מבחן בתרמודינמיקה ומעבר חום

תהליכים בגזים, החוק הראשון, מחזור ומעבר חום • שאלה אחת • 100 נקודות

שם: _____ כיתה: _____ תאריך: _____

הנחיות

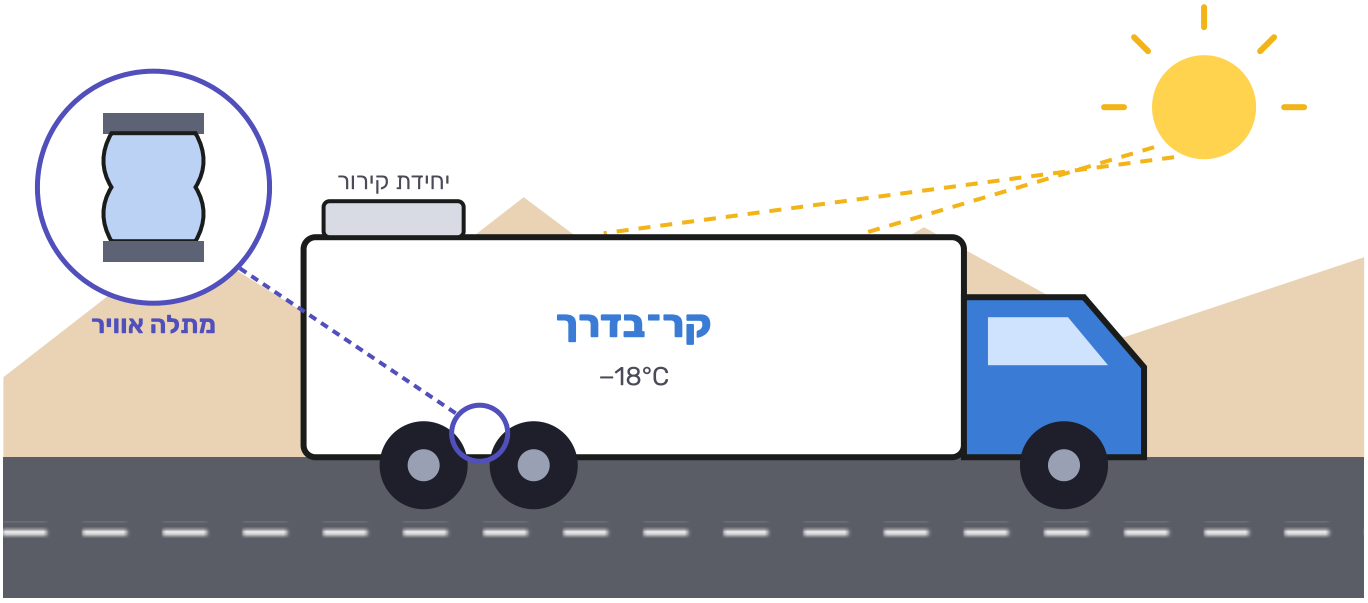
- משך המבחן: 90 דקות. מותר מחשבון. דף נוסחאות בסוף השאלון.
- הראו את כל שלבי החישוב, כתבו יחידות בכל תוצאה, ונמקו כל בחירה של סוג תהליך.
- טמפרטורות בנוסחאות של גז: בקלווין, $T = t + 273$. לחצים בנוסחאות: לחץ מוחלט.

שאלה 1: מבצע "גלידה לאילת" (100 נקודות)

רקע. אתם צוות ההנדסה של "קר־בדרך", חברת הובלות קירור מבאר שבע. החברה זכתה במכרז להוביל גלידות לכל הקיוסקים והמלונות באילת, בקיץ. בכביש 90 הטמפרטורה בחוץ מגיעה ל־38°C, והגלידה חייבת להישאר ב־−18°C לאורך כל הדרך.

למשאית שתי מערכות שצריך לנתח: **ארגז הקירור**, שצריך לעצור את החום מבחוץ, ו**מתלי האוויר** של הסרן האחורי: בלונים סגורים מלאי אוויר שנושאים את המשקל, ומשנים את גובה המשאית כשהמטען או הטמפרטורה משתנים.

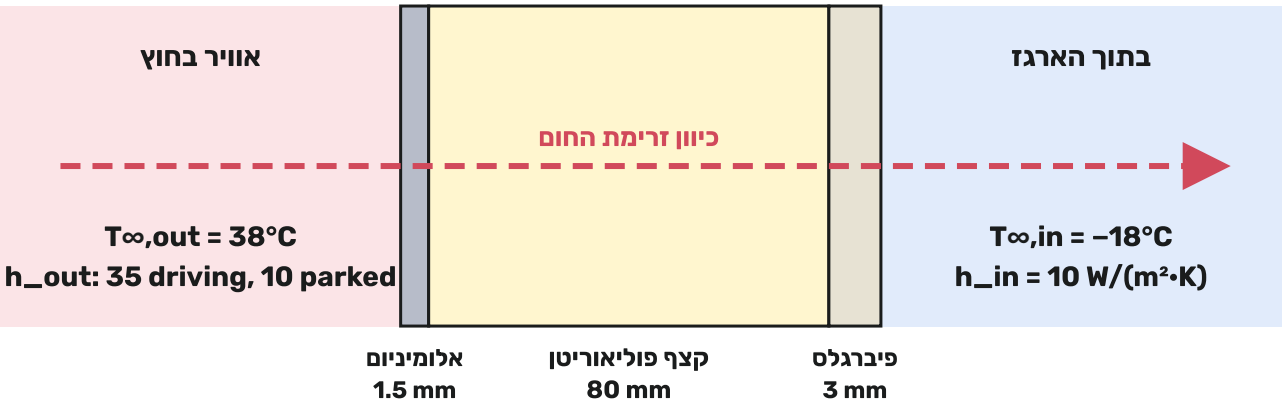
המשימה שלכם: לבדוק אם יחידת הקירור מספיקה, למצוא איפה בורח הכי הרבה קור, ולהסביר לנהג למה המשאית "עולה ויורדת" במהלך היום.



תרשים 1: משאית הקירור בכביש 90. בעיגול: מתלה אוויר של הסרן האחורי, בלון סגור שנושא את משקל הארגז.

חלק I: ארגז הקירור

לארגז דופן משולבת, כמתואר בתרשים 2. השטח הכולל של כל הדפנות, הגג והרצפה הוא $A = 66\ \text{m}^2$. מידות הארגז מבפנים: $6.0\ \text{m} \times 2.4\ \text{m} \times 2.2\ \text{m}$.



תרשים 2: שכבות הדופן, מבחוץ (שמאל) פנימה (ימין). מקדם ההסעה בחוץ תלוי בתנועת המשאית (W/(m²·K)).

נתון	ערך
מקדם מוליכות של אלומיניום	k = 200 W/(m·K)
מקדם מוליכות של קצף פוליאוריטן	k = 0.025 W/(m·K)
מקדם מוליכות של פיברגלס (ציפוי פנימי)	k = 0.30 W/(m·K)
מקדם הסעה בתוך הארגז (מאוררים)	h_in = 10 W/(m²·K)
מקדם הסעה בחוץ, בנסיעה ב־90 קמ"ש	h_out = 35 W/(m²·K)
מקדם הסעה בחוץ, בחניה	h_out = 10 W/(m²·K)
הספק הקירור של יחידת הקירור	2.5 kW
משך הנסיעה מבאר שבע לאילת	4 h

סעיף א: האם יחידת הקירור מספיקה?

22 נקודות

1. שרטטו את מעגל ההתנגדויות התרמיות של הדופן, מהאוויר שבחוץ לאוויר שבתוך הארגז, וסמנו על כל התנגדות את מנגנון מעבר החום.
2. חשבו כל אחת מההתנגדויות ואת ההתנגדות התרמית הכוללת $R_{th,total}$ של כל הארגז, בנסיעה. איזה אחוז מההתנגדות הכוללת נותן הקצף?
3. חשבו את הספק החום $\dot{Q}$ [W] שחודר לארגז בנסיעה. האם יחידת הקירור מספיקה?
4. חשבו את הטמפרטורה בשלושת המגעים: בין האלומיניום לקצף, בין הקצף לפיברגלס, ועל המשטח הפנימי. איפה "נופל" רוב הפרש הטמפרטורות?
5. חשבו את האנרגיה שחודרת לארגז במשך כל הנסיעה, ב־kWh.

סעיף ב: בנסיעה או בחניה?

10 נקודות

הנהג טוען: "כשאני נוסע מהר, הרוח 'מחממת' את הארגז, אז עדיף לנסוע לאט".

1. חשבו את הספק החום שחודר לארגז כשהמשאית חונה, והשוו לנסיעה. בכמה אחוזים הם שונים?
2. האם הנהג צודק? נמקו בעזרת ההתנגדויות שחישבתם: איזו התנגדות "שולטת" במעבר החום, ולמה שינוי ב־h_{out} כמעט לא משנה?

סעיף ג: השמש על הגג

10 נקודות

בצהריים השמש מקרינה על גג הארגז $G = 900\ W/m^2$. שטח הגג $6.0\ m \times 2.4\ m$. החברה שוקלת לצבוע את הארגז בכחול כהה, בצבעי המותג, במקום לבן.

צבע הגג	מקדם בליעה לקרינת שמש α	טמפרטורת משטח הגג שנמדדה
לבן	0.25	45°C
כחול כהה	0.85	70°C

1. חשבו את הספק קרינת השמש שהגג בולע בכל אחד מהצבעים.
2. בעזרת טמפרטורת המשטח שנמדדה, חשבו את הספק החום שעובר **דרך הגג בלבד** אל תוך הארגז בכל צבע. רמז: מהמשטח החיצוני פנימה, בלי ההסעה החיצונית.
3. רוב החום שהגג בולע לא נכנס לארגז. לאן הוא הולך? ומה ההמלצה שלכם לגבי הצבע?

סעיף ד: פתיחת הדלתות

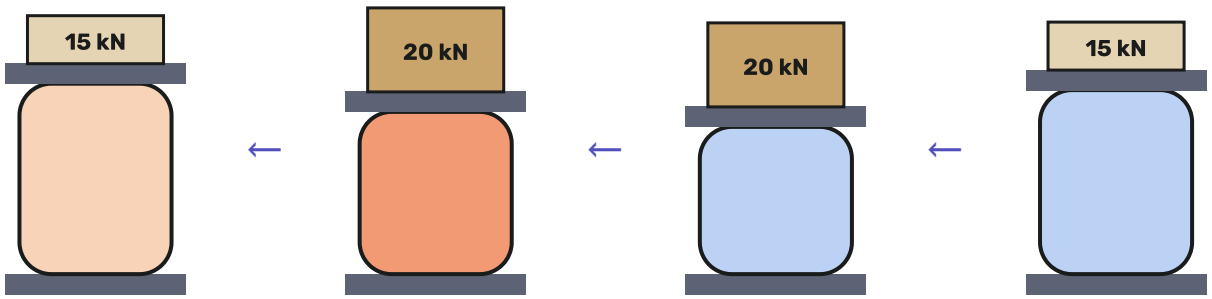
8 נקודות

באילת המשאית עוצרת ב־8 נקודות חלוקה. בכל עצירה הדלתות האחוריות פתוחות כמה דקות, וכל האוויר הקר שבארגז מתחלף באוויר חם מבחוץ, ב־38°C, בלחץ 100 kPa.

1. חשבו את מסת האוויר החם שנכנס לארגז בכל עצירה, ואת החום שיחידת הקירור צריכה להוציא כדי לקרר אותו בלחץ קבוע ל־−18°C.
2. חשבו את החום הכולל בשמונה העצירות ב־kWh, והשוו לחום שחדר דרך הדפנות בכל הנסיעה (סעיף א). מה מפתיע? הציעו פתרון פשוט.

חלק II: מתלי האוויר

איך זה עובד. כל מתלה אוויר הוא בלון גומי סגור עם בוכנה, ובתוכו כמות קבועה של אוויר. משקל הארגז והמטען לוחץ על הבוכנה כלפי מטה, והאוויר בבלון מחזיק אותו. במשאית הזו אין מדחס שמוסיף אוויר, ולכן גובה המשאית משתנה עם המטען ועם הטמפרטורה. נתמקד במתלה אחד.



תרשים 3: ארבעת מצבי המתלה, מימין לשמאל. גובה האוויר בבלון מתאר את הנפח. כחול: אוויר ב־20°C. כתום: אוויר שהתחמם בשמש. כתום בהיר: אוויר שהתקרר בפריקה, אבל עדיין חם מהסביבה.

נתון	ערך
שטח הבוכנה של המתלה	$A = 0.05\ m^2$
לחץ אטמוספרי	$P_{atm} = 100\ kPa$
מצב 1, בוקר במחסן: משאית ריקה, הכוח על המתלה	$F_1 = 15\ kN$
מצב 1: נפח האוויר במתלה וטמפרטורה	$V_1 = 12\ L,\ t_1 = 20°C$
אחרי ההעמסה: הכוח על המתלה	$F_2 = 20\ kN$
טמפרטורת האוויר במתלה אחרי הנסיעה בשמש	$t_3 = 50°C$
אוויר: קבוע הגז	$R = 287\ J/(kg\cdot K)$
אוויר: קיבול חום סגולי בנפח קבוע	$c_v = 717.5\ J/(kg\cdot K)$
אוויר: קיבול חום סגולי בלחץ קבוע	$c_p = 1004.5\ J/(kg\cdot K)$
אוויר: יחס קיבולי החום	$k = 1.4$

הלחץ באוויר שבמתלה מאזן בכל רגע את הכוח על הבוכנה ואת הלחץ האטמוספרי. הזניחו את משקל הבוכנה ואת החיכוך. האוויר הוא גז אידיאלי.

סעיף ה: העמסה במחסן

12 נקודות

בבוקר, במחסן הממוזג בבאר שבע ($20°C$), מלגזה מעמיסה את המשטחים לאט, במשך חצי שעה.

1. חשבו את הלחץ המוחלט במתלה לפני ההעמסה ואחריה, ואת מה שיראה מנומטר על המתלה בכל מצב. חשבו את מסת האוויר במתלה.
2. מהו סוג התהליך $1 \to 2$? נמקו.
3. חשבו את V_2, ובכמה סנטימטרים "שקעה" המשאית מעל המתלה.
4. חשבו את העבודה W_{12} ואת החום Q_{12}. האם האוויר קיבל חום או פלט חום? הסבירו.

סעיף ו: ארבע שעות בשמש

12 נקודות

בכביש 90 האספלט והשמש מחממים את המתלה, עד שהאוויר בתוכו מגיע ל־$50°C$. המטען לא משתנה.

1. מהו סוג התהליך $2 \to 3$? נמקו בעזרת מאזן הכוחות על הבוכנה.
2. חשבו את V_3 ובכמה סנטימטרים "עלתה" המשאית.
3. חשבו את W_{23}, ΔU_{23} ו־Q_{23}, ובדקו את החוק הראשון.

סעיף ז: פריקה מהירה באילת

12 נקודות

באילת מנוף מרים בבת אחת את כל המשטחים מהארגז. הכוח על המתלה יורד תוך שנייה בחזרה ל־$15\ kN$.

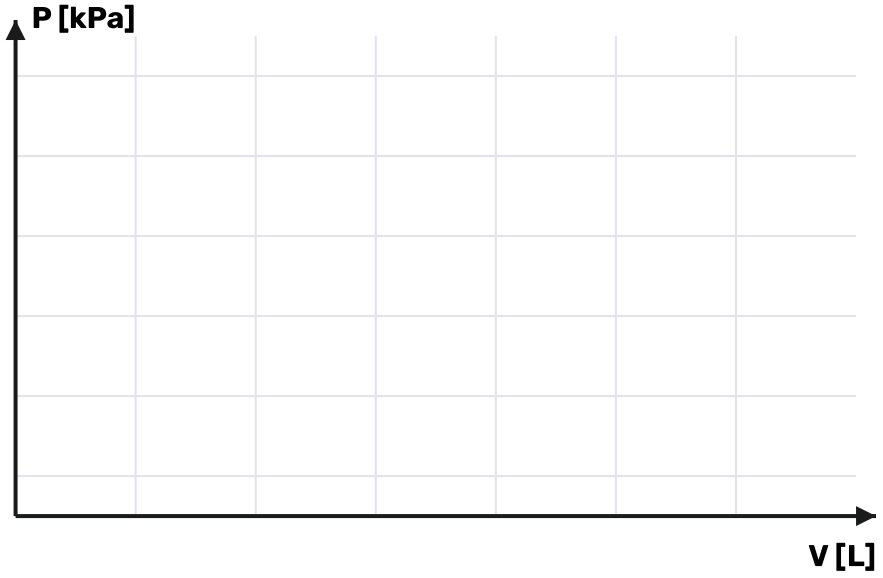
1. מהו סוג התהליך $3 \to 4$? נמקו.
2. חשבו את V_4 ו־T_4, ובכמה סנטימטרים "קפצה" המשאית.
3. חשבו את העבודה W_{34}. מאיפה הגיעה האנרגיה לעבודה הזו?
4. אילו הפריקה הייתה איטית מאוד, בטמפרטורה קבועה של $50°C$, מה היה V_4? הסבירו את ההבדל.

סעיף ח: הלילה, והמחזור נסגר

14 נקודות

בלילה המשאית הריקה חונה, והאוויר במתלה מתקרר חזרה ל־$20°C$. בבוקר המתלה חוזר בדיוק למצב 1.

1. מהו סוג התהליך $1 \to 4$? חשבו $Q,\ W,\ \Delta U$.
2. מלאו טבלה מסכמת של $Q,\ W,\ \Delta U$ לארבעת התהליכים.
3. שרטטו את המחזור בדיאגרמת P-V (תרשים 4), עם הערכים בכל נקודה וחצים לכיוון.
4. הראו שבמחזור $\Sigma Q = \Sigma W$. חשבו את העבודה נטו. מי "שילם" על העבודה הזו?



תרשים 4: צירים לשרטוט המחזור (סעיף ח). בחרו קנה מידה נוח.

דף נוסחאות

$Q = \Delta T / R_{th,total}$ • התנגדויות בטור מתחברות

$R = \Delta x / (k \cdot A)$ הולכה:

$R = 1 / (h \cdot A)$ הסעה:

$Q = \alpha \cdot G \cdot A$ קרינה שנבלעת:

$1\ \text{kWh} = 3.6 \cdot 10^6\ \text{J}$ • $E = Q \cdot t$

$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm}$ • $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$

$P = F / A$

$Q - W = \Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta T$ חוק ראשון:

$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ • $W = P \cdot (V_2 - V_1)$ לחץ קבוע:

$W = Q = P_1 V_1 \cdot \ln(V_2/V_1)$ טמפרטורה קבועה:

$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(k-1)/k}$ • $P \cdot V^k = \text{const}$ אדיאבטי:

$W = (P_1 V_1 - P_2 V_2)/(k - 1)$ אדיאבטי:

$\Sigma \Delta U = 0$ • $\Sigma Q = \Sigma W$ מחזור:

$1\ \text{bar} = 100\ \text{kPa}$ • $1\ \text{L} = 10^{-3}\ \text{m}^3$

בהצלחה!