מבחן בתרמודינמיקה ומעבר חום

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

שם: _____ כיתה: _____ תאריך: _____

הנחיות

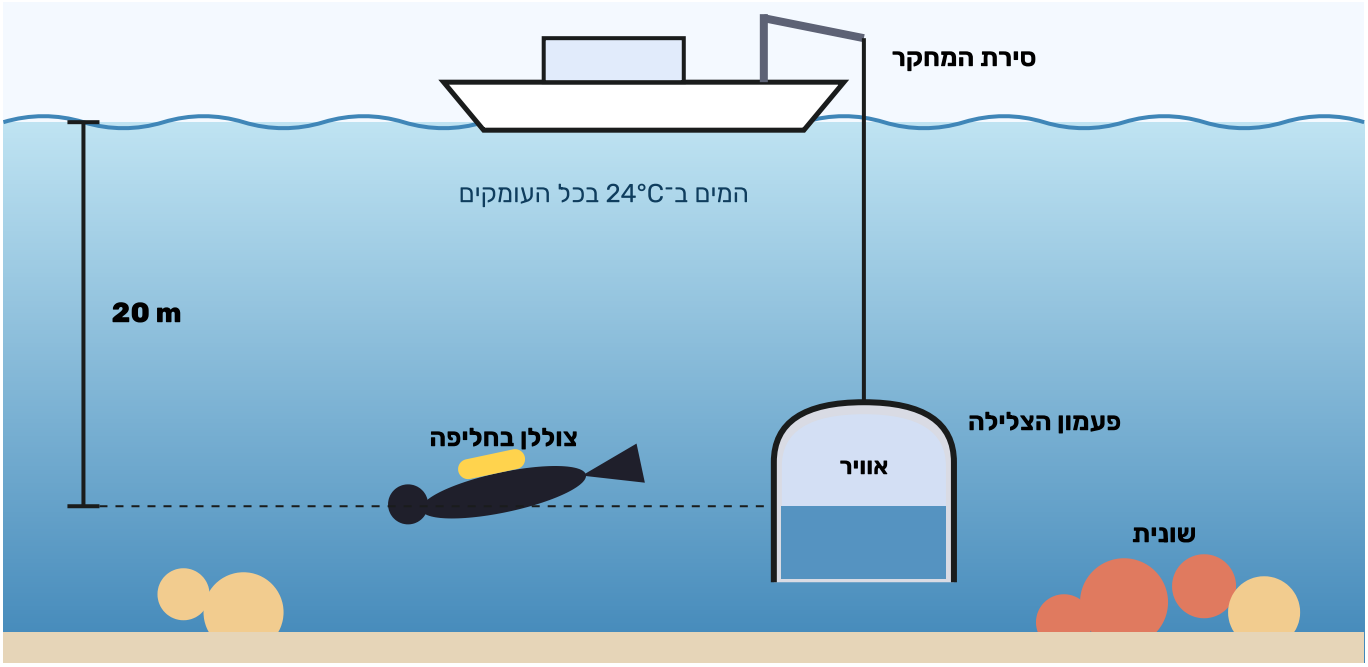
- משך המבחן: 90 דקות. מותר מחשבון. דף נוסחאות בסוף השאלון.
- הראו את כל שלבי החישוב, כתבו יחידות בכל תוצאה, ונמקו כל בחירה של סוג תהליך.
- טמפרטורות בנוסחאות של גז: בקלווין, $T = t + 273$. לחצים בנוסחאות: לחץ מוחלט.

שאלה 1: פרויקט "פעמון השונית" (100 נקודות)

רקע. אתם צוות ההנדסה של מעבדת מחקר ימית באילת. החוקרים רוצים לעבוד שעות ליד שונית האלמוגים בעומק 20 m, ולשם כך תכננו **פעמון צלילה**: כיפה מפלדה, פתוחה מלמטה, שמורידים מסירה בכבל. בתוך הפעמון כלוא אוויר, והצוללנים יכולים להיכנס אליו, להוריד את מסכת הנשימה ולדבר.

יש שתי בעיות: הצוללנים **מתקררים** מהר בעומק, למרות חליפת הצלילה, ובעליות מהירות לפני השטח **מתמלא הפעמון בערפל**.

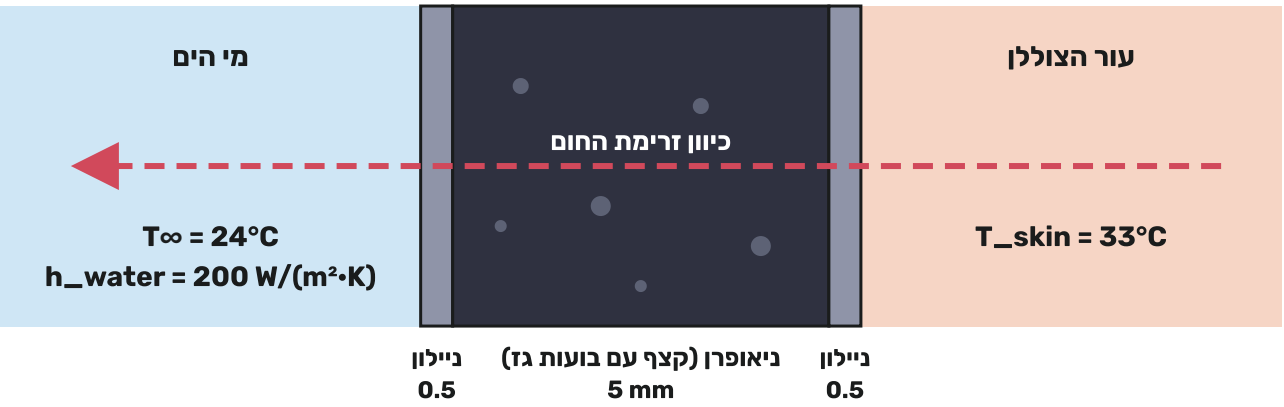
המשימה שלכם: לנתח את מעבר החום דרך חליפת הצלילה, ואת התהליכים שעובר האוויר בפעמון בירידה, בעבודה בעומק ובעלייה.



תרשים 1: סירת המחקר, הכבל ופעמון הצלילה בעומק 20 m. האוויר כלוא בחלק העליון של הפעמון, ומתחתיו מים.

חלק I: חליפת הצלילה

חליפת צלילה "רטובה" עשויה ניאופרן: גומי מוקצף, מלא בועות גז זעירות. משני צדי הניאופרן יש שכבת בד ניילון דקה. העור של הצוללן ב־33°C, והמים סביבו ב־24°C. שטח הגוף $A = 1.8\ \text{m}^2$.



תרשים 2: שכבות החליפה, מהעור (ימין) אל המים (שמאל). העובי בשכבות הניילון ב־mm. הניחו שהעור נוגע ישירות בבד.

נתון	ערך
מקדם מוליכות של ניאופרן	$k = 0.054\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$
מקדם מוליכות של בד ניילון	$k = 0.25\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$
מקדם הסעה למים סביב צוללן ששוחה	$h = 200\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$
החום שהגוף מייצר במנוחה	$100\ \mathrm{W}$
מסת הצוללן	$75\ \mathrm{kg}$
קיבול חום סגולי של הגוף	$3500\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$
צפיפות מי ים	$\rho = 1025\ \mathrm{kg/m^3}$
תאוצת הכובד	$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$

סעיף א: חליפה ליד פני המים

20 נקודות

1. שרטטו את מעגל ההתנגדויות התרמיות מהעור אל המים, וסמנו את המנגנון של כל התנגדות.
2. חשבו את ההתנגדויות ואת ההתנגדות הכוללת לכל הגוף. איזה אחוז ממנה נותן הניאופרן?
3. חשבו את הספק החום שהצוללן מאבד כשהוא שוחה ליד פני המים. האם הגוף ($100\ \mathrm{W}$) מחזיק מעמד?
4. חשבו את הספק החום שהיה מאבד בלי חליפה בכלל, ופי כמה הוא גדול יותר. למה מים "מקררים" הרבה יותר מאוויר באותה טמפרטורה?

סעיף ב: חליפה בעומק 20 מטר

12 נקודות

בעומק, לחץ המים מכווץ את בועות הגז שבניאופרן. הניחו שעובי הניאופרן קטן ביחס הפוך ללחץ, כמו נפח של גז בטמפרטורה קבועה, ושמקדם המוליכות שלו לא משתנה.

1. חשבו את הלחץ המוחלט בעומק 20 m, ואת עובי הניאופרן שם.
2. חשבו את הספק החום שהצוללן מאבד בעומק.
3. צלילה בעומק נמשכת 30 דקות. חשבו את החום שהגוף מאבד מעבר למה שהוא מייצר, ובכמה מעלות תרד הטמפרטורה הממוצעת של הגוף. מה תמליצו לחוקרים?

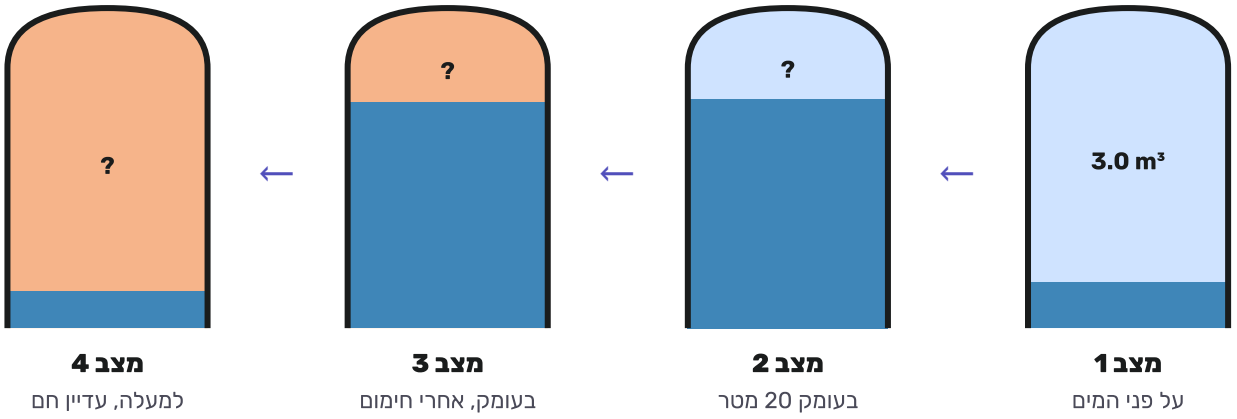
סעיף ג: קרינה

8 נקודות

1. בחישובים מתחת למים התעלמנו לגמרי מקרינה. למה זה מוצדק? רמז: מה קורה לקרינה תרמית (אינפרא־אדום) במים?
2. אחרי הצלילה, על סיפון הסירה, עוטפים צוללן קר ב"שמיכת הצלה" דקה, מצופה מתכת מבריקה. איזה מנגנון מעבר חום היא עוצרת בעיקר, ולמה צד מבריק מתאים לזה?

חלק II: פעמון הצלילה

איך זה עובד. הנפח הפנימי של הפעמון הוא 3.5 m³. בתחילת היום הפעמון שקוע מעט, ובחלקו העליון כלוא 3.0 m³ אוויר בלחץ אטמוספרי. הפעמון פתוח מלמטה, ולכן לחץ האוויר בו שווה בכל רגע ללחץ המים בגובה פני המים שבתוך הפעמון. כשהלחץ עולה, האוויר מתכווץ ומים נכנסים מלמטה. כמות האוויר לא משתנה, כל עוד האוויר לא "גולש" החוצה מתחת לשפת הפעמון.



תרשים 3: ארבעת מצבי האוויר בפעמון, מימין לשמאל. כחול בהיר: אוויר ב־24°C. כתום: אוויר שחומם. כחול כהה: מים שנכנסו מלמטה.

נתון	ערך
נפח פנימי של הפעמון	3.5 m³
מצב 1, על פני המים: נפח האוויר	V_1 = 3.0 m³
לחץ אטמוספרי	P_atm = 100 kPa
טמפרטורת המים בכל העומקים	24°C
טמפרטורת האוויר אחרי חימום בעומק	34°C
לחץ בעומק h מתחת לפני הים	P = P_atm + ρ•g•h
אוויר: קבוע הגז	R = 0.287 kJ/(kg•K)
אוויר: קיבול חום סגולי בנפח קבוע	c_v = 0.7175 kJ/(kg•K)
אוויר: קיבול חום סגולי בלחץ קבוע	c_p = 1.0045 kJ/(kg•K)
אוויר: יחס קיבולי החום	k = 1.4

סעיף ד: הירידה לעומק

12 נקודות

הסירה מורידה את הפעמון לאט, במשך רבע שעה, עד שפני המים שבתוכו נמצאים בעומק 20 m.

1. חשבו את מסת האוויר בפעמון.
2. מהו סוג התהליך 2→1? נמקו בעזרת נתון טמפרטורת המים.
3. חשבו את V_2, וכמה מים נמצאים עכשיו בתוך הפעמון.
4. חשבו W_{12} ו־Q_{12}, והסבירו את הסימנים.

סעיף ה: עבודה בעומק

10 נקודות

בעומק, הצוללנים מדליקים בפעמון פנסים וגוף חימום, והאוויר מתחמם ל־34°C. הפעמון תלוי על הכבל בעומק קבוע.

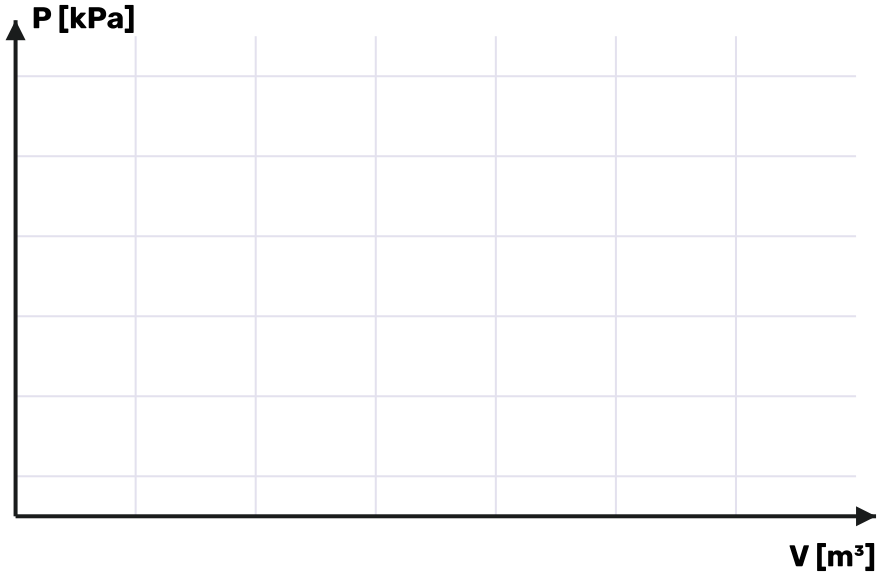
1. מהו סוג התהליך 3→2? נמקו.
2. חשבו את V_3, W_{23}, ΔU_{23} ו־Q_{23}, ובדקו את החוק הראשון.

סעיף ו: עלייה איטית, והמחזור נסגר

16 נקודות

בסוף היום מעלים את הפעמון לאט מאוד, וגוף החימום שומר על האוויר ב־34°C עד פני המים (מצב 4). על פני המים מכבים את החימום, והאוויר מתקרר חזרה ל־24°C: חזרה למצב 1.

1. מהם סוגי התהליכים 4→3 ו־1→4? חשבו את V_4. האם אוויר "גולש" החוצה מהפעמון?
2. חשבו Q, W, ΔU לשני התהליכים, ומלאו טבלה מסכמת של ארבעת התהליכים.
3. שרטטו את המחזור בדיאגרמת P-V (תרשים 4), עם ערכים בכל נקודה וחצים.
4. הראו ש־$\Sigma Q = \Sigma W$, וחשבו את העבודה נטו של המחזור.



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

סעיף ז: עלייה מהירה וערפל

14 נקודות

יום אחד, ממצב 3, מפעיל הכבל מושך את הפעמון אל פני המים בתוך שניות ספורות.

1. אילו העלייה הייתה אדיאבטית לגמרי, מה היו הטמפרטורה והנפח של האוויר על פני המים?
2. במציאות יש מעט מעבר חום, והתהליך פוליטרופי עם $n = 1.2$. חשבו את הטמפרטורה, את הנפח, את העבודה ואת החום בתהליך. לאיזה כיוון עובר החום?
3. הסבירו למה בעלייה מהירה הפעמון מתמלא בערפל, ולמה זה לא קורה בעלייה האיטית של סעיף ו.

סעיף ח: לרדת עמוק יותר?

8 נקודות

"אנחנו רוצים לרדת ל־40 מטר ולחמם את הפעמון יותר. כמה אוויר יגלוש החוצה כשנעלה?"

1. בעלייה איטית בטמפרטורה קבועה (כמו בסעיף ו), הראו שנפח האוויר על פני המים לא תלוי בעומק שאליו ירדו. מה כן קובע אותו?
2. מהי הטמפרטורה המרבית שאפשר לחמם אליה את האוויר בעומק, בלי שאוויר יגלוש החוצה בעלייה האיטית?

דף נוסחאות

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

הולכה: $R = \Delta x / (k \cdot A)$ • הסעה: $R = 1 / (h \cdot A)$

$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ • $E = Q \cdot t$

לחץ במים: $P = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$

$P \cdot V = m \cdot R \cdot T$

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

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

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

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

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

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

בהצלחה!