

אורגיה בהיבט רב-תחומי מנוע בעירה פנימית



31.5.2002

גלאוקר גיל
גיא ניר

מנוע בעירה פנימית

גלאובך גיל / גיא ניר

♣ מונחים בסיסים

(א) החוק הראשון והשני של התרמודינמיקה :

(1) החוק הראשון של התרמודינמיקה :

החוק מקשר בין שלושה מושגים: אנרגיה כוללת (E), עבודה (W) וחום (Q).

חוק זה דומה לחוק שימור האנרגיה, לפיו אנרגיה לא יכולה להיווצר או להעלם, היא רק יכולה לשנות צורה.

(2) החוק השני של התרמודינמיקה :

החוק השני נוסח ע"י צמד המדענים פלאנק-קלווין, ותוכנו הוא כדלקמן:

בלתי אפשרי לבנות מכונה, הפועלת במחזור, וקולטת חום ממקור חום יחיד והופכת לעבודה את כל כמות החום שקלטת. נובע מכך שאין כל אפשרות ליצור מכונה שנצילותה היא 100%.

(ב) תהליכים תרמודינמיים

מתוך משוואת המצב: $PV = nRT \Leftrightarrow \frac{PV}{T} = nR$ ידוע כי מכפלת n ב-R נותנת מספר קבוע, לכן ניתן לרשום

משוואה שממנה נובעים כל התהליכים התרמודינמיים $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$ בכל תהליך גורם אחד מתוך המשוואה

נשאר קבוע, ישנם כארבעה תהליכים תרמודינמיים עיקריים:

(1) איזוכורי – תהליך שבו הלחץ נשאר קבוע.

• הגדרת התהליך: $P_1 = P_2$

• קשר בין נפחים וטמפרטורות: $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$

• עבודה: $W = P(V_2 - V_1)$

• חום: $Q = mC_p(T_2 - T_1)$

• יישום החוק הראשון: $\Delta U = Q - W$

(2) איזוכורי – תהליך שבו הנפח נשאר קבוע, לדוגמא, סיר לחץ.

• הגדרת התהליך: $V_1 = V_2$

• קשר בין נפחים וטמפרטורות: $\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$

• עבודה: $W = 0$

• חום: $Q = mC_v(T_2 - T_1)$

• יישום החוק הראשון: $\Delta U = Q$

(3) **איזותרמי** – תהליך שבו הטמפרטורה נשארת קבועה, לדוגמא, תפוח אדמה בתוך מדורה, אין איבוד חום.

• הגדרת התהליך : $T = const \Rightarrow mRT = const \Rightarrow PV = const$

• קשר בין נפחים ללחצים : $P_1V_1 = P_2V_2$

• עבודה : $W = mRT \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$

• חום : $Q = W = mRT \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$

• יישום החוק הראשון : $\Delta U = 0 \Rightarrow Q = W$

(4) **אדיאבטי** – תהליך שבו אין מעבר חום $Q = 0$

• הגדרת התהליך : $P \cdot V^K = const \quad K = \frac{C_p}{C_v}$

• קשר בין לחצים לנפחים : $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^K$

• קשר בין לחצים לטמפרטורות : $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{K}{K-1}}$

• קשר בין נפחים לטמפרטורות : $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1}$

• עבודה : $W = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{K-1}$

• חום : $Q = 0$

• יישום החוק הראשון : $Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -W = mC_v(T_2 - T_1)$

(ג) **הגדרת הסימנים ויחידותיהם :**

$\Delta U(J)$ – הפרש – אנרגיה – פנימית $W(J)$ – עבודה $E(J)$ – אנרגיה $Q(J)$ – כמות – חום	$v\left(\frac{m^3}{Kg}\right)$ – נפח – סגולי $m(Kg)$ – מסת – הגז $R\left(\frac{J}{Kg^\circ K}\right)$ – קבוע – הגז	$P\left(\frac{N}{m^2}\right)$ – לחץ $T(^{\circ}K)$ – טמפרטורה $V(m^3)$ – נפח
$C_p\left(\frac{J}{Kg^\circ K}\right)$ – חום – סגולי – בלחץ – קבוע	$C_v\left(\frac{J}{Kg^\circ K}\right)$ – חום – סגולי – בנפח – קבוע	

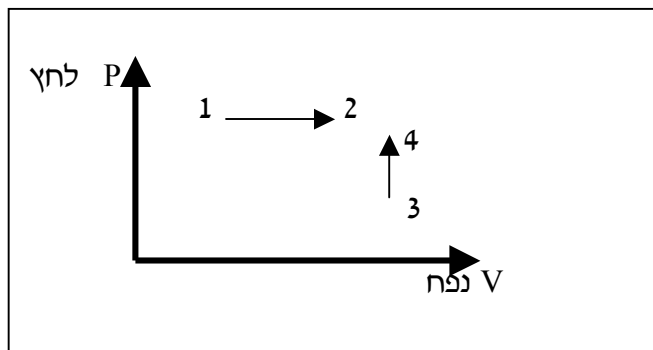
ד) דיאגרמת P-V

כאשר תכונה אחת או תכונות אחדות מתכונות המערכת, עוברות שינוי, אנו אומרים, שהמערכת עוברת תהליך.

נהוג לתאר תהליכים בסדרת גרפים, שכל אחד מהם דו-ממדי.

שתי התכונות המקובלות לשימוש בתיאור גרפי של תהליך הן הלחץ של המערכת ונפחה, כאשר הציר האופקי

מציין את הנפח והציר האנכי מתאר את הלחץ.



בתרשים הקודם ישנם שני וקטורים, כל אחד מהם מציין תהליך כלשהו, בין הנקודות 1 ל-2 בוצע תהליך בלחץ קבוע (איזוברי) ובעליה בנפח.

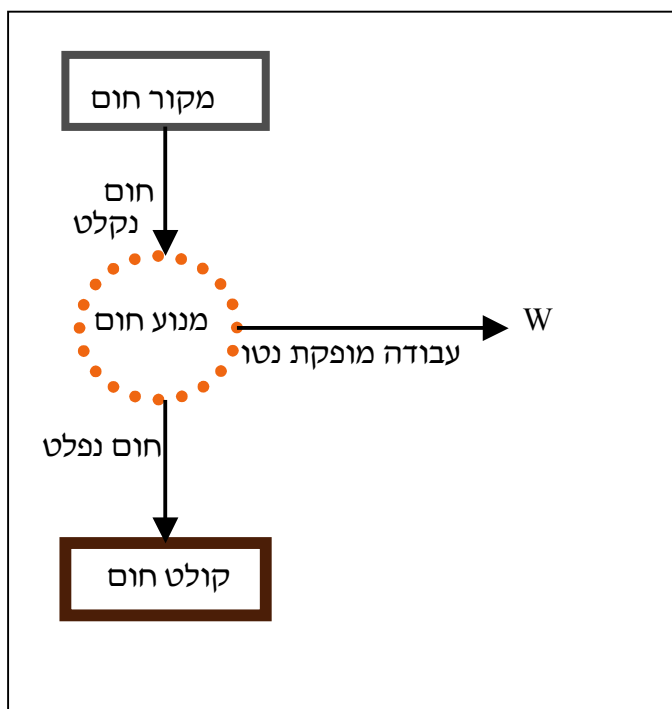
בין הנקודות 3 ל-4 בוצע תהליך בנפח קבוע (איזוכורי) ובעליה בלחץ.

ניתן לחבר קו עקום בין הנקודות 3 ל-1 ובין הנקודות 2 ל-4 קו זה יתאר תהליך שבו הלחץ והנפח משתנים אך אין מעבר חום תהליך זה נקרא **תהליך אדיבטי**.

♣ עיקרון מנוע חום

מנוע חום הוא מתקן שבו החומר העובד עובר מחזור ומתקיימים בו התנאים הבאים:

1. חום מוכנס לחומר העובד.
2. חום נפלט מהחומר העובד.
3. החומר העובד מפיק עבודה נטו.



♣ העיקרון התרמודינמי של מנוע חום

היה רצוי, כמובן, שכל החום, שקולט העובד של המנוע, יהפוך לעבודה נטו, אבל תהליך הפיכה כזה אינו יכול להתקיים: לא ניתן לנצל את כל החום הנקלט לעבודה, חייבת להיפלט כמות כלשהי של חום מהחומר העובד של המנוע. כיוון שהמנוע פעול במחזור, האנרגיה הפנימית בסוף המחזור שווה לאנרגיה הפנימית בתחילת המחזור. כאשר נפעיל את החוק הראשון של התרמודינמיקה למערכות סגורות מתברר, כי החום נטו במחזור חייב להיות שווה לעבודה נטו במחזור.

נסמן את החום הנקלט ב- Q_i ואת החום הנפלט ב- Q_o , החום נטו במחזור הוא: $Q_n = Q_i - Q_o$, העבודה נטו במחזור תסומן ב- W_n , לאחר הפעלת החוק הראשון נקבל: $W_n = Q_i - Q_o$.

האנרגיה המושקעת במנוע הוא החום הנקלט Q_i .

האנרגיה המופקת מהמנוע היא העבודה נטו W_n .

הנצילות התרמית של מחזור המנוע מוגדרת כיחס בין העבודה נטו לבין החום הנקלט: $\eta = W_n / Q_i$.

זכור, אין כל אפשרות, מבחינה תרמודינמית עקרונית, ליצור מנוע שיפעל במחזור שנצילותו התרמית היא 1. הנצילות התרמית תמיד קטנה מ-1, הנצילות התרמית מציינת איזה חלק מהחום הנקלט הופך לעבודה. במרבית מנועי החום, החום הנקלט, שהוא למעשה החום המושקע, מתקבל ע"י שרפת דלק. החום הנקלט מועבר לחומר העובד וכתוצאה מכך הלחץ והטמפרטורה של החומר העובד גדלים מעבר לערכים אלה בסביבה, במצב זה החומר העובד מסוגל לבצע עבודה.

♣ תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים

תהליך בלתי הפיך - אם ניקח כוס קפה חם ונניח אותה בסביבה קרירה יותר, כוס הקפה תוכל רק להתקרר, אם נרצה לחממה נצטרך להחזיר את אותה כמות חום שנפלטה לסביבה, תהליך זה נקרא תהליך בלתי הפיך, אחד הגורמים הנפוצים ביותר לתהליך בלתי הפיך הוא החיכוך, החיכוך יגרום להשקעת עבודה ולהוספת חום למערכת. **תהליך הפיך** - הוא תהליך שמאפשר את ביצעו גם בדרך ההפוכה לכיוונו המקורי, דבר זה יתאפשר רק אם הכל (המערכת והסביבה) יחזור למצבו הראשוני.

♣ מחזור קרנו

כפי שהוסבר מקודם, בכל מחזור של מנוע חום, קיים תהליך, שבו החומר העובד מבצע עבודה ותהליך, שבו יש להשקיע אנרגיה בחומר העובד.

ההפרש בין עבודות אלו הוא העבודה נטו של המחזור. ברור, שכדי שנצילות המחזור תגדל, אנו שואפים להקטנת חלקו היחסי של החום המושקע למינימום. ככל שנצליח בכך יותר, המשמעות תהיה שעבור אותה השקעת חום במחזור נקבל עבודה נטו גדולה יותר.

לכן לפי ההסבר בנוגע לתהליכים הפיכים ובלתי הפיכים, רק מחזור שיורכב מתהליכים הפיכים יהיה המחזור בעל הנצילות הגבוהה ביותר.

המחזור הנפוץ ביותר, המורכב רק מתהליכים הפיכים, הוא מחזור קרנו.

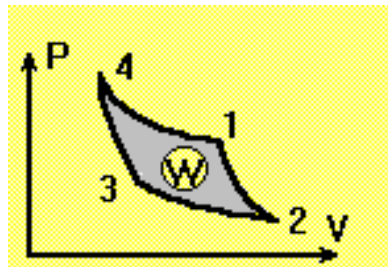
מחזור קרנו בנוי מארבעה תהליכים:

(1) **התפשטות איזותרמית** 1 – 2, בתהליך זה הבוכנה יורדת, הנפח עולה, הלחץ קטן והטמפרטורה נשארת קבועה מכיוון שהיא מקבלת חום ממאגר חום עליון הנמצא צמוד לצילינדר.

(2) **התפשטות אדיאבטית** 2 – 3, תהליך זה הוא תהליך ביניים, בתהליך זה מנתקים מגע עם מאגר החום, הצילינדר מבודד והבוכנה ממשיכה לרדת בגלל העבודה שעושה הגז בהתפשטותו, תהליך זה הפיך מכיוון שההתפשטות איטית ואין חיכוך.

(3) **דחיסה איזותרמית** 3 – 4, בתהליך זה נפח הגז מכסימלי, הבידוד מוסר מהצילינדר, ומתבצעת דחיסה, כתוצאה מהעבודה טמפרטורת הגז עולה, ומתבצע מעבר חום למאגר חום תחתון הצמוד לצילינדר.

(4) **דחיסה אדיאבטית** 4 – 1, מאגר החום מנותק מהצילינדר, מניחים בידוד על גבי הצילינדר וממשיכים לדחוס, כתוצאה מהדחיסה נפח הגז קטן והטמפרטורה שלו עולה לערך ההתחלתי של המחזור.



♣ בעירה פנימית וחיצונית

קיימות שתי אפשרויות בסיסיות להכנסת החום לחומר העובד, שהוא בד"כ קיטור או אוויר.

אפשרות אחת היא להכניס חום לחומר העובד במתקן שמחוץ למנוע, ואח"כ והעביר את החומר העובד החם למנוע. זו השיטה המופעלת **במנועי קיטור**: הקיטור מיוצר בדוד חימום ומועבר למנוע אח"כ, במקרה זה החומר העובד הוא קיטור ("מנועי שריפה חיצונית").

האפשרות השנייה היא להכניס חום ישירות לחומר העובד כשהוא נמצא בתוך המנוע. במקרה זה החום מוכנס כתוצאה משריפה של דלק ואוויר, הנמצאים בתוך המנוע. מנועים מסוג כזה נקראים "**מנועי שריפה (בעירה) פנימית**" (INTERNAL COMBUSTION ENGINES), על מנועים אלו נתמקד בפרוייקט זה.

במנוע שריפה פנימית יש חשיבות רבה למושג **ערך קלורי של הדלק**, המוגדר ככמות החום הנוצרת כתוצאה משריפה מושלמת של יח' מסה של דלק.

♣ הנחות לניתוח מחזור אוויר

מנועי מכוניות בעלי הצתה, מנועי דיזל ומנועי טורבינה הם מנועי חום שהחומר העובד בהם הוא גז. בכל המנועים הללו החום הנקלט בחומר העובד מתקבל ע"י שרפת דלק. עקב תהליך שריפה זה הרכב החומר העובד משתנה: מאוויר ודלק לפני השריפה לתוצרי שריפה שהם גזים לאחר השריפה, בגלל שהמרכיב העיקרי של האוויר הוא חנקן, שכמעט ואינו עובר תגובה כימית עקב השריפה, החומר העובד נשאר, בקירוב אוויר, גם לאחר השריפה.

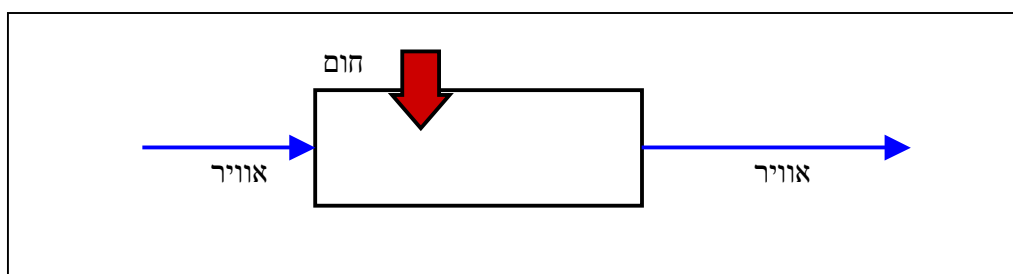
מנועי שריפה פנימית, שעליהם נמנים מנוע מכנית בעל הצתה ומנוע דיזל, עוברים מחזור מכני מושלם (הבוכנה חוזרת לנקודת ההתחלה בסיום כל סיבוב), אבל החומר העובד אינו עובר מחזור תרמודינמי שלם. החומר העובד נפלט מהמנוע בנקודה מסוימת במחזור (כגזי פליטה) ואינו חוזר למנוע כדי להגיע למצב ההתחלתי של המחזור. משמעות הדבר היא שמנועי שריפה פנימית עובדים למעשה כמערכות פתוחות. עובדה זו מסבכת את הניתוח התרמודינמי של מנועי השריפה הפנימית. כדי להקל על הניתוח אנו נניח שהמנועים פועלים בחומר עבודה שהוא אוויר והם פועלים כמחזורי אוויר תרמודינמיים מושלמים.

ישנן ארבע הנחות עיקריות שעליהן מתבססים הניתוחים של מנועי החום:

1. חומר העבודה הוא אוויר העובר מחזור שלם במערכת סגורה ומתנהג כגז אידיאלי.
2. כל התהליכים שמהם מורכב המחזור הם אידיאליים וללא חיכוך (איזוברי, איזוכורי, איזותרמי ואדיאבטי).
3. השריפה האמיתית מוחלפת בתהליך הוספת חום ממקור חיצוני.
4. תהליך פליטת מוצרי השריפה מהמנוע מוחלף בתהליך פליטת חום, שבסופו אוויר, שהוא חומר העבודה, חוזר למצבו התרמודינמי שבתחילת המחזור.



א. מעשי



ב. תיאורטי

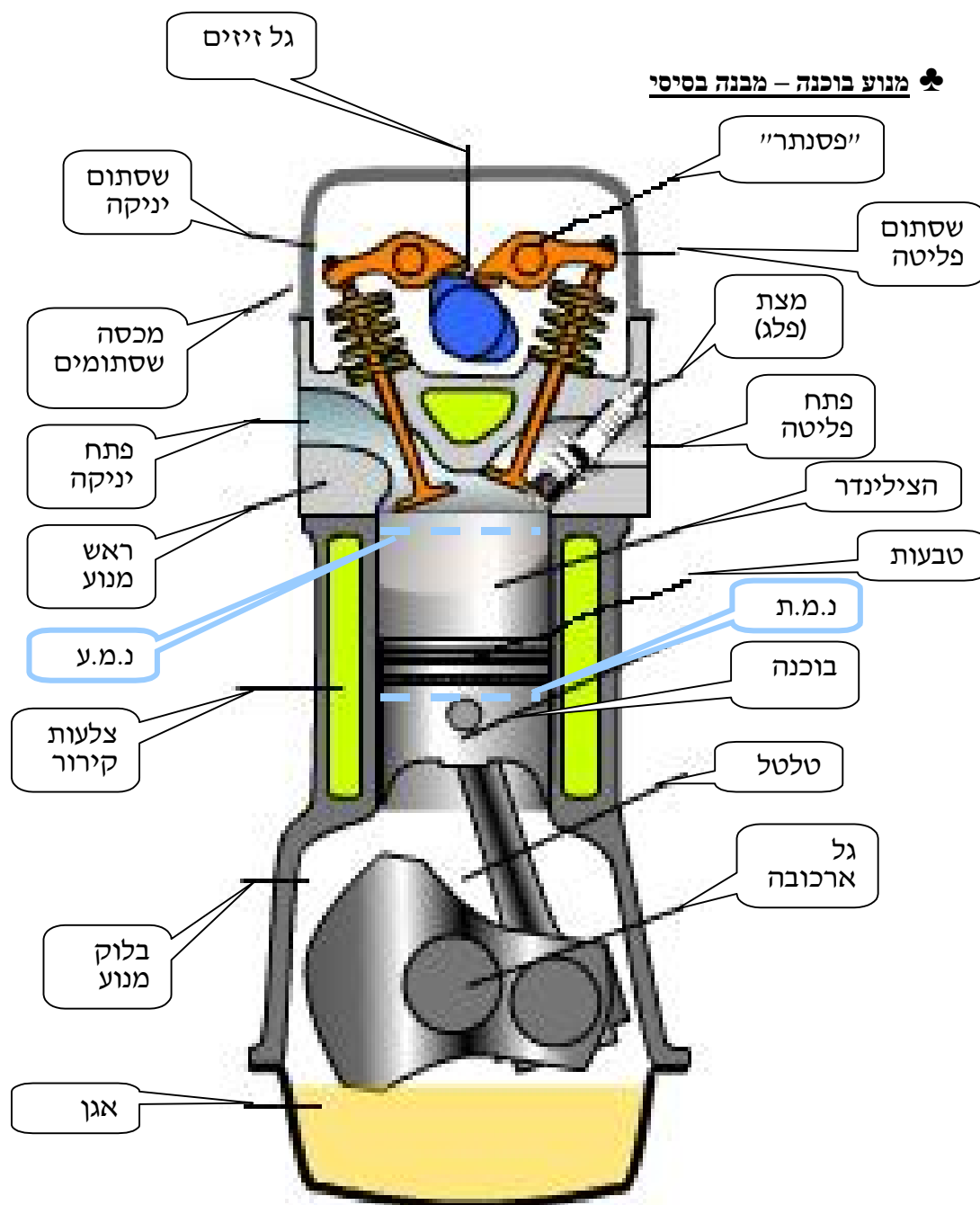
הנחות אלו מאפשרות לנו לנתח את המנועים כמחזורי תרמודינמיים, הפועלים בחומר עובד שהוא אוויר.

♣ מחזור אוטו

מחזור אוטו הוא המחזור האידיאלי של מנוע בעל הצתת מצת והוא יושם לראשונה במנוע ארבע פעימות ע"י הגרמני "ניקולאוס א. אוטו" (NIKOLAUS A. OTTO) בשנת 1876. מרבית המנועים הפועלים לפי העיקרון של מחזור אוטו הם בעלי ארבע פעימות, כלומר, הבוכנה מבצעת ארבעה מהלכים שלמים וגל הארכובה מבצע שני סיבובים שלמים במשל המחזור התרמודינמי.

במחזור אוטו ישנן ארבע פעימות :

(1 דחיסה (2 עבודה (3 פליטה (4 יניקה.



פירוט חלקים

- ★ **שסתום פליטה** – מאפשר את יציאת הגזים השרופים לאחר פעימת הפליטה.
- ★ **שסתום יניקה** – מאפשר כניסת תערובת דלק-אוויר לחלל הצילינדר.
- ★ **מצת (פלג)** – יוצר את הניצוץ החשמלי בפעימת העבודה.
- ★ **גל זיזים** – גורם לתנועת השסתומים בעזרת ה"פסנתר".
- ★ **"פסנתר"** – גורם לתנועה קווית של השסתומים כנגד כוח קפיץ מחזיר.
- ★ **פתח פליטה** – מקשר בין חלל תא השריפה לסעפת הפליטה.
- ★ **פתח יניקה** – מקשר בין חלל הצילינדר לסעפת היניקה.
- ★ **בוכנה** – יוצרת אנרגיה קווית בעזרת ארבעת הפעימות.

- ★ **טלטל** – מחובר בעזרת פין לבוכנה וממיר אנרגיה קווית לאנרגיה סיבובית.
- ★ **גל ארכובה** – מעביר את התנועה הסיבובית לשאר הבוכנות.
- ★ **צילינדר** – מכיל בתוכו את אזור הדחיסה והיניקה ובחלקו העליון נמצא תא השריפה.
- ★ **אגן שמן** – מכיל בתוכו כמויות מסוימת של שמן לסיכוך החלקים הנעים מתחת לבוכנה.
- ★ **טבעות** – בד"כ ישנן שלוש טבעות, תפקידן הוא שימון ואטימה, הטבעת העליונה עוזרת לדחיסת התערובת בחלל הצילינדר ומונעת מעבר שמן לתוכו, הטבעת התחתונה משמנת ומחליקה את תנועת הבוכנה בצילינדר.
- ★ **נ.מ.ת.** – נקודת הגובה המינימלית שאליה מגיעה הבוכנה.
- ★ **נ.מ.ע.** – נקודת הגובה המכסימלית שאליה מגיעה הבוכנה.

אופן פעולה

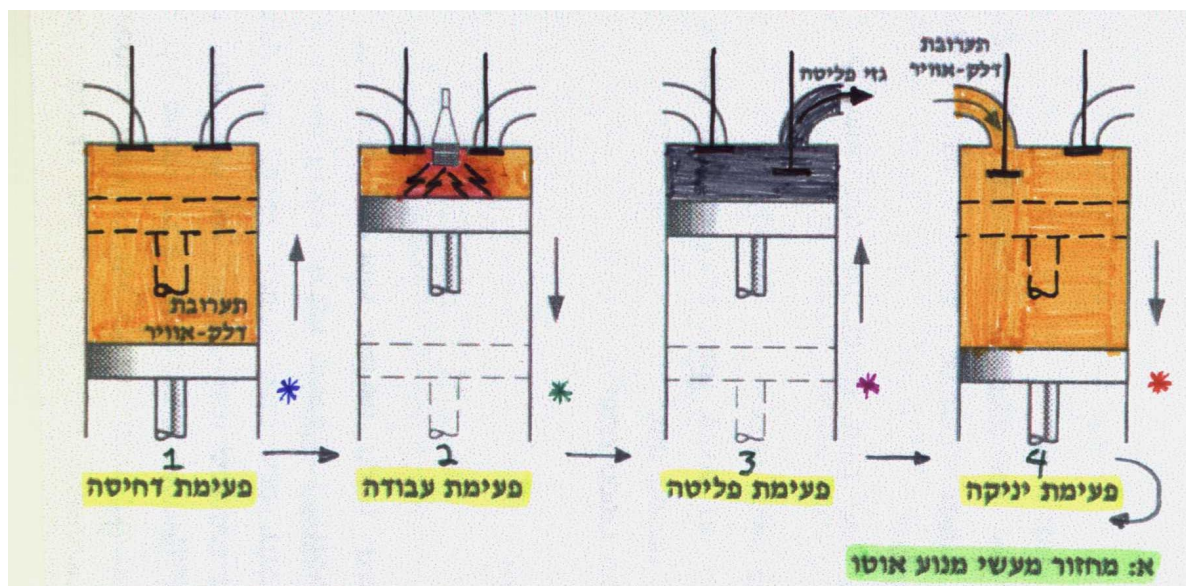
בתחילת המחזור שסתום היניקה ושסתום הפליטה סגורים והבוכנה נמצאת בנ.מ.ת. במשך פעימת **הדחיסה**, שהיא הפעימה הראשונה, הבוכנה נעה כלפי מעלה ודוחסת את התערובת של הדלק והאוויר. כאשר הבוכנה מגיעה קרוב לנ.מ.ע., במהלך הדחיסה, המצת מדליק את התערובת וכתוצאה מכך טמפרטורת החומר העובד ולחצו עולים. הגזים השרופים בעלי הלחץ הגבוה דוחפים את הבוכנה כלפי מטה וזו מצידה מאלצת את גל הארכובה להסתובב, ונוצרת עבודה. זאת היא פעימת ה**עבודה**. בסיום פעימה זו הבוכנה נמצאת בנ.מ.ת. והצילינדר מלא בגזים שרופים. הבוכנה עתה עולה כלפי מעלה ודוחפת את הגזים השרופים אל מחוץ לצילינדר, דרך שסתום הפליטה הפתוח (שסתום היניקה סגור) וזאת היא פעימת ה**פליטה**. בפעימה זו הלחץ בצילינדר גבוה מהלחץ האטמוספירי. לאחר מכן הבוכנה נעה מנ.מ.ע. לנ.מ.ת. ויונקת תערובת של אוויר ודלק דרך שסתום היניקה שנפתח (שסתום הפליטה סגור), זוהי פעימת ה**יניקה**, בפעימה זו הלחץ בצילינדר נמוך מהלחץ האטמוספירי.

♣ דיאגרמת p-v לניתוח מחזור אוטו

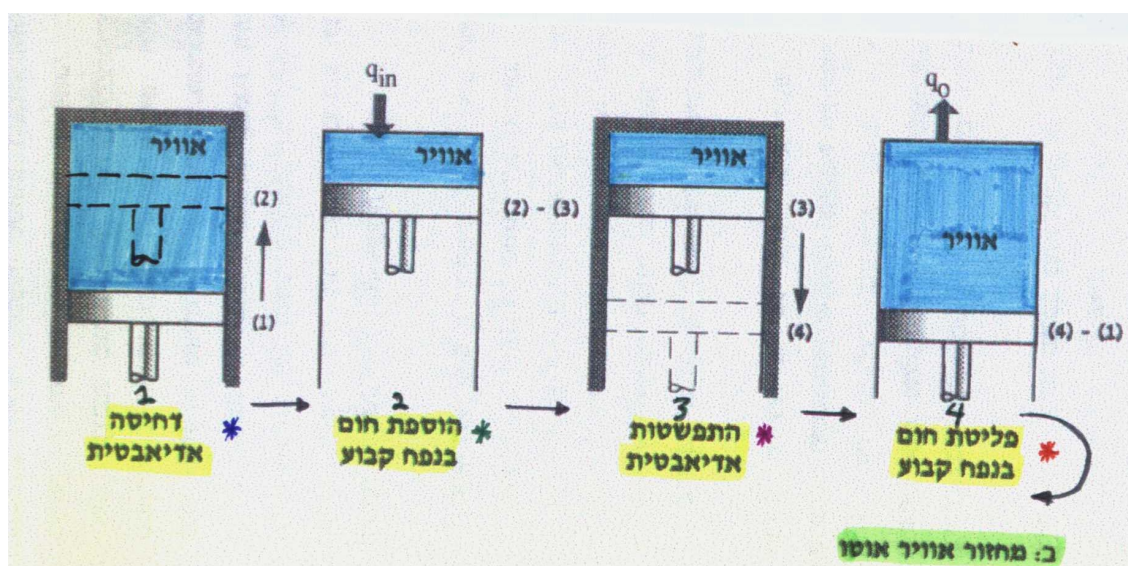
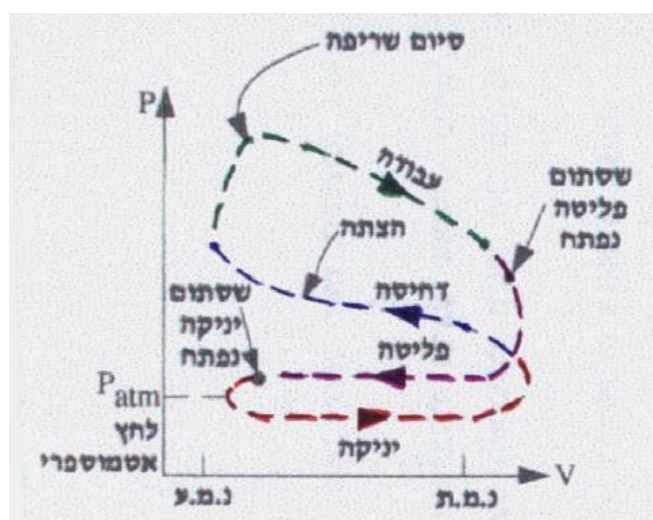
כזכור ישנו מחזור אוטו מעשי שהחומר העובד בו הוא תערובת דלק-אוויר, וישנו מחזור אוטו שהחומר העובד בו הוא אוויר.

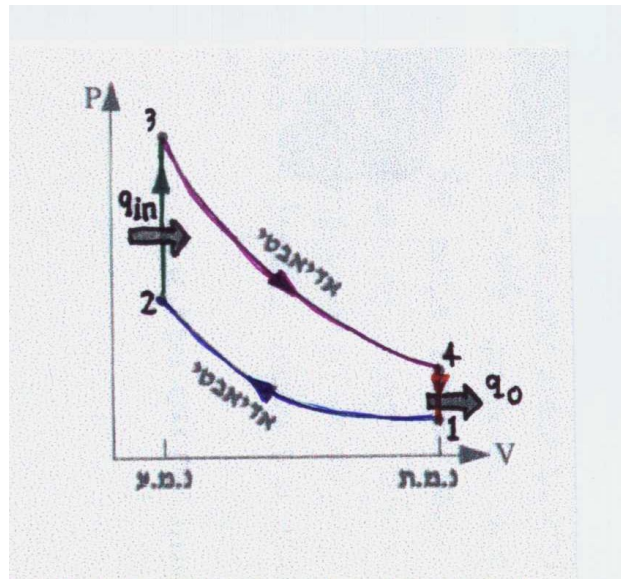
כפי שניתן לראות בתרשימים הבאים, מחזור אוטו מעשי קשה יותר לניתוח, לפיכך ננתח את מחזור אוויר אוטו שפעולתו דומה מאוד לפעולה המעשית של מנוע אוטו.

ניתן לראות שכל עקומה מתארת פעימה שונה (בהתאם לצבע), כך קל יותר להבין את מהלך ארבעת הפעימות ואת ניתוחן התרמודינמי.



גרף מחזור אוטו מעשי





מחזור אוויר אוטו מורכב מהתהליכים האידיאליים הבאים:

- ★ דחיסה אדיאבטית 1 - 2. ($W \leq 0 \quad Q = 0$)
- ★ תהליך הוספת חום בנפח קבוע 2 - 3. ($W = 0 \quad Q \geq 0$)
- ★ התפשטות אדיאבטית 3 - 4. ($Q = 0 \quad W \geq 0$)
- ★ תהליך פליטת חום בנפח קבוע 4 - 1. ($W = 0 \quad Q \leq 0$)

היות ומדובר במחזור, סכום כמויות החום בתהליכי המחזור חייב להיות שווה לסכום העבודות של תהליכי המחזור, לכן:

$$\left. \begin{aligned} Q_{net} &= Q_{2-3} + Q_{4-1} = u_3 - u_2 + u_1 - u_4 \\ W_{net} &= W_{1-2} + W_{3-4} = u_1 - u_2 + u_3 - u_4 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_{net} = W_{net}$$

♣ מחזוריים נוספים:

מחזור רנקין – זהו המחזור האידיאלי ביותר עבור מחזורי הספק בקיטור.

מחזור זה כולל רק תהליכים הפיכים ומורכב מארבעת התהליכים הבאים:

- (א) 1 – 2 דחיסה איזנטרופית (העלאה בלחץ) במשאבה.
- (ב) 2 – 3 הוספת חום בלחץ קבוע בתוך המאייד (איזוברי).
- (ג) 3 – 4 התפשטות איזותרמית בטורבינה.
- (ד) 4 – 1 תהליך הוצאת חום בלחץ קבוע מהמאייד (איזוברי).

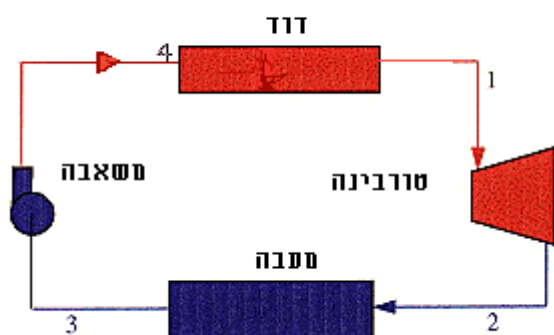
אופן התהליך:

מים נכנסים למשאבה (תחנה 1) ונדחסים באופן איזנטרופי עד ללחץ הפעולה של המאייד (תחנה 2). טמפרטורת המים עולה במידה קטנה במשך תהליך הדחיסה עקב הירידה הקטנה בנפח הסגולי של המים בתהליך הדחיסה. המים נכנסים למאייד כנוזל דחוס ועוזבים את המאייד (תחנה 3) במצב קיטור, הקיטור מגיע לטורבינה שם הוא מתפשט בתהליך איזנטרופי ומפיק עבודה ע"י סיבוב הציר המחובר לגנרטור חשמלי, הלחץ והטמפרטורה של הקיטור יורדים, הקיטור נכנס למעבה, ומתעבה בלחץ קבוע בתוך המעבה שהוא בבסיסו מחליף חום גדול כתוצאה מפליטת חום לטווח קירור כדוגמת אגם או אטמוספירה, הקיטור עוזב את המעבה כנוזל ונכנס למשאבה לתחילת התהליך.

מחזור ברייטון – מחזור זה הומצא בשנת

1870 ע"י GEORGE BRAYTON.

לפי עקרון זה פועלים טורבינות גז, כאשר הדחיסה וההתפשטות מתבצעים במכונות סובבות. בתרשים מתואר, עקרונית, מנוע טורבינת גז המשמש ליצירת הספק. מנוע זה ניתן למצוא במסוקים, טנקים תחנות כוח ולעיתים משמש גם להנעת מטוסים.



♣ ביביליוגרפיה

- תרמודינמיקה / שלמה לוי
- אתרי אינטרנט:

- <http://webphysics.ph.msstate.edu/javamirror/>
- <http://www.howstuffworks.com/engine.htm>
- <http://stwww.weizmann.ac.il/energy/>
- http://colos1.fri.uni-lj.si/~colos/COLOS/TUTORIALS/JAVA/THERMODYNAMICS/THERMO_UK/Thermo_index.html