לימודי רפואה באיטליה אוניברסיטת ברשה

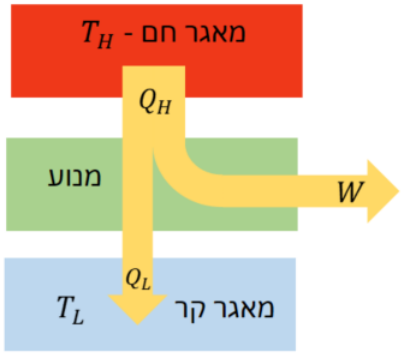
פרק 27 - החוק השני של התרמודינמיקה

תוכן העניינים

1. הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום 1
2. תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו 4
3. מקררים מזגנים ומשאבות חום 7
4. אנטרופיה 9
5. סיכום ..... (ללא ספר)
6. פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני 13

הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
 $Q_H = W + Q_L$	Q_H - כמות החום שיוצאת מהמאגר החם. Q_L - כמות החום שנכנסת אל המאגר הקר. W - העבודה שהמנוע מבצע על הסביבה.	שימו לב לסימנים! כל הסימנים חיוביים! T_H ו-T_L נקראות טמפרטורות העבודה
$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$		

שאלות:

1) דוגמה - נצילות של מנוע מכונית

למנוע של מכונית יש נצילות של 20%. המנוע מפיק 25kJ של עבודה כל שניה.

א. כמה חום דרוש להכניס למנוע כל שניה?

ב. כמה חום נפלט מהמנוע כל שניה?

2) חישוב נצילות של מנוע חום

מנוע חום פולט 6900J של חום כאשר הוא מבצע עבודה של 2300J.

מה הנצילות של המנוע באחוזים?

3) חום שפולטת תחנת כוח

תחנת כוח מייצרת 560MW של הספק חשמלי.

העריכו את החום שנפלט כל שניה אם הנצילות של התחנה היא 35%.

4) מנוע 6 צילינדרים

למנוע עם 6 צילינדרים של אוטו יש נצילות של 24%. המנוע מספק 180J של עבודה בכל מחזור עבור כל צילינדר. המנוע עושה 25 מחזורים בשניה.

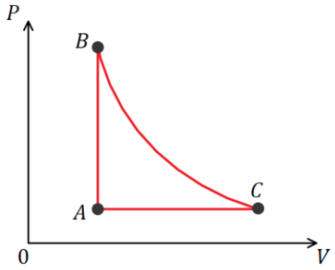
א. מהי העבודה הכוללת שמבצע המנוע בשניה?

ב. מהו החום שנוצר משריפת הדלק כל שניה?

ג. אם האנרגיה הנוצרת מדלק היא 32MJ לליטר, לכמה זמן מחזיק מיכל דלק מלא המכיל 40 ליטר דלק?

5) מנוע הפיך עם גז ארגון

מנוע הפיך מכיל 1.00mol של גז ארגון, גז מונואטומי כמעט אידיאלי.
התהליך שעובר המנוע מתואר באיור כאשר הגז בהתחלה בנקודה A ב-STP. הנקודות B ו-C נמצאות על עקומה איזותרמית בטמפרטורה $T = 433K$.
התהליך AB הוא תהליך בנפח קבוע והתהליך AC הוא תהליך בלחץ קבוע.

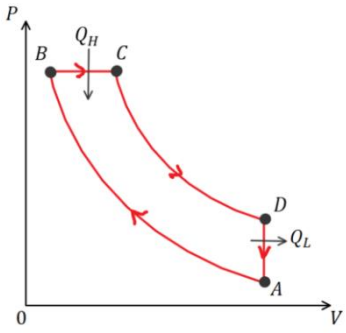


א. האם המנוע מבצע את התהליך באיור עם כיוון השעון או נגד השעון?

ב. מהי הנצילות של המנוע?

6) מנוע בנזין אידיאלי

אפשר לתאר את הפעולה של מנוע דיזל בקירוב על ידי התהליך המחזורי באיור.
אוויר נשאב לצילינדר בפעימת יניקה (לא חלק מהמחזור באיור).
האוויר נדחס אדיאבטית, שלב AB.
בנקודה B דלק דיזל מוזרק לתוך הצילינדר.
הדלק נשרף ישר כי הטמפרטורה מאוד גבוהה.
הבעירה היא יחסית איטית ובמהלך החלק הראשון של פעימת העבודה הגז מתפשט כמעט בנפח קבוע, שלב BC.
בשלב השני של פעימת העבודה, אחרי שהבעירה מסתיימת, הגז מתפשט אדיאבטית, שלב CD.
שלב DA מתאר את פעימת הפליטה.



א. הראה שעבור מנוע שעובר את התהליך הנ"ל עם גז אידיאלי הנצילות האידיאלית היא: $\eta = 1 - \frac{(V_A/V_C)^{-\gamma} - (V_A/V_B)^{-\gamma}}{\gamma[(V_A/V_C)^{-1} - (V_A/V_B)^{-1}]}$.

V_A/V_B נקרא יחס הדחיסה ו-V_A/V_C נקרא יחס התרחבות "expansion ratio".

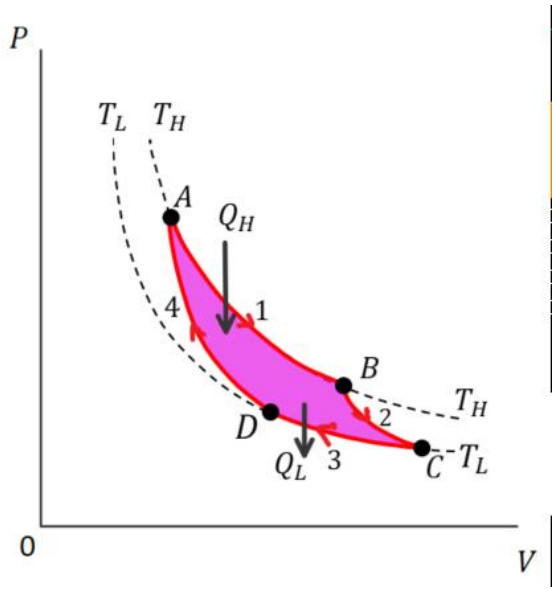
ב. חשב את הנצילות אם הגז הוא דו אטומי, $V_A/V_B = 16$ ו-$V_A/V_C = 4.5$.

תשובות סופיות:

1) א. 125kJ ב. 100kJ
2) 25%
3) 1000J
4) א. 27000J ב. 110000J ג. 3.2hr
5) א. עם השעון. ב. 9%
6) א. הוכחה. ב. 55%

תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו:

סיכום כללי:

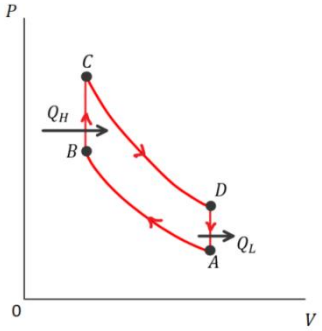
הנוסחה	תיאור	הערות
	מחזור קרנו	השטח שסגור בתוך הלולאה שווה לעבודה נטו שנעשית על ידי המנוע. מורכב מתהליכים הפיכים ולכן לא קיים במציאות, ניתן רק לשאוף אליו.
$\eta_{\text{קרנו}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	נצילות במנוע קרנו	נקראת גם נצילות אידיאלית או מקסימאלית

שאלות:

1) דוגמה - טענה לא הגיונית

יצרן רכב טוען כי במנוע שייצר קצב הכניסה של החום הוא 9.1kJ בטמפרטורה של 162°C וקצב הפליטה של החום הוא 4.1kJ בטמפרטורה של 22°C.
האם אתם מאמינים ליצרן?

2) דוגמה - נצילות של מנוע בעירה



המחזור של מנוע בעירה מתואר באיור.
הניחו שחומר העבודה הוא גז אידיאלי.

א. הראו כי הנצילות של המנוע היא: $\eta = 1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{1-\gamma}$.

ב. חשבו את הנצילות של המנוע אם יחס הדחיסה הוא: $\frac{V_A}{V_B} = 7.0$ והגז הוא דואטומי בדומה ל-O_2 או N_2.

3) מנוע חום עם חנקן נוזלי



זה לא הכרחי שהמאגר החם של מנוע חום יהיה יותר חם מהסביבה. חנקן נוזלי זול בערך כמו בקבוק מים והטמפרטורה שלו היא בערך $77K$.
מה תהיה הנצילות המקסימאלית של מנוע הפועל בין הטמפרטורה של חנקן נוזלי לטמפרטורת החדר $293K$?

4) מנוע 1100W

מנוע קרנו פועל בטמפרטורות $190°C$ ו- $25°C$. ההספק של המנוע הוא $1100W$.
כמה חום פולט המנוע כל שניה?

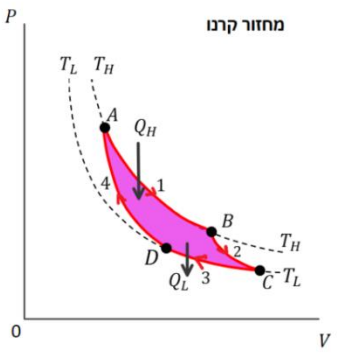
5) מטפס הרים

הניחו שאדם ששוקל $70kg$ צריך $4.3 \cdot 10^3 kcal$ של אנרגיה בשביל יום אחד של פעילות.
העריכו את הגובה המקסימאלי שאותו אדם יכול לטפס על הר עם כמות זו של אנרגיה.
כהערכה גסה אפשר להתייחס לאדם כמנוע הפועל בין טמפרטורות הגוף $37°C$ לטמפרטורת הסביבה $20°C$.

6) טמפרטורת עבודה בנסיעה

מכונית מייצרת עבודה בקצב של בערך $7\frac{kJ}{sec}$ כאשר היא נוסעת במהירות קבועה של $25\frac{m}{sec}$ בכביש אופקי, זוהי עבודה כנגד כוח החיכוך.
המכונית יכולה לנסוע $14km$ לכל ליטר דלק.
מה הערך המינימלי של T_H אם $T_L = 25°C$ והאנרגיה הזמינה מליטר אחד של דלק היא: $3.2 \cdot 10^7 J$?

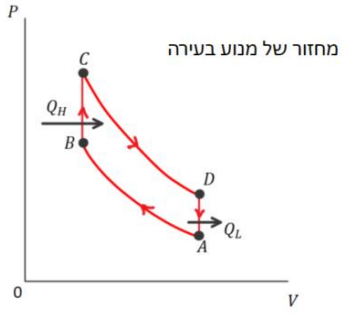
7) חישובים במחזור קרנו



מול אחד של גז מונואטומי עובר תהליך של מחזור קרנו,
כאשר $T_H = 380°C$ ו- $T_L = 180°C$.
הלחץ ההתחלתי הוא $7.8atm$.
במהלך ההתרחבות האיזותרמית הנפח מוכפל.

א. מהם הלחץ והנפח בנקודות: A, B, C, D?
ב. מצאו את Q , W ו-ΔE_{int} עבור כל שלב בתהליך.
ג. חשבו את הנצילות של המנוע באמצעות המשוואות: $\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$ ו- $\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$.

8) יחס דחיסה במנוע בעירה



במנוע שמתנהג בקירוב כמו המחזור של מנוע בעירה הדלק מוצת בסוף שלב הדחיסה האדיאבטית.
טמפרטורת ההצתה של דלק מסוג אוקטן 95 היא 280°C ובהנחה שחומר העבודה הוא גז שמגיע מהאוויר (דו אטומי בטמפרטורה 25°C) קבעו מהו יחס הדחיסה המירבי $\frac{V_A}{V_B}$.

תשובות סופיות:

1) לא.

2) א. הוכחה. ב. 54%

3) 74%

4) 5000J

5) 1400m

6) 400°K

7) א. $P_A = 7.9\cdot10^5 Pa$, $V_A = 0.69\cdot10^{-2} m^3$, $P_B = 4\cdot10^5 Pa$, $V_B = 1.4\cdot10^{-2} m^3$, $P_C = 1.6\cdot10^5 Pa$, $V_C = 2.4\cdot10^{-2} m^3$, $P_D = 3.2\cdot10^5 Pa$, $V_D = 1.2\cdot10^{-2} m^3$

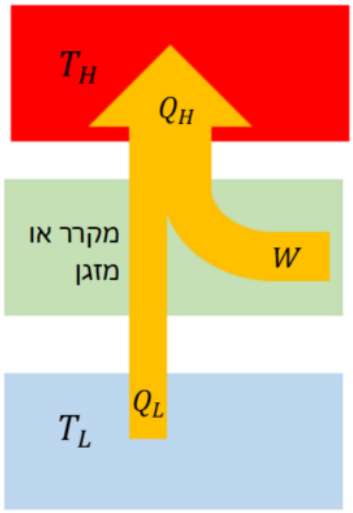
ב. $\Delta Eint_{AB} = 0$, $Q_{AB} = W_{AB} = 3800J$, $\Delta Eint_{BC} = -2500J$, $Q_{BC} = 0$, $W_{BC} = 2500J$, $\Delta Eint_{CD} = 0$, $Q_{CD} = W_{CD} = -2600J$, $\Delta Eint_{DA} = 2500J$, $Q_{DA} = 0$, $W_{DA} = -2500J$

ג. $\eta = 31\%$

8) 7.1

מקררים מזגנים ומשאבות חום:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$COP = \frac{Q_L}{w} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$	מקדם היעילות של מקרר או מזגן	
$COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$	עבור מקרר או מזגן אידיאלי (לא מושלם)	
$COP = \frac{Q_H}{W}$	מקדם היעילות של משאבת חום	תמיד גדול מאחד

שאלות:

1) דוגמה - מכינים קרח

למקפיא יש מקדם יעילות של 3.6 והוא עובד בהספק של 200W.
כמה זמן ייקח למקפיא להקפיא מגש קוביות קרח אם המגש הוכנס למקרר המכיל 400gr מים ב-0°C?

2) דוגמה - משאבת חום

למשאבת חום מקדם יעילות של 3.0 והספק של 1200W.

א. כמה חום היא מוסיפה לחדר כל שניה?

ב. אם הופכים את פעולת המשאבה בקיץ כך שתשמש כמזגן, מה תצפו שיהיה מקדם היעילות שלה?

3) מקדם יעילות של מקרר אידיאלי

מקרר אידיאלי מחזיק את הטמפרטורה בתוכו ב-$4°C$ כאשר הטמפרטורה בבית היא $25°C$. מהו מקדם היעילות של המקרר?

4) מנוע קרנו עובד הפוך

למנוע אידיאלי (מנוע קרנו) יש נצילות של 37%.
אם היה אפשר להפעיל את המנוע הפוך כך שיעבוד בתור משאבת חום, מה היה מקדם היעילות של המנוע?

5) מקרר קרנו אידיאלי מקפיא מים

"מקרר קרנו" (מנוע קרנו שעובד הפוך) מוציא חום מתא ההקפאה הנמצא בטמפרטורה של $-15°C$ ופולט אותו לחדר בטמפרטורה של $25°C$.

א. הראו כי אם מקדם היעילות של מקרר מוגדר לפי: $COP = \frac{Q_L}{W}$
אז מקדם היעלות של מקרר קרנו הוא: $COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$.

ב. כמה עבודה מבצע המנוע לשנות $0.6kg$ של מים ב-$25°C$ לקרח ב-$-15°C$?
אם ההספק של המדחס במנוע הוא $160W$, מהו הזמן המינימלי הדרוש להקפיא מים מטמפרטורה של $25°C$ לקרח ב-$0°C$?

6) משאבת חום לא אידיאלית

משאבת חום פועלת כמזגן ושומרת את הטמפרטורה בתוך הבניין על $24°C$ כאשר הטמפרטורה בחוץ היא $40°C$.
בשביל לבצע זאת המשאבה שואבת $3 \cdot 10^7 J$ חום בשעה מתוך הבניין ביעילות של 25% מהיעילות האידיאלית (זו של מקרר קרנו).

א. מהו מקדם היעילות של המשאבה?

ב. מהו ההספק של המדחס במשאבה? רשום תשובה בכוח סוס.

תשובות סופיות:

1) בערך 3 דקות.

2) א. $4600J$ ב. 2

3) 13

4) 2.7

5) א. הוכחה. ב. $4.4 \cdot 10^4 J$

6) א. 4.6 ב. $2.4HP$

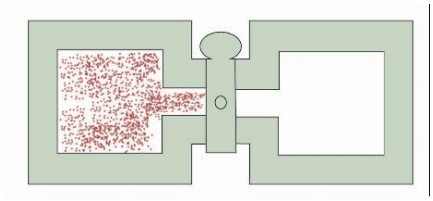
אנטרופיה:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$\Delta S = \frac{Q}{T}$	Q - כמות החום שנכנסת למערכת	רק בטמפרטורה קבועה ובתהליך הפיך T - בקלווין!
השינוי באנטרופיה לא תלוי בתהליך	האנטרופיה היא משתנה מצב של המערכת	

שאלות:

1) **דוגמה - שינוי באנטרופיה כשמערבבים מים**
מערבבים $5kg$ מים ב-$20°C$ עם $5kg$ מים ב-$24°C$.
א. מה תהיה הטמפרטורה הסופית של המים המעורבבים?
ב. העריכו את השינוי באנטרופיה של כל המערכת.

2) **דוגמה - שינוי באנטרופיה בהתפשטות חופשית**

גז מתפשט בצורה אדיאבטית וחופשית (כפי שמתואר בפרק הקודם בסרטון התפשטות חופשית) מנפח V_1 לנפח V_2.
א. חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז.
ב. מהו השינוי באנטרופיה של הסביבה?
ג. הערך את השינוי באנטרופיה עבור $n = 1.00$ ו-$V_2 = 2.00V_1$.

3) **דוגמה - נחושת חמה נזרקת לתוך אגם**
גוש נחושת חם בעל מסה של $2.00kg$ בטמפרטורה של $T_1 = 840°K$ נזרק לאגם גדול בטמפרטורה של $T_2 = 280°K$.
הניחו כי האגם מספיק גדול כך שהטמפרטורה שלו לא משתנה באופן מהותי.
מהו השינוי באנטרופיה של:
א. הנחושת.
ב. האגם.
ג. הכולל.

4) דוגמה - קוביית קרח נמסה

קוביית קרח במסה של $1.00kg$ ובטמפרטורה של $0°C$ נמצאת במגע עם מאגר חום גדול שהטמפרטורה שלו היא מעט מעל $0°C$.
כתוצאה מכך הקרח נמס מאוד לאט למים.
מה השינוי באנטרופיה של:

א. הקרח.

ב. המאגר.

5) שינוי באנטרופיה של מים שהופכים לאדים

מהו השינוי באנטרופיה של $150gr$ של מים ב-$100°C$ שהופכים לאדים ב-$100°C$?

6) קופסה מחליקה על משטח עם חיכוך

קופסה בעלת מסה של $6.5kg$ מחליקה על משטח אופקי לא חלק (קיים חיכוך קינטי).
חשבו את השינוי באנטרופיה של היקום מתחילת תנועתה של הקופסה במהירות $5\frac{m}{sec}$ ועד לעצירתה. הניחו שכל הגופים נמצאים בטמפרטורת החדר $293K$.

7) מים מתקררים ממאגר קרח

$1.0L$ של מים ב-$0°C$ נמצאים במגע עם כמות גדולה של קרח ב-$-10°C$.
כתוצאה מכך המים קופאים ומתקררים גם ל- $-10°C$.
חשבו את השינוי הכולל באנטרופיה.

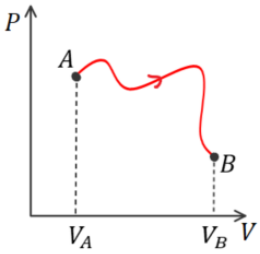
8) מוט ברזל נזרק למים

מוט ברזל בעל מסה של $1.8kg$ ובטמפרטורה של $43°C$ נזרק למיכל מים המצופה בקלקר.
המיכל מכיל $1.2kg$ מים בטמפרטורת החדר ($20°C$).
מהו השינוי הכולל באנטרופיה?

9) גז אידיאלי מתפשט איזותרמית

גז אידיאלי מתפשט איזותרמית $T = 350°K$ מנפח $2.30L$ ולחץ $6.9atm$ ללחץ $1.0atm$.
מהו השינוי באנטרופיה של הגז?

10) גז אידיאלי עובר תהליך מוזר



גז אידיאלי המכיל n מולים עובר את התהליך המתואר באיור.
הטמפרטורה בנקודות A ו-B זהה.
חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז בעקבות התהליך.
nV_B , V_A נתונים.

11) שני גזים מתערבבים

1.00mol של גז חנקן ו-1.00mol של גז חמצן נמצאים בתאים נפרדים, זהים בגודלם, באותה הטמפרטורה ומבודדים מהסביבה.
מחברים בין התאים והגזים (האידיאלים) מתערבבים.
מהו השינוי באנטרופיה של:

א. כל המערכת?
ב. של הסביבה?
ג. חזור על סעיף א' אם התא של אחד הגזים גדול פי שניים מהתא של השני.

12) קיבול חום מולרי משתנה

קיבול החום המולרי של אשלגן בטמפרטורות נמוכות משתנה עם הטמפרטורה לפי $C_V = \alpha T + \beta T^3$ כאשר $\alpha = 2.08\frac{mJ}{mol\cdot K^2}$ ו- $\beta = 2.57\frac{mJ}{mol\cdot K^4}$.
מצאו את השינוי באנטרופיה של 0.25mol של אשלגן כאשר הטמפרטורה שלו יורדת מ-4.0K ל-2.0K בתהליך בנפח קבוע.

תשובות סופיות:

1) א. $22°C$ ב. $1\frac{J}{k}$

2) א. $\Delta S = nR\ln\frac{V_2}{V_1}$ ב. $\Delta S = 0$ ג. $5.76\frac{J}{k}$

3) א. $-857\frac{J}{K}$ ב. $1560\frac{J}{K}$ ג. $703\frac{J}{K}$

4) א. $-1220\frac{J}{K}$ ב. $1220\frac{J}{K}$

5) $910\frac{J}{K}$

6) $0.28\frac{J}{K}$

7) $48\frac{J}{K}$

8) $2.2\frac{J}{K}$

9) $8.8\frac{J}{K}$

10) $nR\ln\frac{V_B}{V_A}$

11) א. $5.8\frac{J}{K}$ ב. 0 ג. $13\frac{J}{K}$

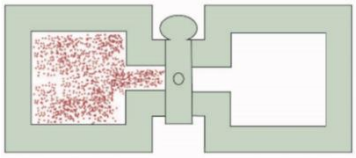
12) $-11\frac{mJ}{K}$

פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני:

סיכום כללי:

הנוסחה	תיאור	הערות
$S = k \ln \Omega$	k - קבוע בולצמן Ω - פונקציית המצבים המיקרוסקופיים	

שאלות:



1) דוגמה - התפשטות חופשית גישה סטטיסטית

השתמשו במשוואה של בולצמן לאנטרופיה וחשבו את השינוי באנטרופיה במקרה של התפשטות חופשית של מול אחד של גז אידיאלי מנפח V לנפח 2V.

הניחו ש-Ω אומרת את מספר המיקומים האפשריים של כל המולוקלות. השוו לחישוב שנעשה בדוגמה הקודמת של התפשטות חופשית באמצעות הנוסחה של קלאוזיוס.

2) אנטרופיה להטלת 4 מטבעות

השתמשו בפונקציית המצבים Ω וחשבו מה האנטרופיה בכל אחד מהמצבים המיקרוסקופיים שתוארו בדוגמה של הטלת 4 מטבעות.

המצב המיקרוסקופי	המצבים המיקרוסקופים המתאימים (H-ראש , T-זנב)	מספר המצבים המיקרוסקופים
4 ראש	HHHH	1
3 ראש, 1 זנב	THHH , HTHH , HHTH , HHHT	4
2 ראש, 2 זנב	TTHH , THTH , HTTH , THHT , HTHT , HHTT	6
1 ראש, 3 זנב	HTTT , THTT , TTHT , TTTH	4
4 זנב	TTTT	1

3) הטלת 5 מטבעות

דני לקח 5 מטבעות והטיל אותם בצורה אקראית על השולחן.

א. רשמו טבלה ובה את מספר המצבים המיקרוסקופים המתאימים לכל מצב מקרו.

ב. מהי ההסתברות שבהטלה יצאו 3 מטבעות ראש ו-2 זנב?

ג. מהי ההסתברות שכל המטבעות יפלו על זנב?

ד. מהי ההסתברות שבהטלה יפלו לפחות 3 מטבעות על זנב?

4) שינוי באנטרופיה בסידור 10 מטבעות

על שולחן ישנם 10 מטבעות כאשר 9 מתוכם נמצאים עם הראש כלפי מעלה ואחד עם הזנב כלפי מעלה. הופכים 3 מטבעות שהיו עם הראש כלפי מעלה.
מה השינוי באנטרופיה של המערכת?
השווה לשינוי באנטרופיה של מערכת תרמודינמית מאחד הדוגמאות הקודמות.

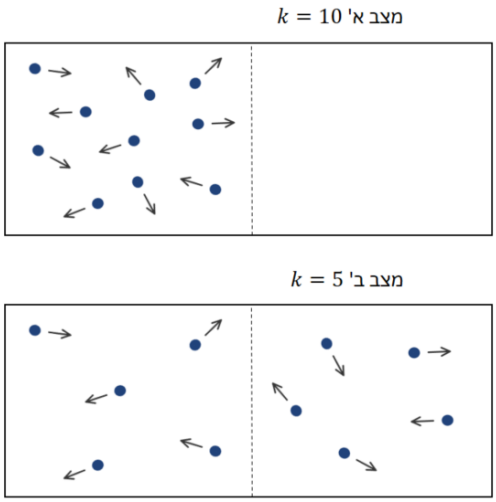
ניתן לחשב את פונקציית המצבים גם באמצעות מקדמי הבינום של ניוטון: $\frac{n!}{k!(n-k)!}$
כאשר n הוא מספר המטבעות ו-k מספר המטבעות עם הזנב (או הראש) כלפי מעלה.

5) גז עם 10 אטומים בתיבה

נניח שישנה מערכת דמויית גז המכילה $n = 10$ אטומים במהירויות זהות.
ה"גז" נמצא בתוך תיבה. נסמן את מספר האטומים הנמצאים בחציה השמאלי של התיבה ב-k. מספר האפשרויות לסדר את האטומים כך ש-k אטומים יהיו בחצי השמאלי הוא: $\frac{n!}{k!(n-k)!}$.
נניח כי כל ערך של k מסמל מצב מיקרוסקופי של המערכת.
במצב א' שבאיור כל 10 האטומים בצד שמאל של התיבה $(k = 10)$
ובמצב ב' שבאיור 5 בחצי הימני ו-5 בשמאלי $(k = 5)$.

א. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב א' למצב ב'?
האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?

ב. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב ב' למצב א'?
האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?



תשובות סופיות:

1) $R\ln(2)$

2)

המצב המיקרוסקופי	אנטרופיה
4 ראש	0
3 ראש, 1 זנב	$1.91\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$
2 ראש, 2 זנב	$2.47\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$
1 ראש, 3 זנב	$1.91\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$
4 זנב	0

3) א.

פונקציית המצבים Ω	המצבים המיקרוסקופיים	מצב מקרוסקופי
1	HHHHH	5-H , 0-T
5	HHHHT , HHHTH , HHTHH , HTHHH , THHHH	4-H , 1-T
10	HHHTT , HHTHT , HTHHT , THHHT , HHTTH HTTHH , THTHH , TTHHH , HTHTH , THHTH	3-H , 2-T
10	כמו 2-T , 3-H רק להחליף H ב-T	2-H , 3-T
5	כמו 1-T , 4-H רק להחליף H ב-T	1-H , 4-T
1	כמו 0-T , 5-H רק להחליף H ב-T	0-H , 5-T

ב. 31.25% ג. 3.125% ד. 50%

4) $4.2\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$

5) א. $7.63\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$, כן. ב. $-7.63\cdot10^{-23}\ \frac{J}{K}$, לא.