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.

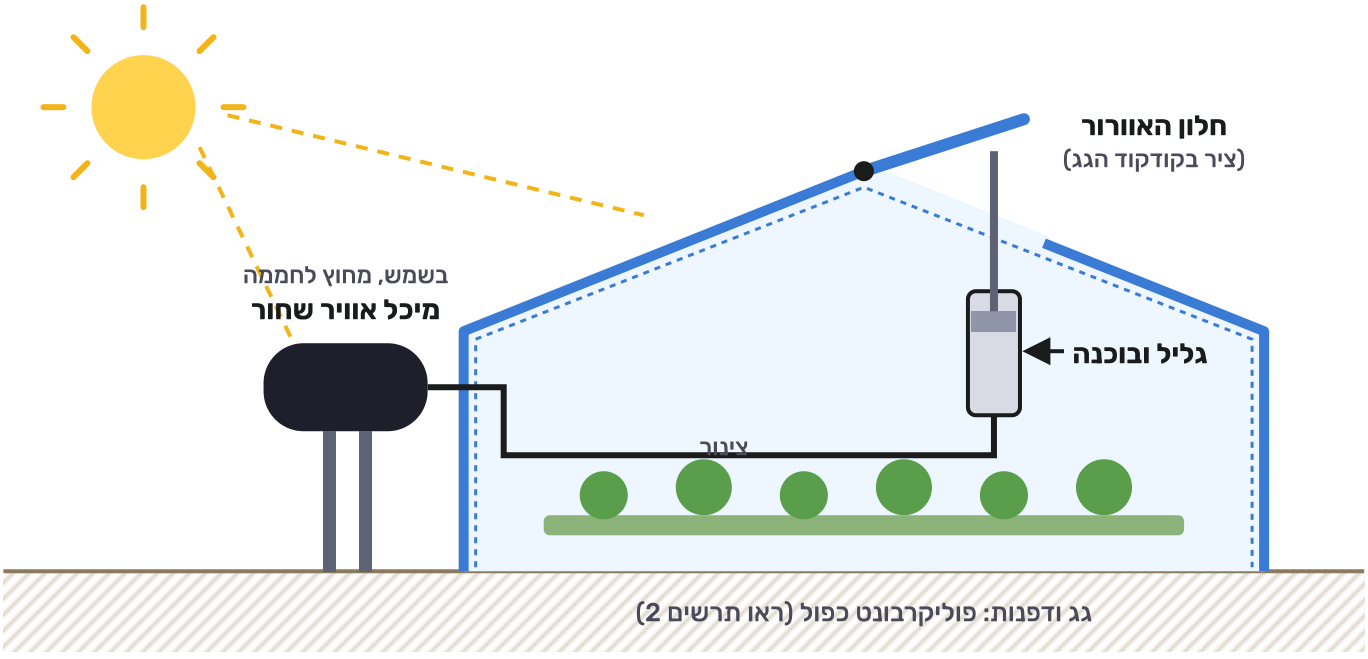
שאלה 1: פרויקט "חממה בערבה" (100 נקודות)

רקע. אתם צוות ההנדסה של "ירוק־במדבר", חברה ישראלית שמקימה חממות הידרופוניות בערבה. מושב בדרום פנה אליכם עם שתי בעיות בחממה החדשה שלו:

בלילה קר בחוץ, והחקלאי מבזבז כסף רב על חימום. בנוסף הוא רואה טיפות מים שמטפטפות מהגג על השתילים, ופוגעות בהם.

ביום השמש מחממת את החממה מעבר לרצוי, והחקלאי לא תמיד שם כדי לפתוח את חלון האוורור שבגג. הוא מבקש פתרון שיפתח את החלון **לבד**, בלי חשמל ובלי בקר.

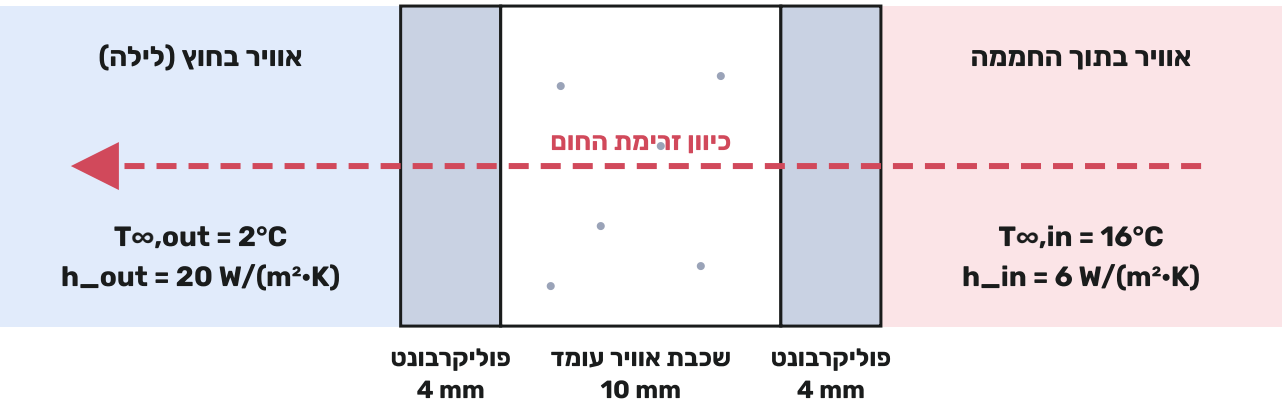
המשימה שלכם: לנתח את גג החממה מבחינת מעבר חום, ולתכנן "פותחן חלון סולארי": מיכל אוויר שחור שמחובר לבוכנה, שפותחת את החלון כשהאוויר במיכל מתחמם.



תרשים 1: חתך החממה. המיכל השחור עומד בשמש ומחובר בצינור לגליל שבתוך החממה; הבוכנה דוחפת את חלון האוורור.

חלק I: גג החממה בלילה

הגג והדפנות עשויים לוח **פוליקרבונט כפול**: שני לוחות דקים ושכבת אוויר עומד ביניהם, כמתואר בתרשים 2. השטח הכולל של הגג והדפנות הוא $A = 180\ m^2$.



תרשים 2: שכבות הדופן, מבפנים (ימין) החוצה (שמאל).

נתון	ערך
מקדם מוליכות של פוליקרבונט	$k_{pc} = 0.20\ W/(m\cdot K)$
מקדם מוליכות של אוויר עומד (שכבת הביניים מתנהגת כמוליך)	$k_{air} = 0.026\ W/(m\cdot K)$
מקדם הסעה בפנים (אוויר כמעט עומד)	$h_{in} = 6\ W/(m^2\cdot K)$
מקדם הסעה בחוץ (רוח לילית)	$h_{out} = 20\ W/(m^2\cdot K)$
טמפרטורת נקודת הטל של האוויר בחממה (מתחתיה אדי מים מתעבים על משטח)	10°C
אורך לילה חורפי / מחיר חשמל לחימום	12 h / 0.60 ₪ per kWh

סעיף א: כמה חום בורח בלילה?

22 נקודות

1. שרטטו את מעגל ההתנגדויות התרמיות של הדופן, מהאוויר שבפנים לאוויר שבחוץ, וסמנו על כל התנגדות את מנגנון מעבר החום (הולכה או הסעה).
2. חשבו כל אחת מההתנגדויות ואת ההתנגדות התרמית הכוללת $R_{th,total}$ של כל הגג ($A = 180\ m^2$). באיזו שכבה ההתנגדות הגדולה ביותר, ומה זה מלמד על תפקיד שכבת האוויר?
3. חשבו את הספק החום $\dot{Q}$ [W] שבורח מהחממה בלילה.
4. חשבו את טמפרטורת המשטח הפנימי של הגג. האם יתעבו עליו טיפות? נמקו.
5. חשבו את האנרגיה שבורחת במשך לילה אחד ב־kWh, ואת עלות החימום ללילה.

סעיף ב: לוח יחיד או כפול?

10 נקודות

השכן של החקלאי בנה חממה זהה, אבל עם לוח פוליקרבונט **יחיד** בעובי 4 mm, "כי זה זול יותר".

1. חשבו את הספק החום שבורח מהחממה של השכן, ופי כמה הוא גדול מזה של הלוח הכפול.
2. חשבו את טמפרטורת המשטח הפנימי אצל השכן. הסבירו בעזרת התוצאה מאיפה מגיעות הטיפות שמטפטפות על השתילים.

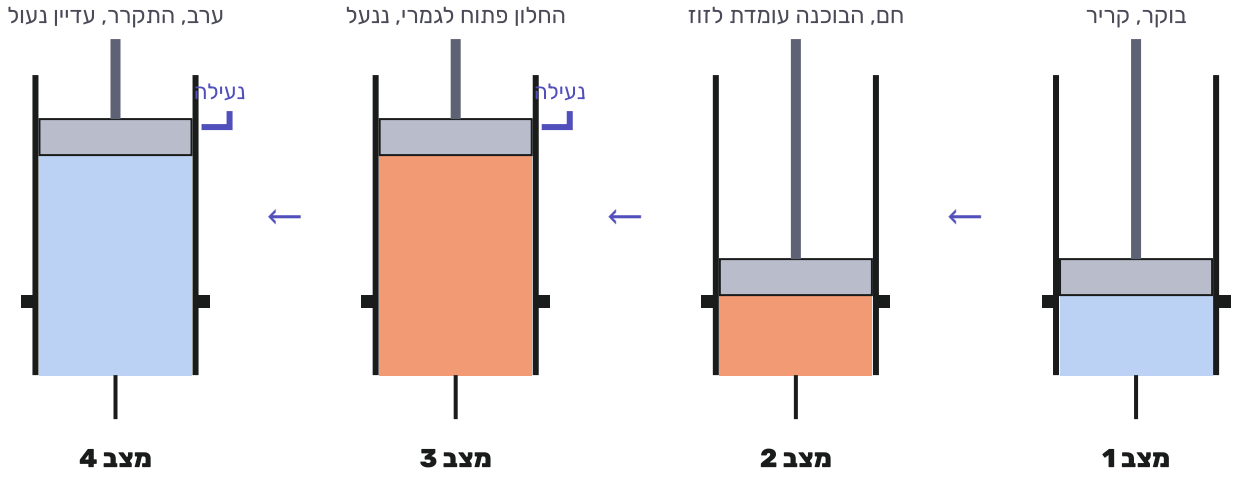
סעיף ג: קרינה

10 נקודות

1. ביום, הפוליקרבונט שקוף לאור השמש, אבל החממה מתחממת מעבר לטמפרטורת האוויר בחוץ. הסבירו את "אפקט החממה" במונחים של אורך גל הקרינה שנכנסת ושל הקרינה שהצמחים והקרקע פולטים.
2. החקלאי שוקל לפרוש בלילות "מסך תרמי": יריעה שצד אחד שלה מצופה אלומיניום מבריק. לאיזה כיוון צריך לפנות הצד המבריק, ולמה? הסבירו בעזרת המושגים בליעה, החזרה ופליטה.
3. את המיכל של פותחן החלון (חלק II) צבעו בשחור מט. מה היה קורה אילו צבעו אותו בלבן? נמקו.

חלק II: פותחן החלון הסולארי

איך זה עובד. מיכל אוויר שחור סגור, יחד עם הגליל והצינור, מכיל אוויר בנפח כולל של 40 L כשהבוכנה בתחתית הגליל. הבוכנה נשענת על **עוצרים** בתחתית, ומוט שמחובר אליה דוחף את חלון האוורור. משקל החלון ומנגנון הזרועות לוחצים על הבוכנה בכוח קבוע כלפי מטה. השמש מחממת את המיכל, האוויר מתחמם, ו... החלון נפתח.



תרשים 3: ארבעת מצבי הפותחן, מימין לשמאל (הגליל מוצג לבד; המיכל מחובר מתחת). כחול: אוויר קר. כתום: אוויר חם. עוצרים שחורים בתחתית, נעילה סגולה למעלה.

נתון	ערך
נפח האוויר הכולל (מיכל, צינור וגליל) כשהבוכנה על העוצרים	V_1 = 40 L
קוטר הבוכנה	D = 10 cm
מהלך הבוכנה מהעוצרים ועד שהחלון פתוח לגמרי	L = 25 cm
הכוח שהחלון והזרועות מפעילים על הבוכנה כלפי מטה (קבוע לאורך כל המהלך)	F = 120 N
לחץ אטמוספרי (פועל על הצד העליון של הבוכנה)	P_atm = 1 bar = 100 kPa
מצב 1, בוקר: המנומטר על המיכל מראה	0 bar (gauge), t_1 = 27°C
טמפרטורה מרבית שאטם הבוכנה עומד בה	95°C
אוויר: קבוע הגז	R = 287 J/(kg•K)
אוויר: קיבול חום סגולי בנפח קבוע	c_v = 717.5 J/(kg•K)
אוויר: קיבול חום סגולי בלחץ קבוע	c_p = 1004.5 J/(kg•K)
אוויר: יחס קיבולי החום	k = 1.4

הזניחו את משקל הבוכנה עצמה ואת החיכוך. האוויר הוא גז אידיאלי, וכל האוויר במערכת נמצא בכל רגע באותו לחץ ובאותה טמפרטורה.

סעיף ד: מתי החלון מתחיל להיפתח?

14 נקודות

1. מהו הלחץ המוחלט במצב 1? חשבו את מסת האוויר הכלואה במערכת.
2. חשבו את שטח הבוכנה, ואת הלחץ המוחלט P_2 שבו הבוכנה מתחילה לזוז. רמז: מאזן הכוחות על הבוכנה. מה יראה המנומטר ברגע זה?
3. מהו סוג התהליך 2→1? נמקו. חשבו את T_2 במעלות צלזיוס.
4. חשבו את החום Q_{12} שהשמש העבירה לאוויר, ואת העבודה W_{12}.

סעיף ה: החלון נפתח

16 נקודות

השמש ממשיכה לחמם, והבוכנה עולה לאט את כל המהלך עד שהחלון פתוח לגמרי (מצב 3). שם תפס נעילה (תרשים 3) מחזיק את הבוכנה למעלה.

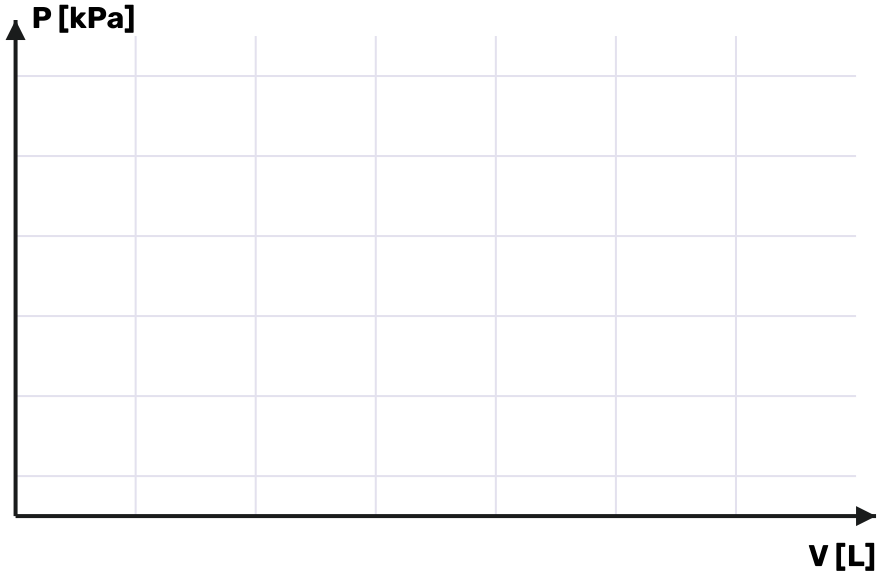
1. מהו סוג התהליך 3→2? נמקו בעזרת מאזן הכוחות על הבוכנה.
2. חשבו את V_3 ואת T_3. האם האטם עומד בטמפרטורה?
3. חשבו את העבודה W_{23}, את שינוי האנרגיה הפנימית ΔU_{23} ואת החום Q_{23}. בדקו את החוק הראשון.
4. העבודה שהושקעה בהרמת החלון עצמו היא $F \cdot L$. חשבו אותה והשוו ל־W_{23}. לאן הלך שאר העבודה?

סעיף ו: הערב, והמחזור נסגר

16 נקודות

בערב השמש שוקעת. הנעילה מחזיקה את החלון פתוח לאוורור, והאוויר מתקרר עד 27°C (מצב 4). אז הנעילה משתחררת, ומנוע קטן סוגר את החלון **לאט מאוד**, כך שהאוויר נשאר בטמפרטורת הסביבה, 27°C, עד שהבוכנה חוזרת לעוצרים (מצב 1). למחרת בבוקר הכל מתחיל מחדש.

1. מהם סוגי התהליכים 4→3 ו־1→4? נמקו. חשבו את P_4.
2. חשבו ΔU, W, Q לשני התהליכים, ומלאו טבלה מסכמת של ארבעת התהליכים.
3. שרטטו את המחזור בדיאגרמת P-V (על הצירים שבתרשים 4), עם ערכי הלחץ והנפח בכל נקודה וחצים שמראים את הכיוון.
4. הראו שבמחזור מתקיים $\Sigma Q = \Sigma W$. חשבו את העבודה נטו של המחזור, ואת היחס בינה לבין החום שנכנס מהשמש. האם זה "מנוע" טוב? האם זה משנה לחקלאי?



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

סעיף ז: סופת רוח

7 נקודות

יום אחד, כשהחלון פתוח ונעול במצב 3, משב רוח חזק שובר את תפס הנעילה וטורק את החלון. הבוכנה נדחפת בבת אחת חזרה לעוצרים, תוך שבריר שנייה.

1. איזה תהליך מתאים לתאר את הדחיסה המהירה הזו? נמקו מדוע אין זמן למעבר חום.
2. חשבו את הלחץ ואת הטמפרטורה בסוף הדחיסה. השוו לדחיסה איטית מאוד בטמפרטורה קבועה מאותו מצב 3. האם האטם בסכנה?

סעיף ח: שיפור התכנון

5 נקודות

"החלון נפתח מאוחר מדי. אני רוצה שהוא יתחיל להיפתח כשהאוויר במיכל מגיע ל־50°C, בלי לבנות מערכת חדשה."

הציעו שתי דרכים לעשות זאת: אחת שמשנה את הכוח על הבוכנה (משקולת נגד), ואחת שמשנה את מילוי האוויר בבוקר. לכל דרך חשבו את הערך הנדרש: את הכוח החדש על הבוכנה, או את הלחץ שיש למלא בבוקר (מוחלט ובמנומטר).

דף נוסחאות

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

הולכה: $R = \Delta x / (k \cdot A)$

הסעה: $R = 1 / (h \cdot A)$

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

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

$A = \pi \cdot D^2 / 4 \bullet P = F / A$

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

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

נפח קבוע: $Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T \bullet W = 0$

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

אדיאבטי: $T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{k-1}$ • $P \cdot V^k = \text{const}$

אדיאבטי: $W = (P_1V_1 - P_2V_2)/(k-1)$

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

$1\ \text{bar} = 10^5\ \text{Pa}$ • $1\ \text{L} = 10^{-3}\ \text{m}^3$

בהצלחה!