اختبار ذاتي

1. Ra…

7.52×10^{7}

7.52×10^{9}

752

5×10^{5}

7.52×10^{7}. $g\beta\Delta TL^3/(\nu\alpha)$.

2. h…

4.76 W/(m²·K)

47.6

0.476

12.6

.4.76 W/(m²·K). Nu k/L

3. الحرارة...

42.9 W

429 W

4.29 W

189 W

.42.9 W. hAΔT

4. محرك الحمل الطبيعي...

الطفو

مضخة

الإشعاع

هبوط الضغط

الطفو. فرق الكثافة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يقول Earth Observatory التابع لـ NASA إن التبخر يزيل نحو 25% من الطاقة الشمسية الواردة من السطح والحمل نحو 5%؛ وتنطلق الحرارة الكامنة عندما يتكثف بخار الماء في السحب.

عند متوسط إشعاع شمسي 340 W/m²، تبلغ هاتان الحصتان نحو 85 و17 W/m²، وهي عمليات تغير الطور والطفو نفسها التي تتناولها هذه الوحدة.

على Saving Planets: المحيطات · رصد الأرض

المصادر: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصلان 9–8.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): محاضرات MIT مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

أساسيات الإشعاع

الأجسام السوداء، وقانون بلانك، وقانون فين، وقانون ستيفان–بولتزمان، والانبعاثية، والامتصاصية، وقانون كيرشوف.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- أوجد الطول الموجي لذروة جسم أسود.
- احسب القدرة الإشعاعية.
- استخدم الانبعاثية والامتصاصية.
- أوجد درجة الحرارة الفعالة لكوكب.

المفاهيم الأساسية

- الجسم الأسود يمتص كل الإشعاع ويبعث أقصى ما يمكن عند كل درجة حرارة وطول موجي.
- قانون فين: الطول الموجي للذروة يتناسب عكسيًا مع درجة الحرارة المطلقة.
- تنمو القدرة الإشعاعية الكلية مثل σT^4، لذا فإن مضاعفة درجة الحرارة تضرب الانبعاث في 16.
- تبعث الأسطح الحقيقية جزءًا ε من قدرة الجسم الأسود؛ وللسطح الرمادي α = ε (كيرشوف).
- الإشعاع الشمسي قصير الموجة؛ وانبعاث الأرض أشعة تحت حمراء طويلة الموجة، ولهذا تهم غازات مثل CO_2 وبخار الماء.

المعادلات الأساسية

$$\lambda_{max} T = 2898\ \mu m \cdot K$$

```
_maxT=2898\ μ m· K
```

قانون إزاحة فين

$$E_b = \sigma T^4$$

```
E_b=σ T^4
```

ستيفان–بولتزمان

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

```
E=σ T^4
```

سطح حقيقي

$$T_e = \left(\frac{\bar{S}(1-a)}{\sigma} \right)^{1/4}$$

```
T_e=(( S(1-a))/(σ))^1/4
```

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 تعطي NASA للشمس نحو 5800 K. أوجد طولها الموجي للذروة.

1. 2898/5800.

الإجابة: 0.500 µm، ضوء مرئي.

مثال 8.2 تمتص الأرض نحو 240 W/m² (NASA). أوجد درجة حرارتها الفعالة.

1. T = (240/5.670374419 × 10⁻⁸)^¼.

الإجابة: 255.1 K، نحو 18− °C (تقرّبها NASA إلى نحو 20− °C).

مثال 8.3 انبعاث الجسم الأسود من سطح عند 288 K؟

1. σ × 288⁴.

الإجابة: 390 W/m².

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. الطول الموجي للذروة عند 288 K؟

   10.06 µm، أشعة تحت حمراء حرارية.

2. نسبة الانبعاث عند مضاعفة T؟

   2⁴ = 16.

3. الذروة لفتيل مصباح عند 3000 K؟

   0.966 µm، أشعة تحت حمراء قريبة.

4. سطح رمادي ε = 0.8: ما α؟

   0.8.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الساخن يعني المرئي.

في الحقيقة: الأجسام بدرجة حرارة الغرفة تتوهج بالأشعة تحت الحمراء.

خرافة: استخدم σT^4 في °C.

في الحقيقة: استخدم الكلفن.

خرافة: اللامع يعني البارد.

في الحقيقة: ε المنخفضة تعني أنه يبعث ويمتص قليلًا.

بطاقات تعليمية

الجسم الأسود

ماصّ وباعث مثالي.

قانون فين

$\lambda_{max}\,T = 2898\ \mu m\cdot K$.

الانبعاثية

الانبعاث نسبة إلى الجسم الأسود.

قانون كيرشوف

$\alpha = \varepsilon$ للأسطح الرمادية.

قانون بلانك

الانبعاث الطيفي للجسم الأسود.

درجة الحرارة الفعالة

T المكافئة للجسم الأسود.

اختبار ذاتي

1. ذروة الشمس...

0.500 µm

10 µm

5 µm

0.05 µm

0.500 µm. 2898/5800.

2. درجة الحرارة الفعالة للأرض...

255 K

288 K

300 K

5800 K

.255 K. (240/σ)^¼

3. ضاعف T، والانبعاث...

×16

2×

4×

8×

.×16. T^4

4. جسم أسود عند 288 K...

390 W/m²

240 W/m²

1360 W/m²

39 W/m²

.390 W/m². σT^4

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يقول Earth Observatory التابع لـ NASA إن سطح الشمس نحو 5800 K، وإن درجة حرارة الإشعاع الفعالة للأرض نحو −20 °C، وإن مضاعفة درجة حرارة جسم تضرب طاقته المشعة في 16.

وتذكر NASA أيضًا أن بخار الماء يسمح بإفلات معظم الأشعة تحت الحمراء بين 8 و14 µm، بينما يمتص ثاني أكسيد الكربون عند أطوال موجية تتجاوز نحو 12–13 µm، قرب حافة تلك النافذة.

على Saving Planets: رصد الأرض · الحلول

المصادر: NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصل 10.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): محاكاة مجانية.

أنهيت هذه الوحدة

التبادل الإشعاعي والدروع

معاملات الرؤية، والتبادلية، وشبكات الأسطح الرمادية، والصفائح المتوازية، ودروع الإشعاع، والحماية الحرارية في الفضاء.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدم تبادلية معاملات الرؤية.
- احسب التبادل الصافي بين صفيحتين متوازيتين.
- بيّن كيف يقلل الدرع تدفق الحرارة.
- قدّر الإشعاع من درع ساخن.

المفاهيم الأساسية

- معامل الرؤية F_{12} هو جزء الإشعاع المغادر للسطح 1 الذي يصل إلى السطح 2.
- التبادلية: $A_1F_{12} = A_2F_{21}$؛ والجمع: معاملات الرؤية من سطح ما مجموعها 1.
- تتبادل الأسطح الرمادية الحرارة عبر مقاومات سطحية $(1-\varepsilon)/\varepsilon A$ ومقاومات فضائية $1/A_1F_{12}$.
- درع رقيق منخفض ε بين صفيحتين يضيف مقاومات ويقلل التبادل بشدة؛ والعزل متعدد الطبقات يكدّس كثيرًا منها.
- الدرع الحراري المواجه للشمس يسخن ويعيد الإشعاع ويحمي ما يقع في ظله.

المعادلات الأساسية

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$$

```
A_1F_12=A_2F_21
```

التبادلية

$$q'' = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

```
q^=(σ(T_1^4-T_2^4))/(1/_1+1/_2-1)
```

ألواح متوازية

$$R_{surf} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A}$$

```
R_surf=(1-)/( A)
```

المقاومة السطحية

$$R_{space} = \frac{1}{A_1 F_{12}}$$

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 صفيحتان متوازيتان كبيرتان عند 400 K و300 K، كلتاهما ε = 0.8. الفيض الصافي؟

1. المقام: 1.5 = 1 − 1.25 + 1.25.
2. q" = σ(400⁴ − 300⁴)/1.5 =.

الإجابة: 662 W/m².

مثال 9.2 أدخل درعًا ε = 0.05 على الوجهين.

1. المقاومة: 40.5 = (1 − 1.25 + 20) × 2.
2. q" = σ × 1.75 × 10¹⁰/40.5 =.

الإجابة: 24.5 W/m²، أقل بـ 27 مرة.

مثال 9.3 كرة صغيرة (A_1 = 1 m²) داخل غلاف مساحته 4 m². أوجد F_{21}.

1. F_{12} = 1.
2. $F_{21} = A_1F_{12}/A_2$.

الإجابة: 0.25.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. فيض الجسم الأسود عند حد درع Parker البالغ 1377 °C؟

   σ × 1650.15⁴ = 4.20 × 10⁵ W/m².

2. لماذا يعمل درع واحد ε = 0.05 بهذه الجودة؟

   مقاومتاه السطحيتان تضيفان نحو 39.

3. مجموع معاملات الرؤية من سطح في حيز مغلق؟

   1.

4. ما MLI؟

دروع رقيقة كثيرة منخفضة ε مكدسة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: معاملات الرؤية متماثلة.
في الحقيقة: فقط $A_1F_{12} = A_2F_{21}$.

خرافة: يجب أن تكون الدروع سميكة.
في الحقيقة: المهم انخفاض ε لا السماكة.

خرافة: الأسطح السوداء دروع جيدة.
في الحقيقة: الدروع تحتاج ε منخفضة.

بطاقات تعليمية

معامل الرؤية

جزء الإشعاع المعترَض.

التبادلية

$A_1F_{12} = A_2F_{21}$.

الإشعاعية

كل الإشعاع المغادر لسطح.

درع إشعاعي

حاجز منخفض ε.

MLI

العزل متعدد الطبقات.

سطح رمادي

ε مستقلة عن الطول الموجي.

اختبار ذاتي

1. فيض الصفيحتين...

662 W/m²

993 W/m²

24.5 W/m²

1000 W/m²

.662 W/m². σΔT⁴/1.5

2. مع الدرع...

24.5 W/m²

331 W/m²

66 W/m²

2.45 W/m²

.24.5 W/m². ÷ 40.5

3. F_{21}...

0.25

1

4

0.5

0.25. التبادلية.

4. الدروع الجيدة لها...

ε منخفضة

ε عالية

k عالية

h عالية

ε منخفضة. بواعث ضعيفة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول NASA إن Parker Solar Probe، التي أُطلقت في 12 أغسطس 2018، محمية بدرع من مركب الكربون بسماكة 4.5 بوصة (11.43 cm) يتحمل قرابة 2500 °F (1377 °C) حين تمر المركبة على بعد نحو 3.9 مليون ميل (6.2 مليون km) من الشمس.

في 2021 أصبحت Parker أول مركبة فضائية تعبر هالة الشمس؛ ويبقي درعها الأجهزة خلفه في الظل، وهي فكرة درع الإشعاع نفسها في هذه الوحدة.

على Saving Planets: تصميم المركبات الفضائية · رصد الأرض

المصادر: NASA Science: Parker Solar Probe (https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/)

مصادر تعلّم مجانية

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني، الفصل 10.
- NASA Science: Parker Solar Probe (https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/): صفحة المهمة لدى ناسا.

أنهيت هذه الوحدة

المضخات الحرارية والمباني وموازنة طاقة الأرض

COP للمضخات الحرارية، وحدود كارنو، وفقد الحرارة لمبنى كامل، واختلال الطاقة الكوكبي المقاس من الفضاء.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب COP لمضخة حرارية وحد كارنو لها.
- حدّد الكهرباء اللازمة لحمل تدفئة.
- حوّل اختلال الفيض إلى قدرة كلية.
- اربط الأنماط الثلاثة في نظام واحد.

المفاهيم الأساسية

- تنقل المضخة الحرارية الحرارة من البارد إلى الساخن باستخدام شغل؛ وCOP التدفئة هو الحرارة المسلَّمة مقسومة على الشغل.
- COP كارنو، T_h/(T_h − T_c)، حد أعلى ينخفض مع انخفاض درجة الحرارة الخارجية.
- فقد الحرارة في المبنى يساوي UA مضروبًا في فرق الداخل والخارج؛ والعزل يخفض UA قبل شراء المعدات.
- اختلال طاقة الأرض فرق صغير بين تدفقين كبيرين، تقيسه أقمار صناعية مثل أجهزة CERES التابعة لـ NASA.
- كل نظام في هذا المقرر يجمع التوصيل والحمل والإشعاع في شبكة مقاومات.

المعادلات الأساسية

$$COP_h = \frac{Q_h}{W}$$

```
COP_h=(Q_h)/(W)
```

COP التدفئة

$$COP_{Carnot} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

```
COP_Carnot=(T_h)/(T_h-T_c)
```

حد كارنو

$$Q = UA\Delta T$$

```
Q=UAΔ T
```

فقد الحرارة في المبنى

$$P = \Delta F \cdot A_E$$

```
P=Δ F· A_E
```

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 يقول ENERGY STAR إن المضخة الحرارية يمكن أن تقدم حتى ثلاثة أضعاف الحرارة مقارنة بالكهرباء التي تستهلكها. الكهرباء اللازمة لـ 9 kW من الحرارة؟

1. $W = 9/3$.

الإجابة: 3 kW.

مثال 10.2 COP كارنو للتدفئة مع تسليم عند 35 °C (308 K) وخارج عند 0 °C (273 K)؟

1. $308/(308 - 273)$.

الإجابة: 8.8؛ والأجهزة الحقيقية تبلغ نحو ثلث ذلك.

مثال 10.3 تقول NASA إن الاختلال يزيد قليلًا على 0.8 W/m². مع مساحة الأرض 5.1×10^{14} m² (قيمة مرجعية)، ما القدرة الكلية؟

1. $0.8 \times 5.1 \times 10^{14}$.

الإجابة: نحو 4.1×10^{14} W.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. نصف فاتورة طاقة سنوية قدرها $1900؟

   نحو $950 للتدفئة والتبريد.

2. COP كارنو عند −10 °C (263 K) في الخارج وتسليم عند 308 K؟

   6.84.

3. لماذا العزل قبل شراء مضخة حرارية؟

   UA أقل يعني جهازًا أصغر وأرخص.

4. ماذا يقيس CERES؟

   الطاقة الإشعاعية للأرض من الفضاء.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: معامل COP أكبر من 1 يخالف حفظ الطاقة.
في الحقيقة: الحرارة تُنقل ولا تُخلق.

خرافة: اخفض المضخات الحرارية كثيرًا ليلًا.
في الحقيقة: ينصح ENERGY STAR بضبط ثابت.

خرافة: 0.8 W/m^2 مهملة.
في الحقيقة: على مستوى الأرض تبلغ نحو 4×10^{14} W.

بطاقات تعليمية

COP

الحرارة المسلَّمة لكل وحدة شغل.

COP كارنو

الحد المثالي.

UA

الموصلية الكلية.

اختلال الطاقة

الممتص ناقص المنبعث.

CERES

أجهزة NASA لميزانية الإشعاع.

المضخة الحرارية

تنقل الحرارة بالشغل.

اختبار ذاتي

1. الكهرباء لـ 9 kW عند 3 COP...

3 kW

27 kW

9 kW

1 kW

9/3 kW. 3.

2. COP كارنو...

8.8

3

1.13

35

.8.8. 308/35

3. قدرة الاختلال...

$\approx 4.1 \times 10^{14}$ W

$\approx 4 \times 10^{9}$ W

≈ 0.8 W

$\approx 10^{20}$ W

$5.1 \times 10^{14} \times 0.8$ W. $\approx 4.1 \times 10^{14}$.

4. اخفض UA عبر...

العزل

رفع COP

إضافة زعانف

الطلاء بالأسود

العزل. المقاومة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يقول ENERGY STAR إن المضخة الحرارية الهوائية يمكن أن تقدم حتى ثلاثة أضعاف الطاقة الحرارية مقارنة بالطاقة الكهربائية التي تستهلكها، لأنها تنقل الحرارة بدل توليدها.

يقول Earth Observatory التابع لـ NASA إن الأرض تمتص أكثر قليلًا من 0.8 W/m² زيادة على ما تبعثه؛ وتقيس أجهزة CERES التابعة لـ NASA ميزانية الإشعاع من المدار.

على Saving Planets: الحلول · رصد الأرض

المصادر: NASA · ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps) · Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance) · NASA Langley: CERES (Clouds and the Earth’s Radiant Energy System) (https://ceres.larc.nasa.gov/)

مصادر تعلّم مجانية

- ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps): دليل ENERGY STAR.
- NASA Langley: CERES (Clouds and the Earth’s Radiant Energy System) (https://ceres.larc.nasa.gov/): NASA CERES.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

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

1. أنماط انتقال الحرارة وموازنات الطاقة
   4 مسائل
2. التوصيل المستقر والمقاومة الحرارية
   4 مسائل
3. الأسطوانات والكرات والزعانف
   4 مسائل
4. التوصيل العابر
   4 مسائل
5. الحمل القسري الخارجي
   4 مسائل
6. الجريان الداخلي والمبادلات الحرارية
   4 مسائل
7. الحمل الطبيعي والغليان
   4 مسائل
8. أساسيات الإشعاع
   4 مسائل
9. التبادل الإشعاعي والدروع
   4 مسائل
10. المضخات الحرارية والمباني وموازنة طاقة الأرض
    4 مسائل

المختبر (Heat transfer lab)

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

يُجرى كل مختبر في محاكاة مجانية أو جدول بيانات، فلا توجد مخاطر حروق أو كهرباء. لا تسخّن ولا تغلِ ولا تشعل أي شيء لهذا المقرر. خذ فترات راحة 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: تدفق الحرارة وحاسبة عزل الجدران

الأسبوع 2

الهدف: راقب تدفق الحرارة بين الأجسام في PhET Energy Forms and Changes، ثم احسب الفيض الحراري عبر جدار لعدة سماكات عزل.

$$q'' = \Delta T / R''$$

q^=Δ T/R^

جدار على التوالي

الإجراء

1. في PhET Energy Forms and Changes، سخّن كتلة وراقب تدفق الطاقة إلى جارتها وإلى الهواء.
2. في جدول بيانات، أدخل جدار الوحدة 2 بلا عزل: "R = 0.3079 m²·K/W.
3. أضف طبقات عزل بسماكة 0.05 و0.1 و0.2 m (k = 0.04) واحسب "q عند ΔT = 20 K.
4. ارسم "q مقابل السماكة ولاحظ تناقص العائد.

جدول البيانات

العزل (m)	"R (m²·K/W)	"q (W/m²)
0	0.3079	64.96
0.05	1.558	12.84
0.1	2.808	7.12
0.2	5.308	3.77

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

1. "R = 0.3079 + 0.05/0.04 = 1.558 (0.05).
2. "q = 20/1.558 = 12.84 W/m².

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

الصلة بالكوكب: ENERGY STAR: نحو نصف فاتورة الطاقة المنزلية النموذجية البالغة $1900 يذهب إلى التدفئة والتبريد.
ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

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

المختبر B: مستكشف كفاءة الزعانف

الأسبوع 4

الهدف: احسب كفاءة زعنفة دبوسية لعدة أطوال وانظر أين تتوقف إطالة الزعنفة عن الجدوى.

$$\eta_f = \tanh(mL)/(mL)$$

_f=mL/mL

كفاءة الزعنفة

الإجراء

1. أدخل زعنفة الوحدة k = 200 :3، D = 5 mm، h = 50، إذن m = 14.14 m⁻¹.
2. احسب η عند L = 10 و20 و40 mm.
3. احسب حرارة الزعنفة لفائض 50 K عند القاعدة.
4. غيّر h إلى 200 وكرر.

جدول البيانات

L (mm)	mL	η
10	0.1414	0.993
20	0.2828	0.974
40	0.5657	0.905

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

1. m = √(4 × 50/(200 × 0.005)) = 14.14 m⁻¹.
2. η(40 mm) = tanh(0.5657)/0.5657 = 0.905.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/)

الصلة بالكوكب: الزعانف والمبادلات الكفؤة تتيح للمضخات الحرارية نقل حرارة أكبر لكل وحدة كهرباء (ENERGY STAR).
ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

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

المختبر C: منحنى التبريد المجمّع

الأسبوع 5

الهدف: نمذج في جدول بيانات تبريد كرة الألمنيوم من الوحدة 4 وقارن منحنى دقيقًا بحل خطوة بخطوة (أويلر).

$$T = T_\infty + (T_i - T_\infty)e^{-t/\tau}$$

T=T_∞+(T_i-T_∞)e^-t/τ

الاستجابة المجمّعة

الإجراء

1. أدخل T_i = 300 °C، T∞ = 20 °C، τ = 81 s.
2. احسب T عند كل τ حتى 3τ.
3. أضف عمود أويلر بخطوة 5 s وقارن.
4. ضاعف h وكرر.

جدول البيانات

t (s)	T (°C)
0	300
81	123.0
162	57.9
243	33.9

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

1. T(81) = 20 + 280e⁻¹ = 123.0 °C.
2. T(243) = 20 + 280e⁻³ = 33.9 °C.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

الصلة بالكوكب: NASA: متوسط حرارة سطح الأرض نحو 15 °C، أي أدفأ بأكثر من 30 °C مما لو لم يكن هناك غلاف جوي. NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

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

المختبر D: حاسبة الحمل على صفيحة مستوية

الأسبوع 7

الهدف: احسب Re ومتوسط h للهواء فوق صفيحة 0.5 m عند عدة سرعات.

$$\bar{h} = 0.664 \frac{k}{L} Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

```
h=0.664k/LRe_L^1/2Pr^1/3
```

صفيحة طباقية

الإجراء

1. أدخل خصائص الهواء: $\nu = 1.5 \times 10^{-5}$، $k = 0.026$، $Pr = 0.71$.
2. احسب Re وh عند 1 و5 و10 m/s.
3. تحقق من أن كل Re أقل من 5×10^5.
4. ارسم h مقابل V٧.

جدول البيانات

V (m/s)	Re	h (W/(m²·K))
1	33,333	5.62
5	166,667	12.58
10	333,333	17.78

قيم نموذجية محسوبة.

مثال حسابي

1. $Re(1) = 1 \times 0.5 / 1.5 \times 10^{-5} = 33{,}333$.
2. $h(10) = 0.664 \times 577.4 \times 0.892 \times 0.052 = 17.78$.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/)

الصلة بالكوكب: NASA: ينقل الحمل نحو 5% من الطاقة الشمسية الواردة من السطح. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

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

المختبر E: أطياف الجسم الأسود

الأسبوع 11

الهدف: استخدم PhET Blackbody Spectrum لرؤية قانون فين، ثم تحقق من الذرى في جدول بيانات.

$$\lambda_{max} = 2898/T$$

_max=2898/T

قانون فين

الإجراء

1. في PhET Blackbody Spectrum، اختر الشمس ومصباحًا والأرض.
2. اقرأ الطول الموجي للذروة من الرسم البياني.
3. احسب 2898/T عند 288 و3000 و5800 K.
4. احسب σT⁴ لكل منها.

جدول البيانات

T (K)	λ_max (μm)	σT⁴ (W/m²)
288	10.06	390
3000	0.966	4.59×10^{6}
5800	0.500	6.42×10^{7}

قيم محسوبة.

مثال حسابي

1. 2898/288 = 10.06 μm.
2. $\sigma \times 5800^4 = 6.42 \times 10^7$ W/m² .σ

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يعمل في متصفح الويب.

PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum)

الصلة بالكوكب: NASA: الشمس نحو 5800 K. NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر F: الاحتباس الحراري وميزان الطاقة

الأسبوع 14

الهدف: استكشف PhET Greenhouse Effect، ثم احسب درجة الحرارة الفعالة للأرض لعدة قيم بياض.

$$T_e = \left(\frac{S(1-a)}{4\sigma}\right)^{1/4}$$

`T_e=((S(1-a))/(4σ))^1/4`

درجة الحرارة الفعالة

الإجراء

1. في PhET Greenhouse Effect، أضف السحب وغازات الدفيئة وأزلها وراقب درجة الحرارة.
2. في جدول بيانات، استخدم S = 1360 W/m² (NASA).
3. احسب T_e لبياض 0.25 و0.29 و0.35.
4. اشرح لماذا T_e أقل من متوسط السطح البالغ 15 °C وفق NASA.

جدول البيانات

البياض	T_e (K)
0.25	259.0
0.29	255.4
0.35	249.9

قيم محسوبة.

مثال حسابي

1. (1360 × 0.71/(4σ))^¼ = 255.4 K.
2. 255.4 − 273.15 = −17.7 °C.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يعمل في متصفح الويب.

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

الصلة بالكوكب: NASA: يُعكس نحو 29% من ضوء الشمس وتمتص الأرض نحو 240 W/m². NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

☐ **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. الحمل من 3 m² عند h = 15 W/(m²·K)، ΔT = 20 K؟

   1. 20 × 3 × 15.

   الإجابة: 900 W.

2. الفيض الحراري عبر 0.15 m من العزل (k = 0.04) إضافة إلى 0.3079 m²·K/W من طبقات أخرى عند ΔT = 20 K؟

   1. R" = 0.3079 + 3.75 = 4.058 =.
   2. 20/4.058.

   الإجابة: 4.93 W/m².

3. نصف القطر الحرج عند k = 0.1 وh = 10؟

   1. k/h.

   الإجابة: 10 mm.

4. τ لكرة ألمنيوم قطرها 20 mm، h = 50؟

   1. (0.02/6)/50 × 900 × 2700.

   الإجابة: 162 s.

5. Re لهواء بسرعة 2 m/s فوق 0.5 m؟

   1. 10⁻⁵ × 0.5/1.5 × 2.

   الإجابة: 66,667.

مجموعة التدريب النهائية (الوحدات 10–1)

1. LMTD عند ΔT₁ = 60 K وΔT₂ = 20 K؟

   1. 40/ln 3.

الإجابة: 36.4 K.

2. ε عند NTU = 1، C_r = 0؟

1. $1 - e^{-1}$.

الإجابة: 0.632.

3. Ra لصفيحة الوحدة 7 عند L = 0.6 m؟

1. $8 \times 10^{7} \times 7.52$.

الإجابة: 6.02×10^{8}.

4. الطول الموجي للذروة عند 1000 K؟

1. 2898/1000.

الإجابة: 2.90 µm.

5. صفيحتان متوازيتان 500 K و300 K، ε = 0.9 لكلتيهما؟

1. $\sigma(500^4 - 300^4)/(2/0.9 - 1)$.

الإجابة: 2524 W/m².

6. COP كارنو للتدفئة، تسليم عند 318 K، و268 K في الخارج؟

1. 318/50.

الإجابة: 6.36.

ورقة الصيغ

$$q = kA\Delta T/L,\ q = hA\Delta T,\ q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

$$R = L/(kA),\ R = 1/(hA),\ q = \Delta T/\sum R$$

$$R_{cyl} = \ln(r_2/r_1)/(2\pi kL),\ r_{cr} = k/h$$

$$m = \sqrt{hP/(kA_c)},\ \eta_f = \tanh(mL)/(mL)$$

$$Bi = hL_c/k,\ \tau = \rho cV/(hA),\ \theta/\theta_i = e^{-t/\tau}$$

$$Re = VL/\nu,\ Nu = hL/k,\ Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4},\ \Delta T_{lm} = (\Delta T_1 - \Delta T_2)/\ln($$

$$Ra = g\beta\Delta TL^3/(\nu\alpha),\ Nu = 0.59Ra^{1/4}$$

$$COP = Q_h/W,\ COP_C = T_h/(T_h - T_c),\ P = \Delta F \qquad \lambda_{max} T = 2898,\ E_b = \sigma T^4,\ A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$$

الثوابت

الثابت	القيمة
ثابت ستيفان-بولتزمان	σ = 5.670374419 × 10⁻⁸ W/(m²·K⁴)
ثابت فين (قيمة مرجعية)	2898 µm·K
الجاذبية المعيارية	g = 9.80665 m/s²
الهواء قرب 300 K (قيم مرجعية)	k = 0.026 W/(m·K), ν = 1.5 × 10⁻⁵ m²/s, Pr = 0.71
الألمنيوم (قيم مرجعية)	k = 237 W/(m·K), ρ = 2700 kg/m³, c = 900 J/(kg·K)
مساحة سطح الأرض (قيمة الكتب المدرسية)	5.1 × 10¹⁴ m²

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

نصوص ومحاكاة مجانية

استخدم هذه النصوص والمحاضرات والمحاكاة المجانية إلى جانب المقرر.

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): كتاب مجاني كامل في انتقال الحرارة.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): محاضرات ومسائل مجانية من MIT.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): شرح مجاني من NASA.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): تدفق الحرارة تفاعليًا.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): الإشعاع الحراري.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): ميزان الإشعاع.

مسرد المصطلحات

البياض
جزء ضوء الشمس المنعكس.

عدد بيوت
المقاومة الحرارية الداخلية على الخارجية.

الجسم الأسود
ماصّ وباعث مثالي.

الطبقة الحدية

منطقة جريان رقيقة قرب الجدار.

COP
الحرارة المنقولة لكل وحدة شغل.

نصف القطر الحرج
نصف القطر الذي يبلغ عنده فقد الحرارة أقصاه في أسطوانة معزولة.

الفعالية
الحرارة الفعلية على الحرارة القصوى للمبادل.

الانبعاثية
الانبعاث نسبة إلى جسم أسود.

اختلال الطاقة
الطاقة الكوكبية الممتصة ناقص المنبعثة.

كفاءة الزعنفة
الحرارة الفعلية على الحرارة المثالية للزعنفة.

قانون فوريه
قانون معدل التوصيل.

المبادل الحراري
جهاز ينقل الحرارة بين الموائع.

LMTD
فرق درجة الحرارة اللوغاريتمي المتوسط.

السعة المجمّعة
نموذج عابر بدرجة حرارة متجانسة.

عدد نوسلت
معامل الحمل اللابعدي.

عدد برانتل
انتشارية الزخم على الانتشارية الحرارية.

درع إشعاعي
حاجز منخفض الانبعاثية.

عدد رايلي
شدة جريان الطفو.

المقاومة الحرارية
فرق درجة الحرارة لكل تدفق حراري.

معامل الرؤية
جزء الإشعاع الذي يعترضه سطح ما.

معايير التقييم الذاتي

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

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يرسم النظام وشبكة المقاومات، ويتحقق من الأعداد اللابعدية قبل اختيار العلاقة، ويستخدم الكلفن للإشعاع، ويشرح النتائج بكلمات بسيطة.
3 · متمكن	يحل مجموعات التمارين والاختبارات بأخطاء طفيفة ويتحقق من الوحدات.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يخلط بين k للجسم الصلب وk للمائع، أو يستخدم °C في σT^4.
1 · مبتدئ	يعوض الأرقام في الصيغ دون رسم أو ميزان طاقة؛ ويحتاج 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

- تصميم المركبات الفضائية AERO 430
- إلكترونيات الطيران وهندسة النظم AERO 450
- الدفع AERO 410
- كل الدورات