עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 4, סתיו

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 10 יחידות ו-6 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו תואם קורס סמסטריאלי לשנה האחרונה במעבר חום למהנדסים. הוא בנוי לפי הנושאים והעומק של ספר הלימוד המקוון החינמי A Heat Transfer Textbook מאת Lienhard ו־Lienhard ושל MIT 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (בחינם ב־MIT OpenCourseWare), שאליהם אנו מקשרים כשהם עוזרים. אף אחד מהמחברים, המוסדות או הסוכנויות האלה אינו תומך בדף זה.

מה שאנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית עם מקור ציבורי מצוטט (מאזן האנרגיה של כדור הארץ של נאס"א, Parker Solar Probe ומשאבות חום ENERGY STAR), כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני פרסומו, ולכל מעבדה יש סימולציה חינמית או גיליון אלקטרוני.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

האקלים של כדור הארץ הוא בעיית מעבר חום: אור שמש נכנס, אינפרה־אדום תרמי יוצא, והסעה ואידוי מעבירים חום ביניהם. אותה פיזיקה קובעת כמה אנרגיה מבזבזים המבנים, המנועים והאלקטרוניקה שלנו.

בידוד, משאבות חום ומחליפי חום יעילים הם מהפתרונות האקלימיים הזולים ביותר. כל יחידה מסתיימת בסעיף קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכי דוגמה או ערכי ספר לימוד.

למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 10 יחידות ו-6 מעבדות (AERO 440).
- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.

- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

לפני שמתחילים

ידע מוקדם

- תרמודינמיקה: מאזני אנרגיה והחוק הראשון והשני.
- מכניקת זורמים: שכבות גבול, מספר ריינולדס וזרימה בצנרת.
- משוואות דיפרנציאליות: מד"ר מסדר ראשון והפרדת משתנים.
- חשבון III: גרדיאנטים ואינטגרלים על שטחים ונפחים.

איך ללמוד

- שרטטו את המערכת ואת כל חץ זרימת חום לפני כתיבת משוואה.
- השתמשו בקלווין לקרינה ובהפרשי טמפרטורה להולכה ולהסעה.
- הפכו כל בעיה לרשת התנגדויות תרמיות כשאפשר.
- בדקו את המספרים חסרי הממד (Ra ,Nu ,Pr ,Re ,Bi) כדי לבחור את הקורלציה הנכונה.
- השוו תשובות לניסיון היומיומי: בית חם, ספל שמתקרר, מחבת לוהטת.
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שאתם פותחים את התשובה, וחזרו על הבחנים כעבור כמה ימים.

מה צריך

- מחשב או טאבלט לסימולציות PhET החינמיות Energy Forms and Changes, Blackbody Spectrum ו־Greenhouse Effect.
- תוכנת גיליון אלקטרוני (כל תוכנה חינמית מתאימה), או Python.
- ספר הלימוד המקוון החינמי A Heat Transfer Textbook בדפדפן אינטרנט.
- מחשבון.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

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

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	אופני מעבר חום ומאזני אנרגיה	אופנים ומאזני אנרגיה	Lienhard AHTT
2	הולכה מתמידה והתנגדות תרמית	התנגדות תרמית; מעבדה A	Lienhard AHTT
3	גלילים, כדורים וצלעות	גלילים ורדיוס קריטי	Lienhard AHTT

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
4	גלילים, כדורים וצלעות	צלעות; מעבדה B	MIT 2.51
5	הולכה מעברית	הולכה מעברית; מעבדה C	Lienhard AHTT
6	הסעה מאולצת חיצונית	שכבות גבול	MIT 2.51
7	הסעה מאולצת חיצונית	קורלציות ללוח שטוח; מעבדה D; תרגול לבוחן אמצע	Lienhard AHTT
8	זרימה פנימית ומחליפי חום	זרימה פנימית	MIT 2.51
9	זרימה פנימית ומחליפי חום	מחליפי חום	Lienhard AHTT
10	הסעה טבעית ורתיחה	הסעה טבעית ורתיחה	Lienhard AHTT
11	יסודות הקרינה	יסודות הקרינה; מעבדה E	NASA Earth Observatory
12	חילופי קרינה ומגנים	מקדמי צורה	Lienhard AHTT
13	חילופי קרינה ומגנים	מגנים ו־Parker Solar Probe	NASA Parker Solar Probe
14	משאבות חום, מבנים ומאזן האנרגיה של כדור הארץ	משאבות חום ומאזן כדור הארץ; מעבדה F	ENERGY STAR
15	משאבות חום, מבנים ומאזן האנרגיה של כדור הארץ	חזרה; תרגול למבחן הסופי	MIT 2.51

ההתקדמות שלכם

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

יחידות

אופני מעבר חום ומאזני אנרגיה

הולכה, הסעה וקרינה, משוואות הקצב שלהן, ומאזני אנרגיה למשטח ולנפח בקרה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- ציינו את שלושת האופנים ואת חוקי הקצב שלהם.
- חשבו קצבי הולכה, הסעה וקרינה.
- כתבו מאזן אנרגיה למשטח.
- קראו את מאזן האנרגיה של כדור הארץ כמאזן חום.

מושגי מפתח

- מעבר חום הוא אנרגיה בתנועה בגלל הפרש טמפרטורה; התרמודינמיקה אומרת כמה, ומעבר חום אומר באיזה קצב.
- הולכה מעבירה אנרגיה דרך מוצק או זורם נייח במגע מולקולרי (חוק פורייה).
- הסעה מעבירה אנרגיה בין משטח לזורם בתנועה (חוק הקירור של ניוטון, עם מקדם מעבר חום h).
- קרינה מעבירה אנרגיה בגלים אלקטרומגנטיים, אינה צריכה תווך וגדלה עם T⁴ בקלווין (חוק סטפן–בולצמן).
- משטח אינו אוגר אנרגיה, ולכן מה שמגיע באופן אחד חייב לעזוב באחרים.

משוואות מפתח

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

`q=kA(Δ T)/(L)`

חוק פורייה, קיר מישורי

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

`q=hA(T_s-T_∞)`

חוק הקירור של ניוטון

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

`q=σ A(T_s^4-T_sur^4)`

קרינה נטו לסביבה גדולה

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

`E_in- E_out+ E_g= E_st`

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 קיר בטון של 0.2 m ($k = 1.4\ \text{W/(m·K)}$) בשטח 10 m² עם הפרש של 15 K. מצאו את q.

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

תשובה: 1050 W.

דוגמה 1.2 לוח עם $\varepsilon = 0.9$ ב־400 K נמצא בסביבה של 300 K. קרינה נטו למ״ר?

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

תשובה: 893 W/m².

דוגמה 1.3 נאס״א מציינת שכ־29% מאור השמש הנכנס מוחזר ושהממוצע העולמי הוא כ־340 W/m². כמה נבלע?

1. מוחזר: $340 \times 0.29 = 98.6\ \text{W/m}^2$.
2. נבלע: $340 - 98.6$.

תשובה: 241.4 W/m², בהתאמה לכ־240 W/m² של נאס״א.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. חזרו על דוגמת הקיר עם $k = 0.04\ \text{W/(m·K)}$.

   30 W.

2. הסעה עם $h = 25\ \text{W/(m²·K)}$, $A = 2\ \text{m}^2$, $\Delta T = 40\ \text{K}$?

   2000 W.

3. למה קרינה חייבת להשתמש בקלווין?

   T^4 תלוי בטמפרטורה מוחלטת.

4. למה 1360/4 הוא ממוצע אור השמש העולמי?

   שטח כדור הוא פי 4 משטח דיסקת הצל שלו: $1360/4 = 340\ \text{W/m}^2$.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: חום וטמפרטורה הם אותו דבר.

בפועל: טמפרטורה היא מצב; חום הוא אנרגיה בתנועה.

מיתוס: קרינה צריכה אוויר.

בפועל: היא עוברת דרך ריק.

מיתוס: h הוא תכונת חומר.

בפועל: הוא תלוי בזרימה ובגאומטריה.

כרטיסיות

הולכה

מעבר אנרגיה מולקולרי דרך חומר.

הסעה

מעבר ממשטח לזורם בתנועה.

קרינה

חילופי אנרגיה אלקטרומגנטית.

h

מקדם הסעה, W/(m²·K).

k

מוליכות תרמית, W/(m·K).

מאזן משטח

נכנס = יוצא במשטח.

בוחן לבדיקה עצמית

1. q של קיר הבטון…

1050 W

105 W

4200 W

210 W

15/0.2 × 10 × 1.4 = 1050 W.

2. קרינה גדלה לפי…

T^4 (K)

T (°C)

T^2

T√

T^4 (K). סטפן–בולצמן.

3. כדור הארץ בולע כ…

240 W/m²

1360 W/m²

29 W/m²

0.8 W/m²

240 W/m². NASA.

4. האופן שאינו צריך תווך…

קרינה

הולכה

הסעה

רתיחה

קרינה. גלים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA Earth Observatory מציין שהקרינה הסולארית הכוללת היא כ־1360 W/m², בממוצע כ־340 W/m² על פני הגלובוס; כ־29% מוחזרים, 23% נבלעים באטמוספרה ו־48% בפני השטח, כך שכדור הארץ בולע כ־240 W/m².

לטמפרטורה יציבה כדור הארץ חייב להקרין חזרה לחלל אותם 240 W/m² כאינפרה־אדום תרמי, מאזן החום שהקורס חוזר אליו ביחידה 10.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · תרמודינמיקה

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרק 1.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): הסבר של נאס"א.

סיימתי את היחידה הזו

הולכה מתמידה והתנגדות תרמית

משוואת החום, הולכה מתמידה חד־ממדית, רשתות התנגדות תרמית, קירות מרוכבים ובידוד.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- נסחו את משוואת החום ואת צורתה המתמידה ב־1D.
- בנו רשתות התנגדות בטור ובמקביל.
- חשבו איבוד חום דרך קיר מרוכב.
- כמתו את החיסכון מבידוד.

מושגי מפתח

- משוואת החום מאזנת הולכה, ייצור ואגירה; במצב מתמיד ללא ייצור לקיר מישורי יש פרופיל טמפרטורה ליניארי.
- כל שכבה פועלת כנגד חשמלי: R = L/(kA) להולכה, 1/(hA) להסעה.
- התנגדויות בטור מתחברות; זרימת החום שווה ל־ΔT הכולל חלקי ההתנגדות הכוללת, כמו זרם.
- ההתנגדות הגדולה ביותר שולטת בזרימת החום, ולכן בידוד (k נמוך) חשוב יותר מכול.
- התנגדות מגע בין שכבות עלולה להוסיף התנגדות מפתיעה באלקטרוניקה ובחיבורים.

משוואות מפתח

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

```
·(k T)+ q=ρ c( T)/( t)
```

משוואת החום

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

```
R_cond=L/kA
```

התנגדות הולכה

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

```
R_conv=1/hA
```

התנגדות הסעה

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

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 לקיר יש אוויר פנימי ($h = 8$), 0.1 m בידוד ($k = 0.04$), 0.1 m לבנים ($k = 0.7$) ואוויר חיצוני ($h = 25$), כולם ערכי דוגמה. מצאו את ההתנגדות למ״ר.

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

תשובה: 2.808 m²·K/W.

דוגמה 2.2 עם 20 K בין פנים לחוץ, מצאו את שטף החום ואת האיבוד דרך 100 m².

1. $q'' = 20/2.808 = 7.12$ W/m² =.
2. $q = 100 \times 7.12$.

תשובה: 712 W.

דוגמה 2.3 הסירו את הבידוד. בכמה גדל האיבוד?

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

תשובה: כפי 9.1; הבידוד מקטין את האיבוד ב־89.0%.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. הכפילו את הבידוד ל־0.2 m. q'' חדש?

   $R'' = 5.308$, $q'' = 3.77$ W/m² =.

2. איזו שכבה שולטת בקיר המקורי?

   הבידוד, 2.5 מתוך 2.808 m²·K/W.

3. כתבו R לשתי שכבות במקביל.

   $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

4. צורת T(x) בקיר מישורי במצב מתמיד?

לינארי.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: שכבות דקות אף פעם אינן חשובות.

בפועל: שכבה דקה עם k נמוך יכולה לשלוט.

מיתוס: התנגדויות בטור מוכפלות.

בפועל: הן מתחברות.

מיתוס: שכבות אוויר אינן מוסיפות דבר.

בפועל: התנגדות הסעה היא ממשית.

כרטיסיות

התנגדות תרמית

ΔT ליחידת זרימת חום.

משוואת החום

מאזן אנרגיה במוצק.

קיר מרוכב

שכבות בטור.

בידוד

חומר עם k נמוך.

התנגדות מגע

התנגדות בממשק.

ערך U

מקדם כולל, 1/R″.

בוחן לבדיקה עצמית

1. R″ כולל…

2.808 m²·K/W

2.5

0.308

28.08

2.808 m²·K/W. חברו את השכבות.

2. איבוד דרך 100 m²…

712 W

71 W

6497 W

2000 W

7.12 × 100 .712 W.

3. חיסכון מבידוד…

89.0%

50%

9.1%

25%

0.3079/2.808 − 1 .89.0%.

4. התנגדויות בטור…

מתחברות

מוכפלות

ממוצעות

מבטלות זו את זו

מתחברות. אנלוגיית המעגל.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ENERGY STAR מציינת שחשבון אנרגיה טיפוסי של משק בית בארה"ב הוא כ־$1900 בשנה וכמעט מחציתו הולך לחימום ולקירור.

הקיר לדוגמה ביחידה זו מראה למה איטום ובידוד באים קודם: הוספת בידוד הקטינה את איבוד ההולכה בכ־89%, כך שלכל מערכת חימום יש הרבה פחות חום להחליף.

ב־Saving Planets: פתרונות · תרמודינמיקה

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרק 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/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

גלילים, כדורים וצלעות

הולכה רדיאלית, בידוד צנרת ורדיוס קריטי, משטחים מורחבים, נצילות צלעות וקירור אלקטרוניקה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו התנגדות הולכה רדיאלית.
- מצאו את רדיוס הבידוד הקריטי.
- חשבו את פרמטר הצלע m ואת נצילות הצלע.
- העריכו את החום מצלע.

מושגי מפתח

- בגליל השטח גדל עם הרדיוס, ולכן פרופיל הטמפרטורה לוגריתמי ו־R = ln(r₂/r₁)/(2πkL).
- הוספת בידוד לתיל דק עלולה להגדיל את איבוד החום עד שהרדיוס החיצוני עובר את הרדיוס הקריטי k/h.
- צלעות מוסיפות שטח היכן ש־h נמוך (בדרך כלל בגזים), כמו בצילינדרים של מנועים, בגופי קירור וברדיאטורים.
- פרמטר הצלע m = √(hP/(kA_c)) קובע עד כמה מהר טמפרטורת הצלע דועכת מבסיסה.
- נצילות צלע משווה את החום בפועל לחום שהיה אילו כל הצלע הייתה בטמפרטורת הבסיס.

משוואות מפתח

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

```
R_cyl=((r_2/r_1))/(2π kL)
```

התנגדות רדיאלית

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

```
r_cr=k/h
```

רדיוס קריטי (גליל)

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

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

פרמטר צלע

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

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 בידוד צינור מ־$r = 0.05$ עד 0.1 m, $k = 0.04$ W/(m·K), באורך 1 m, הפרש של 100 K (ערכי דוגמה). מצאו את R ואת q.

1. $R = \ln 2/(2\pi \times 0.04) = 2.758$ K/W.
2. $q = 100/2.758$.

תשובה: 36.3 W למטר.

דוגמה 3.2 צלע סיכה מאלומיניום ($k = 200$) בקוטר 5 mm עם $h = 50$ W/(m²·K) ואורך אפקטיבי של 20 mm. מצאו את η.

1. $m = \sqrt{(4h/(kD))} = \sqrt{(200/1)} = 14.14$ m⁻¹.
2. $mL = 0.2828$.
3. $\eta = \tanh(0.2828)/0.2828$.

תשובה: 0.974.

דוגמה 3.3 החום מצלע זו עם עודף של 50 K בבסיס?

1. $A_f = \pi DL = 3.142 \times 10^{-4}$ m².
2. $q = \eta h A_f \theta = 0.974 \times 50 \times 3.142 \times 10^{-4} \times 50$.

תשובה: 0.765 W.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. רדיוס קריטי עבור $k = 0.04$ ו־$h = 8$?

   5 mm.

2. נצילות צלע ב־$L = 40$ mm?

   $mL = 0.566$, $\eta = 0.905$.

3. למה צלעות מתאימות לאוויר יותר מלמים?

ה־h הנמוך של אוויר הופך את השטח לצוואר הבקבוק.

4. צורת הפרופיל בדופן גלילית?

לוגריתמית.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: יותר בידוד תמיד עוזר.

בפועל: לא מתחת לרדיוס הקריטי.

מיתוס: צלעות ארוכות יותר תמיד עוזרות הרבה.

בפועל: הנצילות יורדת עם האורך.

מיתוס: צלעות עובדות בכל תווך.

בפועל: הן משתלמות היכן ש־h נמוך.

כרטיסיות

רדיוס קריטי

k/h לגלילים.

Fin

משטח מורחב.

נצילות צלע

חום בפועל חלקי חום אידיאלי של הצלע.

m

פרמטר הדעיכה של הצלע.

גוף קירור

מערך צלעות.

פרופיל לוגריתמי

טמפרטורה מתמידה בגליל.

בוחן לבדיקה עצמית

1. R של הצינור…

2.758 K/W

0.276

27.6

1.0

.2.758 K/W. ln 2/(2π × 0.04)

2. רדיוס קריטי…

5 mm

50 mm

0.5 mm

200 mm

.5 mm. k/h

3. נצילות צלע…

0.974

0.5

0.283

1.2

.0.974. tanh(mL)/mL

4. חום הצלע…

0.765 W

7.65 W

76.5 W

0.0765 W

.0.765 W. ηhAθ

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

חום נע בדופן צינור כמו בקרום של כוכב לכת: מחם לקר, דרך התנגדויות בטור.

בידוד צינורות מים חמים וקיטור הוא מצעדי היעילות הפשוטים ביותר במבנים ובתעשייה. כל הערכים ביחידה זו הם ערכי ספר לימוד לדוגמה.

ב־Saving Planets: פתרונות · מעגלים חשמליים

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרק 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/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

הולכה מעברית

מספר ביו, מודל הקיבול המרוכז, קבועי זמן, ומתי גרדיאנטים מרחביים של טמפרטורה חשובים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו את מספר ביו.
- השתמשו במודל המרוכז כאשר Bi < 0.1.
- חשבו קבוע זמן תרמי.
- מצאו את הזמן להגעה לטמפרטורת יעד.

מושגי מפתח

- מספר ביו משווה את התנגדות ההולכה הפנימית להתנגדות ההסעה החיצונית.
- כאשר Bi < 0.1 הגוף כמעט אחיד בטמפרטורה והמודל המרוכז עובד.
- במודל המרוכז עודף הטמפרטורה דועך מעריכית עם קבוע זמן τ = ρcV/(hA).
- עבור Bi גדולים יותר השתמשו בפתרונות טור באיבר אחד או בתרשימים (Heisler) או בשיטה נומרית.
- קיבול חום גבוה מאט את התגובה: אוקיינוסים וקירות עבים הם גלגלי תנופה תרמיים.

משוואות מפתח

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

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

מספר ביו

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

```
τ=(ρ cV)/(hA)
```

קבוע זמן

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

```
(T-T_∞)/(T_i-T_∞)=e^-t/τ
```

תגובה מרוכזת

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

`t=τ(θ_i)/(θ)`

זמן עד יעד

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 כדור אלומיניום בקוטר 10 mm (k = 237, ρ = 2700, c = 900) מתקרר באוויר עם h = 50. מצאו את Bi.

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

תשובה: 3.52×10^{-4}, ולכן המודל המרוכז עובד.

דוגמה 4.2 מצאו את τ לכדור זה.

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

תשובה: 81 s.

דוגמה 4.3 כמה זמן להתקרר מ־300 °C ל־50 °C באוויר של 20 °C?

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

תשובה: 181 s.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. החלק מהעודף שנותר אחרי τ אחד?

   $e^{-1} = 0.368$.

2. זמן לחציית העודף?

   $\tau \ln 2 = 56.1$ s.

3. $Bi = 0.5$. האם המודל המרוכז תקף?

   לא; השתמשו בפתרונות טור או נומריים.

4. הכפילו את h. מה קורה ל־τ?

הוא יורד לחצי, 40.5 s.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: Bi הוא מספר נוסלט.

בפועל: Bi משתמש ב־k של המוצק; Nu ב־k של הזורם.

מיתוס: המודל המרוכז תקף לכל גודל.

בפועל: רק כאשר Bi < 0.1.

מיתוס: הקירור ליניארי בזמן.

בפועל: הוא מעריכי.

כרטיסיות

מספר ביו

התנגדות פנימית חלקי חיצונית.

קיבול מרוכז

מודל טמפרטורה אחידה.

קבוע זמן

ρcV/(hA).

תרשים Heisler

תרשים פתרון מעברי באיבר אחד.

מסה תרמית

קיבול חום שמאט שינוי.

L_c

אורך אופייני V/A.

בוחן לבדיקה עצמית

1. קבוע זמן…

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

2. זמן קירור עד 50 °C…

181 s

81 s

56 s

300 s

181 s. τ ln(280/30).

3. המודל המרוכז תקף כאשר…

Bi < 0.1

Bi > 1

Re > 5 × 10⁵

Nu < 1

Bi < 0.1. גוף אחיד.

4. אחרי τ אחד…

נותרו 36.8%

נותרו 50%

נותרו 0%

נותרו 63.2%

נותרו e⁻¹. 36.8%.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־Earth Observatory של NASA מציין שטמפרטורת פני כדור הארץ היא בממוצע כ־15 °C, חמה ביותר מ־30 °C ממה שהייתה בלי אטמוספרה.

בשפת יחידה זו, קיבול חום גדול פירושו קבוע זמן ארוך; קיבול החום של האוקיינוסים מעניק לאקלים כדור הארץ תגובה איטית (רעיון מספרי לימוד, לא נתון של NASA).

ב־Saving Planets: אוקיינוסים · תצפית על כדור הארץ

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרק 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/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

הסעה מאולצת חיצונית

שכבות גבול, מספרי ריינולדס, פרנדטל ונוסלט, קורלציות ללוח שטוח וזרימה סביב גלילים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו את Re, Pr ו־Nu.
- השתמשו בקורלציה הלמינרית ללוח שטוח.
- מצאו את h ואת קצב החום.
- בדקו מעבר ב־$Re \approx 5 \times 10^5$.

מושגי מפתח

- על משטח נוצרות שכבות גבול של מהירות ושל טמפרטורה; החום חוצה בהולכה את השכבה הדקה של זורם איטי.
- מספר נוסלט $Nu = hL/k$ הוא מקדם מעבר החום חסר הממדים.
- מספר פרנדטל משווה בין דיפוזיביות התנע לדיפוזיביות התרמית (כ־0.7 לאוויר, כ־7 למים סמוך לטמפרטורת החדר, ערכי ספר לימוד).
- על לוח שטוח הזרימה בדרך כלל למינרית מתחת ל־$Re \approx 5 \times 10^5$; טורבולנציה מעלה את h.
- קורלציות הן התאמות לניסויים; השתמשו בהן בתחומים המוצהרים שלהן.

משוואות מפתח

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

Re_L=(VL)/(ν)

מספר ריינולדס

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

Nu_L=(hL)/(k)

מספר נוסלט

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

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

לוח שטוח למינרי (ממוצע)

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

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

לוח שטוח טורבולנטי (ממוצע)

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 אוויר ($\nu = 1.5 \times 10^{-5}$, $k = 0.026$, $Pr = 0.71$) זורם ב־5 m/s מעל לוח של 0.5 m. מצאו את Re.

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

תשובה: 166667, למינרי.

דוגמה 5.2 מצאו את Nu הממוצע ואת h.

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. $h = 241.8 \times 0.026/0.5$.

תשובה: 12.6 W/(m²·K).

דוגמה 5.3 חום מלוח 1 m × 0.5 החם ב־30 K מהאוויר?

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

תשובה: 189 W.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. חזרו על h ב־10 m/s.

   (גבוה פי √2) $h = 17.8$ W/(m²·K), $Re = 333333$.

2. Re ב־1 m/s?

   33,333.

3. מהו ה־h חסר הממדים?

   מספר נוסלט.

4. מדוע טורבולנציה מעלה את h?

   הערבול מדלל את השכבה האיטית ליד הדופן.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: Nu משתמש ב־k של המוצק.

בפועל: הוא משתמש ב־k של הזורם.

מיתוס: קורלציה אחת מתאימה לכל הזרימות.

בפועל: בדקו תחום וגאומטריה.

מיתוס: h קבוע לאורך הלוח.

בפועל: h המקומי יורד ככל שהשכבה גדלה.

כרטיסיות

מספר ריינולדס

אינרציה חלקי צמיגות.

מספר פרנדטל

ν/α.

מספר נוסלט

hL/k.

שכבת גבול

אזור דק ליד הדופן.

מתאם

התאמה לניסויים.

מעבר

ממינרי לטורבולנטי.

בוחן לבדיקה עצמית

1. Re ב־5 m/s…

166,667

16,667

1.67×10^{6}

6000

ν/VL .166,667.

2. h ממוצע…

12.6 W/(m²·K)

126

1.26

242

.12.6 W/(m²·K). Nu k/L

3. קצב חום…

189 W

18.9 W

377 W

63 W

.189 W. hAΔT

4. מעבר סביב…

5×10^{5}

2300

10^{3}

10^{9}

$10^{5} \times 5$. לוח שטוח.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־Earth Observatory של NASA אומר שהסעה נושאת כ־5% מאנרגיית השמש הנכנסת מפני השטח לאטמוספרה, בעוד שהתאדות נושאת כ־25%.

מהירות הרוח קובעת את h מעל אוקיינוסים ויבשה בדיוק כמו שהמהירות קובעת את h על הלוח ביחידה זו, ולכן הרוחות קובעות כמה מהר פני השטח מאבדים חום.

ב־Saving Planets: מכניקת זורמים · אוקיינוסים

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרקים 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/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

זרימה פנימית ומחליפי חום

הסעה בצינורות, טמפרטורה ממוצעת, קורלציית Dittus–Boelter, סוגי מחליפי חום, LMTD ויעילות–NTU.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו בקורלציות למינריות וטורבולנטיות לצינורות.
- חשבו הפרש טמפרטורות ממוצע לוגריתמי.
- תכננו מחליף חום בעזרת UA ו־LMTD.
- השתמשו בשיטת יעילות–NTU.

מושגי מפתח

- בצינור, טמפרטורת הנפח (הממוצעת) משתנה לאורכו כשחום נכנס או יוצא.
- לזרימה למינרית מפותחת לחלוטין עם טמפרטורת דופן קבועה Nu = 3.66; זרימה טורבולנטית משתמשת ב־Dittus–Boelter (קורלציות מספרי לימוד).
- מחליפי זרם נגדי עדיפים על זרם מקביל כי הפרש הטמפרטורות נשאר אחיד יותר.
- שיטת LMTD מתאימה לתכנון כאשר כל ארבע הטמפרטורות ידועות.
- שיטת ε-NTU מתאימה להערכת ביצועים כאשר טמפרטורות היציאה אינן ידועות.

משוואות מפתח

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

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

Dittus–Boelter (חימום)

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

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

הפרש טמפרטורות ממוצע לוגריתמי

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

```
q=UAΔ T_lm
```

קצב החום של המחליף

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

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

יעילות, מעבה או מאדה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 מים ($k = 0.6$, $Pr = 7$, ערכי ספר לימוד) זורמים ב־$Re = 20000$ בצינור של $20\ mm$. מצאו את h.

1. $Nu = 0.023 \times 20{,}000^{0.8} \times 7^{0.4} = 138.2$.
2. $h = 138.2 \times 0.6/0.02$.

תשובה: כ־$4150\ W/(m^2\cdot K)$.

דוגמה 6.2 זרם נגדי: חם $90\ °C \to 50\ °C$, קר $20 \to 40\ °C$. מצאו את ה־LMTD.

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

תשובה: $39.15\ K$.

דוגמה 6.3 עם $U = 500\ W/(m^2\cdot K)$ ו־$A = 2\ m^2$, מצאו את q.

1. $q = 500 \times 2 \times 39.15$.

תשובה: $39.2\ kW$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. ε עבור $NTU = 2$ כאשר זרם אחד מתעבה ($C_r = 0$)?

   $1 - e^{-2} = 0.865$.

2. Nu למינרי לטמפרטורת דופן קבועה?

   3.66.

3. מדוע להעדיף זרם נגדי?

   ΔT אחיד יותר, יותר חום ליחידת שטח.

4. Nu לפי Dittus–Boelter עבור $Pr = 0.7$, $Re = 20000$?

.55.0

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: השתמשו ב־ΔT הממוצע האריתמטי.

בפועל: השתמשו בממוצע הלוגריתמי.

מיתוס: ε יכול לעלות על 1.

בפועל: אינו יכול.

מיתוס: קורלציות למינריות מתאימות לזרימה טורבולנטית.

בפועל: בדקו קודם את Re.

כרטיסיות

LMTD

ΔT ממוצע לוגריתמי.

NTU

.UA/C_min

יעילות

חום בפועל חלקי חום מרבי.

זרם נגדי

זרמים בכיוונים מנוגדים.

השקעות

משקעים המוסיפים התנגדות.

Dittus–Boelter

קורלציה טורבולנטית לצינורות.

בוחן לבדיקה עצמית

1. LMTD…

39.15 K

40 K

30 K

50 K

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

2. q של המחליף…

39.2 kW

3.92 kW

20 kW

78 kW

.39.2 kW. UA LMTD

3. ε ב־2 NTU…

0.865

0.5

0.98

2

.0.865. 1 − e⁻²

4. h של מים…

≈ 4150 W/(m²·K)

≈ 41

≈ 415,000

≈ 1.4

.≈ 4150 W/(m²·K). Nu k/D

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ENERGY STAR מסביר שמשאבת חום אוויר מעבירה חום בין אוויר הפנים לאוויר החוץ במקום לייצר אותו מדלק, בעזרת מחליפי חום (סלילים) בשני הצדדים.

מחליפים טובים יותר צריכים הפרש טמפרטורות קטן יותר כדי להעביר אותו חום, וזו אחת הסיבות שמשאבות חום מודרניות מספקות יותר חום ליחידת חשמל.

ב־Saving Planets: פתרונות · תרמודינמיקה

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרקים 3 ו־7.
- 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/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

הסעה טבעית ורתיחה

זרימה המונעת בציפה, מספרי גרסהוף וריילי, קורלציות ללוח אנכי, ומבוא לרתיחה ולעיבוי.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו את מספר ריילי.
- השתמשו בקורלציה ללוח אנכי.
- השוו h טבעי ומאולץ.
- תארו את עקומת הרתיחה.

מושגי מפתח

- זורם חם קל יותר ועולה; הציפה, לא מאוורר, מניעה את הזרימה.
- מספר ריילי Ra = gβΔTL³/(να) ממלא את התפקיד ש־Re ממלא בזרימה מאולצת.
- על לוח אנכי הזרימה למינרית מתחת לכ־Ra = 10⁹ (ערך ספר לימוד).
- h של הסעה טבעית באוויר הוא רק כמה W/(m²·K), ולכן הקרינה לרוב דומה בסדר גודל.
- רתיחה ועיבוי מעבירים חום רב ב־ΔT קטן בזכות החום הכמוס.

משוואות מפתח

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

Ra_L=(gβΔ TL^3)/(να)

מספר ריילי

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

_L=0.59Ra_L^1/4

לוח אנכי למינרי

$$\beta = 1/T$$

מקדם התפשטות של גז אידיאלי

$$Gr = Ra/Pr$$

Gr=Ra/Pr

מספר גרסהוף

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 לוח אנכי של 0.3 m חם ב־30 K מהאוויר ($\beta = 1/300$ K⁻¹, $\nu = 1.6 \times 10^{-5}$, $\alpha = 2.2 \times 10^{-5}$, ערכים לדוגמה). מצאו את Ra.

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

תשובה: 7.52×10^{7}, למינרי.

דוגמה 7.2 מצאו את Nu ואת h עם $k = 0.026$.

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

תשובה: 4.76 W/(m²·K).

דוגמה 7.3 חום מלוח 1 m × 0.3?

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

תשובה: 42.9 W.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. השוו ל־h המאולץ של 12.6 מיחידה 5.

   המאולץ גבוה פי 2.64 בערך.

2. הגבול הלמינרי של Ra?

   כ־10^{9}.

3. מדוע רתיחה כה יעילה?

   החום הכמוס מעביר אנרגיה ב־ΔT קטן.

4. β לגז אידיאלי ב־300 K?

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

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הסעה טבעית זניחה.

בפועל: לרוב היא שקולה לקרינה.

מיתוס: Ra משתמש במהירות.

בפועל: הוא משתמש בציפה.

מיתוס: h של רתיחה נמוך.

בפועל: הוא מהגבוהים ביותר.

כרטיסיות

מספר ריילי

עוצמת הציפה.

מספר גרסהוף

ציפה חלקי צמיגות.

β

מקדם התפשטות.

עקומת רתיחה

שטף חום כפונקציה של חימום־יתר של הדופן.

שטף חום קריטי

שטף השיא ברתיחת גרעינים.

עיבוי

אדים לנוזל על דופן קרה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. Ra…

7.52×10^{7}

7.52×10^{9}

752

5×10^{5}

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

2. h…

4.76 W/(m²·K)

47.6

0.476

12.6

.4.76 W/(m²·K). Nu k/L

3. חום…

42.9 W

429 W

4.29 W

189 W

.42.9 W. hAΔT

4. המניע של הסעה טבעית…

ציפה

משאבה

קרינה

מפל לחץ

ציפה. הפרש צפיפות.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־Earth Observatory של NASA אומר שהתאדות מסלקת כ־25% מאנרגיית השמש הנכנסת מפני השטח והסעה כ־5%; החום הכמוס משתחרר כשאדי מים מתעבים לעננים.

בקרינת שמש ממוצעת של 340 W/m², חלקים אלה הם כ־85 ו־17 W/m², אותם תהליכי מעבר פאזה וציפה שיחידה זו עוסקת בהם.

ב־Saving Planets: אוקיינוסים · תצפית על כדור הארץ

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרקים 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/): הרצאות MIT חינמיות.

סיימתי את היחידה הזו

יסודות הקרינה

גופים שחורים, חוק פלאנק, חוק וין, חוק סטפן–בולצמן, פליטות, בליעות וחוק קירכהוף.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- מצאו את אורך הגל של שיא גוף שחור.
- חשבו הספק פליטה.
- השתמשו בפליטות ובבליעות.
- מצאו את הטמפרטורה האפקטיבית של כוכב לכת.

מושגי מפתח

- גוף שחור בולע את כל הקרינה ופולט את המרב האפשרי בכל טמפרטורה ואורך גל.
- חוק וין: אורך הגל של השיא הפוך ביחס לטמפרטורה המוחלטת.
- הספק הפליטה הכולל גדל כמו σT⁴, ולכן הכפלת הטמפרטורה מכפילה את הפליטה פי 16.
- משטחים אמיתיים פולטים חלק ε מהספק הגוף השחור; למשטח אפור ε = α (קירכהוף).
- קרינת השמש היא גל קצר; פליטת כדור הארץ היא אינפרה־אדום גל ארוך, ולכן גזים כמו CO_2 ואדי מים חשובים.

משוואות מפתח

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

```
_maxT=2898\ μ m· K
```

חוק ההעתקה של וין

$$E_b = \sigma T^4$$

```
E_b=σ T^4
```

סטפן–בולצמן

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

```
E=σ T^4
```

משטח אמיתי

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

```
T_e=(( S(1-a))/(σ))^1/4
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 NASA מעריכה את השמש בכ־5800 K. מצאו את אורך הגל של השיא שלה.

1. 2898/5800.

תשובה: 0.500 µm, אור נראה.

דוגמה 8.2 כדור הארץ בולע כ־240 W/m² (NASA). מצאו את הטמפרטורה האפקטיבית שלו.

1. T = (240/5.670374419 × 10⁻⁸)^¼.

תשובה: 255.1 K, כ־18 °C− (NASA מעגלת לכ־20 °C−).

דוגמה 8.3 פליטת גוף שחור ממשטח ב־288 K?

1. σ × 288⁴.

תשובה: 390 W/m².

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. אורך גל השיא ב־288 K?

   10.06 µm, אינפרה־אדום תרמי.

2. יחס הפליטה כש־T מוכפל?

   2⁴ = 16.

3. שיא עבור חוט להט של מנורה ב־3000 K?

   0.966 µm, אינפרה־אדום קרוב.

4. משטח אפור עם ε = 0.8: מהו α?

   0.8.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: חם פירושו נראה.

בפועל: עצמים בטמפרטורת החדר זוהרים באינפרה־אדום.

מיתוס: השתמשו ב־°C ב־σT⁴.

בפועל: השתמשו בקלווין.

מיתוס: מבריק פירושו קר.

בפועל: ε נמוך פירושו שהוא פולט ובולע מעט.

כרטיסיות

גוף שחור

בולע ופולט מושלם.

חוק וין

λ_max T = 2898 µm·K.

פליטות

פליטה ביחס לגוף שחור.

חוק קירכהוף

α = ε למשטחים אפורים.

חוק פלאנק

פליטה ספקטרלית של גוף שחור.

טמפרטורה אפקטיבית

T שקולת גוף שחור.

בוחן לבדיקה עצמית

1. שיא השמש…

0.500 µm

10 µm

5 µm

0.05 µm

0.500 µm. 2898/5800.

2. הטמפרטורה האפקטיבית של כדור הארץ…

255 K

288 K

300 K

5800 K

.255 K. (240/σ)^¼

3. הכפילו את T, הפליטה…

×16

2×

4×

8×

.×16. T⁴

4. גוף שחור ב־288 K…

390 W/m²

240 W/m²

1360 W/m²

39 W/m²

.390 W/m². σT⁴

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ה־Earth Observatory של NASA אומר שפני השמש הם כ־5800 K, שטמפרטורת הקרינה האפקטיבית של כדור הארץ היא כ־20 °C–, ושהכפלת טמפרטורת עצם מכפילה את האנרגיה הנפלטת פי 16.

NASA מציינת גם שאדי מים מאפשרים לרוב האינפרה־אדום לברוח בין 8 ל־14 µm, בעוד שפחמן דו־חמצני בולע באורכי גל מעבר לכ־12–13 µm, סמוך לשולי החלון הזה.

ב־Saving Planets: תצפית על כדור הארץ · פתרונות

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרק 10.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): הדמיה חינמית.

סיימתי את היחידה הזו

חילופי קרינה ומגנים

מקדמי צורה, הדדיות, רשתות משטחים אפורים, לוחות מקבילים, מגיני קרינה והגנה תרמית בחלל.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- השתמשו בהדדיות של מקדמי צורה.
- חשבו את ההחלפה נטו בין לוחות מקבילים.
- הראו כיצד מגן מקטין את זרימת החום.
- העריכו קרינה ממגן חם.

מושגי מפתח

- מקדם הצורה F_{12} הוא חלק הקרינה היוצאת ממשטח 1 שמגיע למשטח 2.
- הדדיות: $A_1F_{12} = A_2F_{21}$; סכימה: מקדמי הצורה ממשטח מסתכמים ל־1.
- משטחים אפורים מחליפים חום דרך התנגדויות משטח $(1-\varepsilon)/(\varepsilon A)$ והתנגדויות מרחב $1/(A_1F_{12})$.
- מגן דק עם ε נמוך בין שני לוחות מוסיף התנגדויות ומקטין את ההחלפה בחדות; בידוד רב־שכבתי מערים רבים כאלה.
- מגן חום הפונה לשמש מתחמם, פולט מחדש ומגן על מה שנמצא בצילו.

משוואות מפתח

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

```
A_1F_12=A_2F_21
```

הדדיות

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

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

לוחות מקבילים

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

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

התנגדות משטח

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

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 לוחות מקבילים גדולים ב־400 K וב־300 K, שניהם $\varepsilon = 0.8$. שטף נטו?

1. מכנה: $1/0.8 + 1 + 1/0.8 - 1 = 2.5$.
2. $q'' = \sigma(400^4 - 300^4)/2.5 =$.

תשובה: $662\ \text{W/m}^2$.

דוגמה 9.2 הכניסו מגן עם $\varepsilon = 0.05$ בשני הצדדים.

1. התנגדות: $(1/0.8 + 1 + 1/0.8) \times 2 = 40.5$.
2. $q'' = \sigma \times 1.75 \times 10^{10}/40.5 =$.

תשובה: $24.5\ \text{W/m}^2$, פי 27 פחות.

דוגמה 9.3 כדור קטן ($A_1 = 1\ \text{m}^2$) נמצא בתוך מעטפת בשטח $4\ \text{m}^2$. מצאו את F_{21}.

1. $F_{12} = 1$.
2. $F_{21} = A_1 F_{12}/A_2$.

תשובה: 0.25.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. שטף גוף שחור בגבול $1377\ ^\circ\text{C}$ של המגן של Parker?

   $\sigma \times 1650.15^4 = 4.20 \times 10^5\ \text{W/m}^2$.

2. מדוע מגן יחיד עם $\varepsilon = 0.05$ עובד כה טוב?

   שתי התנגדויות המשטח שלו מוסיפות כ־39.

3. סכום מקדמי הצורה ממשטח של מתחם סגור?

   1.

4. מהו MLI?

מגינים דקים רבים עם ε נמוך בערימה.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: מקדמי צורה סימטריים.

בפועל: רק $A_1F_{12} = A_2F_{21}$.

מיתוס: מגינים חייבים להיות עבים.

בפועל: ε נמוך הוא שקובע, לא העובי.

מיתוס: משטחים שחורים הם מגינים טובים.

בפועל: מגינים צריכים ε נמוך.

כרטיסיות

מקדם צורה

חלק הקרינה הנקלט.

הדדיות

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

רדיוסיטי

כל הקרינה היוצאת ממשטח.

מגן קרינה

מחסום עם ε נמוך.

MLI

בידוד רב־שכבתי.

משטח אפור

ε שאינו תלוי באורך הגל.

בוחן לבדיקה עצמית

1. שטף בין לוחות...

662 W/m²

993 W/m²

24.5 W/m²

1000 W/m²

.662 W/m². σΔT⁴/1.5

2. עם מגן…

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. הדדיות.

4. למגינים טובים יש…

ε נמוך

ε גבוה

k גבוה

h גבוה

ε נמוך. פולטים חלשים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA אומרת ש־Parker Solar Probe, ששוגרה ב־12 באוגוסט 2018, מוגנת במגן מחומר מרוכב פחמני בעובי 4.5 אינץ׳ (11.43 cm) העומד בכמעט 2500 °F (1377 °C) כשהחללית חולפת במרחק כ־3.9 מיליון מייל (6.2 מיליון km) מהשמש.

ב־2021 הפכה Parker לחללית הראשונה שטסה דרך העטרה של השמש; המגן שלה שומר על המכשירים שמאחוריו בצל, אותו רעיון כמו מגן הקרינה ביחידה זו.

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

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

מקורות לימוד חינמיים

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי, פרק 10.
- NASA Science: Parker Solar Probe (https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/): דף המשימה של נאס״א.

סיימתי את היחידה הזו

משאבות חום, מבנים ומאזן האנרגיה של כדור הארץ

COP של משאבות חום, גבולות קרנו, איבוד חום של מבנה שלם, וחוסר האיזון האנרגטי הפלנטרי הנמדד מהחלל.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- חשבו COP של משאבת חום ואת גבול קרנו שלה.
- קבעו את החשמל הדרוש לעומס חימום.
- המירו חוסר איזון בשטף להספק כולל.
- חברו את שלושת האופנים במערכת אחת.

מושגי מפתח

- משאבת חום מעבירה חום מקר לחם בעזרת עבודה; ה־COP לחימום הוא החום המסופק חלקי העבודה.
- COP קרנו, T_h/(T_h − T_c), הוא גבול עליון שיורד כשטמפרטורת החוץ יורדת.
- איבוד החום של מבנה הוא ה־UA שלו כפול הפרש פנים–חוץ; בידוד מוריד את UA לפני שקונים ציוד.
- חוסר האיזון האנרגטי של כדור הארץ הוא הפרש קטן בין שתי זרימות גדולות, הנמדד בלווייינים כמו מכשירי CERES של NASA.
- כל מערכת בקורס זה משלבת הולכה, הסעה וקרינה ברשת התנגדויות.

משוואות מפתח

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

COP_h=(Q_h)/(W)

COP לחימום

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

COP_Carnot=(T_h)/(T_h-T_c)

גבול קרנו

$$Q = U A \Delta T$$

Q=UAΔ T

איבוד חום של מבנה

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

P=Δ F· A_E

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 ENERGY STAR אומר שמשאבת חום יכולה לספק עד פי שלושה יותר חום מהחשמל שהיא צורכת. חשמל עבור 9 kW חום?

1. $W = 9/3$.

תשובה: 3 kW.

דוגמה 10.2 COP קרנו לחימום עם אספקה ב־35 °C (308 K) ו־0 °C (273 K) בחוץ?

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

תשובה: 8.8; יחידות אמיתיות מגיעות לכשליש מזה.

דוגמה 10.3 NASA אומרת שחוסר האיזון מעט יותר מ־0.8 W/m². עם שטח כדור הארץ 5.1×10^{14} m² (ערך ספר לימוד), מהו ההספק הכולל?

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

תשובה: כ־4.1×10^{14} W.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מחצית מחשבון אנרגיה שנתי של 1900$?

   כ־950$ לחימום ולקירור.

2. COP קרנו ב־−10 °C (263 K) בחוץ, אספקה ב־308 K?

   6.84.

3. מדוע לבודד לפני קניית משאבת חום?

   UA נמוך יותר פירושו יחידה קטנה וזולה יותר.

4. מה מודד CERES?

   את האנרגיה הקרינתית של כדור הארץ מהחלל.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: COP גבוה מ־1 מפר את שימור האנרגיה.

בפועל: חום מועבר, לא נוצר.

מיתוס: להנמיך מאוד משאבות חום בלילה.

בפועל: ENERGY STAR ממליץ על כיוון קבוע.

מיתוס: $0.8\ W/m^2$ זניח.

בפועל: על פני כל כדור הארץ זה כ־$4 \times 10^{14}\ W$.

כרטיסיות

COP

חום מסופק ליחידת עבודה.

COP קרנו

גבול אידיאלי.

UA

מוליכות כוללת.

חוסר איזון אנרגטי

נבלע פחות נפלט.

CERES

מכשירי מאזן הקרינה של NASA.

משאבת חום

מעבירה חום בעזרת עבודה.

בוחן לבדיקה עצמית

1. חשמל עבור 9 kW ב־COP 3…

3 kW

27 kW

9 kW

1 kW

9/3 kW.3.

2. COP קרנו…

8.8

3

1.13

35

.8.8. 308/35

3. הספק חוסר האיזון…

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

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

≈ 0.8 W

$\approx 10^{20}$ W

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

4. הורידו את UA על ידי…

בידוד

העלאת COP

הוספת צלעות

צביעה בשחור

בידוד. התנגדות.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

ENERGY STAR אומר שמשאבת חום אוויר יכולה לספק עד פי שלושה יותר אנרגיית חום מהאנרגיה החשמלית שהיא צורכת, כי היא מעבירה חום במקום לייצר אותו.

ה־Earth Observatory של NASA אומר שכדור הארץ בולע מעט יותר מ־0.8 W/m² יותר ממה שהוא פולט; מכשירי CERES של NASA מודדים את מאזן הקרינה מהמסלול.

ב־Saving Planets: פתרונות · תצפית על כדור הארץ

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

מקורות לימוד חינמיים

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

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

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

1. אופני מעבר חום ומאזני אנרגיה
   4 תרגילים
2. הולכה מתמידה והתנגדות תרמית
   4 תרגילים
3. גלילים, כדורים וצלעות
   4 תרגילים
4. הולכה מעברית
   4 תרגילים
5. הסעה מאולצת חיצונית
   4 תרגילים
6. זרימה פנימית ומחליפי חום
   4 תרגילים
7. הסעה טבעית ורתיחה
   4 תרגילים
8. יסודות הקרינה
   4 תרגילים
9. חילופי קרינה ומגנים
   4 תרגילים
10. משאבות חום, מבנים ומאזן האנרגיה של כדור הארץ
    4 תרגילים

המעבדה (Heat transfer lab)

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

כל מעבדה מתבצעת בהדמיה חינמית או בגיליון אלקטרוני, כך שאין סכנות כוויה או חשמל. אל תחממו, תרתיחו או תדליקו דבר בקורס זה. קחו הפסקות מהמסך, שבו ביציבה טובה והרחיקו כבלים ממעברים.

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

מעבדה A: זרימת חום ומחשבון בידוד קירות

שבוע 2

מטרה: צפו בזרימת חום בין עצמים ב־PhET Energy Forms and Changes, ואז חשבו את שטף החום דרך קיר עבור כמה עוביי בידוד.

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

q^=Δ T/R^

קיר בטור

מהלך הניסוי

1. ב־PhET Energy Forms and Changes, חממו גוש וצפו באנרגיה זורמת לשכנו ולאוויר.
2. בגיליון אלקטרוני, הזינו את הקיר מיחידה 2 ללא בידוד: R″ = 0.3079 m²·K/W.
3. הוסיפו שכבות בידוד של 0.05, 0.1 ו־0.2 m (k = 0.04) וחשבו את q″ עבור ΔT = 20 K.
4. שרטטו את q″ כפונקציה של העובי ושימו לב לתועלת ההולכת ופוחתת.

טבלת נתונים

בידוד (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

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

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

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

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

הקשר לכדור הארץ: ENERGY STAR: כמעט מחצית מחשבון אנרגיה ביתי טיפוסי של $1900 הולכת לחימום ולקירור. ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

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

מעבדה B: חוקר נצילות צלעות

שבוע 4

מטרה: חשבו נצילות של צלע סיכה עבור כמה אורכים וראו מתי הארכה מפסיקה להשתלם.

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

_f=mL/mL

נצילות צלע

מהלך הניסוי

1. הזינו את הצלע מיחידה k = 200 ,3: D = 5 mm ,h = 50, ולכן m = 14.14 m⁻¹.
2. חשבו η עבור L = 10 ,20 ו־40 mm.
3. חשבו את חום הצלע לעודף של 50 K בבסיס.
4. שנו את h ל־200 וחזרו.

טבלת נתונים

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

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

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

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

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

הקשר לכדור הארץ: צלעות ומחליפים יעילים מאפשרים למשאבות חום להעביר יותר חום ליחידת חשמל (ENERGY STAR).

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

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

מעבדה C: עקומת קירור מרוכזת

שבוע 5

מטרה: מדלו בגיליון אלקטרוני את קירור כדור האלומיניום מיחידה 4 והשוו עקומה מדויקת לפתרון צעד אחר צעד (אוילר).

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

T=T_∞+(T_i-T_∞)e^-t/τ

תגובה מרוכזת

מהלך הניסוי

1. הזינו T_i = 300 °C ,T∞ = 20 °C ,τ = 81 s.
2. חשבו את T בכל t עד 3τ.
3. הוסיפו עמודת אוילר עם צעד של 5 s והשוו.
4. הכפילו את h וחזרו.

טבלת נתונים

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

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

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

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

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

הקשר לכדור הארץ: NASA: טמפרטורת פני כדור הארץ היא בממוצע כ־15 °C, חמה ביותר מ־30 °C מאשר בלי אטמוספרה.
NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

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

מעבדה D: מחשבון הסעה על לוח שטוח

שבוע 7

מטרה: חשבו את Re ואת h הממוצע לאוויר מעל לוח של 0.5 m בכמה מהירויות.

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

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

לוח למינרי

מהלך הניסוי

1. הזינו את תכונות האוויר: ν = 1.5 × 10⁻⁵, k = 0.026, Pr = 0.71.
2. חשבו את Re ואת h ב־1, 5 ו־10 m/s.
3. בדקו שכל Re נמוך מ־5 × 10⁵.
4. שרטטו את h כפונקציה של √V.

טבלת נתונים

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

ערכי דוגמה מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. Re(1) = 1 × 0.5/1.5 × 10⁻⁵ = 33,333.
2. h(10) = 0.664 × 577.4 × 0.892 × 0.052 = 17.78.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

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/)

הקשר לכדור הארץ: NASA: הסעה נושאת כ־5% מאנרגיית השמש הנכנסת מפני השטח. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

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

מעבדה E: ספקטרום גוף שחור

שבוע 11

מטרה: השתמשו ב־PhET Blackbody Spectrum כדי לראות את חוק וין, ואז בדקו את השיאים בגיליון אלקטרוני.

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

_max=2898/T

חוק וין

מהלך הניסוי

1. ב־PhET Blackbody Spectrum, בחרו את השמש, מנורה וכדור הארץ.
2. קראו את אורך גל השיא מהגרף.
3. חשבו 2898/T עבור 288, 3000 ו־5800 K.
4. חשבו σT⁴ לכל אחד.

טבלת נתונים

T (K)	λ_max (µm)	σT⁴ (W/m²)
288	10.06	390
3000	0.966	4.59 × 10⁶
5800	0.500	6.42 × 10⁷

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

1. 2898/288 = 10.06 µm.
2. σ × 5800⁴ = 6.42 × 10⁷ W/m² .σ

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- רץ בדפדפן.

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

הקשר לכדור הארץ: NASA: השמש היא כ־5800 K. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

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

מעבדה F: אפקט החממה ומאזן אנרגיה

שבוע 14

מטרה: חקרו את PhET Greenhouse Effect, ואז חשבו את הטמפרטורה האפקטיבית של כדור הארץ עבור כמה ערכי אלבדו.

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

`T_e=((S(1-a))/(4σ))^1/4`

טמפרטורה אפקטיבית

מהלך הניסוי

1. ב־PhET Greenhouse Effect, הוסיפו והסירו עננים וגזי חממה וצפו בטמפרטורה.
2. בגיליון אלקטרוני, השתמשו ב־S = 1360 W/m² (NASA).
3. חשבו את T_e עבור אלבדו 0.25, 0.29 ו־0.35.
4. הסבירו מדוע T_e נמוכה מהממוצע של NASA על פני השטח, 15 °C.

טבלת נתונים

אלבדו	T_e (K)
0.25	259.0
0.29	255.4
0.35	249.9

ערכים מחושבים.

חישוב לדוגמה

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

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- רץ בדפדפן.

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

הקשר לכדור הארץ: NASA: כ־29% מאור השמש מוחזר וכדור הארץ בולע כ־240 W/m². NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

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

מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

סט תרגול לבחינת אמצע (יחידות 5–1)

1. הסעה מ־3 m² עם $h = 15\ \text{W/(m²·K)}$, $\Delta T = 20\ \text{K}$?

.1 .15 × 3 × 20

תשובה: 900 W.

2. שטף חום דרך 0.15 m בידוד ($k = 0.04$) ועוד 0.3079 m²·K/W משכבות אחרות ב־$\Delta T = 20\ \text{K}$?

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

תשובה: 4.93 W/m².

3. רדיוס קריטי עבור $k = 0.1$ ו־$h = 10$?

.1 .k/h

תשובה: 10 mm.

4. ז לכדור אלומיניום של 20 mm, $h = 50$?

.1 .2700 × 900 × (0.02/6)/50

תשובה: 162 s.

5. Re לאוויר ב־2 m/s מעל 0.5 m?

.1 .2 × 0.5/1.5 × 10⁻⁵

תשובה: 66,667.

סדרת תרגול מסכמת (יחידות 10–1)

1. LMTD עבור $\Delta T_1 = 60\ \text{K}$ ו־$\Delta T_2 = 20\ \text{K}$?

.1 .40/ln 3

תשובה: 36.4 K.

2. ε עבור NTU = 1, C_r = 0?

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

תשובה: 0.632.

3. Ra ללוח מיחידה 7 עם L = 0.6 m?

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

תשובה: 6.02×10^{8}.

4. אורך גל השיא ב־1000 K?

1. 2898/1000.

תשובה: 2.90 µm.

5. לוחות מקבילים ב־500 K וב־ε = 0.9 300 K, לשניהם?

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

תשובה: 2524 W/m².

6. COP קרנו לחימום, אספקה ב־318 K, 268 K בחוץ?

1. 318/50.

תשובה: 6.36.

דף נוסחאות

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

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

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

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

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

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

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

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

$$COP = Q_h/W,\ COP_C = T_h/(T_h - T_c),\ P = \Delta F \qquad \lambda_{max}T = 2898,\ E_b = \sigma T^4,\ A_1F_{12} = A_2F_{21}$$

קבועים

קבוע	ערך
קבוע סטפן–בולצמן	σ = 5.670374419 × 10⁻⁸ W/(m²·K⁴)
קבוע וין (ערך ספר לימוד)	2898 μm·K
כבידה תקנית	g = 9.80665 m/s²
אוויר סביב 300 K (ערכי ספר לימוד)	k = 0.026 W/(m·K), ν = 1.5 × 10⁻⁵ m²/s, Pr = 0.71
אלומיניום (ערכי ספר לימוד)	k = 237 W/(m·K), ρ = 2700 kg/m³, c = 900 J/(kg·K)
שטח פני כדור הארץ (ערך ספר לימוד)	5.1 × 10¹⁴ m²

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

טקסטים וסימולציות בחינם

השתמשו בטקסטים, בהרצאות ובהדמיות החינמיים האלה לצד הקורס.

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): ספר לימוד חינמי ומלא במעבר חום.
- 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/): הרצאות ותרגילים חינמיים של MIT.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): הסבר חינמי של NASA.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): זרימת חום באופן אינטראקטיבי.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): קרינה תרמית.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): מאזן קרינה.

מילון מונחים

אלבדו

חלק אור השמש המוחזר.

מספר ביו

התנגדות תרמית פנימית חלקי חיצונית.

גוף שחור

בולע ופולט מושלם.

שכבת גבול

אזור זרימה דק ליד הדופן.

COP

חום מועבר ליחידת עבודה.

רדיוס קריטי

הרדיוס שבו איבוד החום מגליל מבודד מרבי.

יעילות

חום בפועל חלקי חום מרבי של המחליף.

פליטות

פליטה ביחס לגוף שחור.

חוסר איזון אנרגטי

אנרגיה פלנטרית נבלעת פחות נפלטת.

נצילות צלע

חום בפועל חלקי חום אידיאלי של הצלע.

חוק פורייה

חוק קצב ההולכה.

מחליף חום

התקן המעביר חום בין זורמים.

LMTD

הפרש טמפרטורות ממוצע לוגריתמי.

קיבול מרוכז

מודל מעברי בטמפרטורה אחידה.

מספר נוסלט

מקדם הסעה חסר ממדים.

מספר פרנדטל

דיפוזיביות תנע חלקי דיפוזיביות תרמית.

מגן קרינה

מחסום בעל פליטות נמוכה.

מספר ריילי

עוצמת זרימת הציפה.

התנגדות תרמית

הפרש טמפרטורות ליחידת זרימת חום.

מקדם צורה

חלק הקרינה שמשטח קולט.

מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

רמה	איך זה נראה
4 · שליטה מלאה	משרטט את המערכת ואת רשת ההתנגדויות, בודק מספרים חסרי ממדים לפני בחירת קורלציה, משתמש בקלווין לקרינה ומסביר תוצאות במילים פשוטות.
3 · מיומן	פותר את סדרות התרגול והמבחן עם טעויות קלות ובודק יחידות.
2 · מתפתח	עוקב אחר דוגמאות פתורות אך מבלבל בין k של המוצק לזה של הזורם, או משתמש ב־°C ב־σT⁴.
1 · מתחיל	מציב מספרים בנוסחאות בלי שרטוט או מאזן אנרגיה; צריך לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

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

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- תכנון חלליות AERO 430
- אוויוניקה והנדסת מערכות AERO 450
- הנעה AERO 410
- כל הקורסים