

אנליזה של מנוע אוטו

רקע תיאורטי

הגדרה

מנוע הוא מכונה ההופכת אנרגיה כימית ותרמית לאנרגיה מכנית.

סוגי מנועים

נהוג להבחין בין שני סוגי מנועים: מנוע בשריפה פנימית ומנוע בשריפה חיצונית.

- **במנוע שריפה פנימית (ICE-Internal Combustion Engine)** חומר הבעירה עצמו מתפשט ומבצע את העבודה. לדוגמה: במנוע בנזין, חומר הבעירה, תערובת דלק ואוויר, נשרף בתוך הצילינדר תוך כדי התהוות גזים המניעים את הבוכנה בתנועה קווית. תנועה קווית זו הופכת לתנועה סיבובית על ידי שימוש בטלטל וגל ארכובה. (איור 1)
- **במנוע שריפה חיצונית (ECE-External Combustion Engine)** חומר הבעירה מחליף חום עם זורם אחר שהתפשטותו ממירה את האנרגיה התרמית למכנית. לדוגמה: במנועי קיטור, חומר הבעירה, תערובת אויר ודלק, נשרף ומחליף חום עם מים. המים הופכים לאדים המתפשטים דרך מעברים מעל פני ראש הבוכנה לתוך הצילינדר, ויוצרים את התנועה הקווית של הבוכנה. גם במקרה זה התנועה הקווית מומרת לתנועה סיבובית באמצעות שימוש בטלטל ובגל ארכובה.

מנוע שריפה פנימית

- בסקירה תיאורטית זו נתמקד במנועי שריפה פנימית. מבין מנועי השריפה הפנימית, מנועי הבוכנה הם הנפוצים ביותר, ומשמשים להנעת כלי רכב מגדלים שונים: טיסנים, סירות אופנועים, טנקים, אוניות, תחנות כוח ועוד. ניתן להבחין בין מנועי השריפה הפנימית לפי הקריטריונים הבאים:
- שיטת עבודה, משמע הבחנה בין סוגים שונים של מקורות האנרגיה בהם משתמשים לבעירה. במנוע אוטו (SI) מקור האנרגיה הנו בנזין ואילו במנוע דיזל (CI) נעשה שימוש בסולר.
 - מספר המהלכים הדרושים להשלמת מחזור פעולה אחד. ישנם מנועים להם דרושים ארבעה מהלכים, וישנם מנועים המשלימים מחזור פעולה בשני מהלכים בלבד.

מבנה המנוע

החלקים העיקריים המרכיבים את המנוע הנם: צילינדר, בוכנה, טלטל וגל ארכובה. הצילינדר הנו גליל חלול הסגור בקצה אחד, ובתוכו נעה הבוכנה בצורה אנכית. הטלטל, שהנו מעין מוט קשיח, מחובר בקצהו העליון לבוכנה, ובקצהו התחתון אל גל הארכובה. בשל צורתו המיוחדת של גל הארכובה, תזוזתה האנכית של הבוכנה מומרת לתנועה סיבובית על גל הארכובה.

כשגל הארכובה מסתובב, מושך הטלטל אחריו את הבוכנה ולהפך. עם סיבוב גל הארכובה הבוכנה יורדת מטה עד לנקודה התחתונה האפשרית, נקודה זו נקראת הנקודה התחתונה (BC). בהמשך סיבובו של גל הארכובה דוחף הטלטל את הבוכנה מעלה עד לנקודה העליונה האפשרית, נקודה עליונה (TC). המרחק בין שתי הנקודות האלו נקרא מהלך בוכנה. תנועת הבוכנה מהנקודה העליונה עד לנקודה התחתונה נקראת מהלך. מהלך הבוכנה מתבצע כאשר גל הארכובה משלים סיבוב של 180 מעלות.

מחזור ארבעה מהלכים לפי מחזור אוטו

מחזור הפעולה של מנוע ארבע - פעימות כולל את ארבע הפעימות הבאות: יניקה, דחיסה, התפשטות ופליטה. מחזור זה מושלם בסיום שני סיבובים של גל הארכובה (720 מעלות). כל אחד מהמהלכים משמש שלב מכין למהלך הבא ומשתלב היטב עם המהלך הקודם לו.

❖ מהלך היניקה:

במהלך זה יורדת הבוכנה מהנקודה העליונה לנקודה התחתונה, כך שנוצר הפרש לחצים בין הסביבה לבין פנים הצילינדר. בעת פתיחת שסתום היניקה נשאבת תערובת אויר ודלק לתוך הצילינדר. עם סיום התהליך נסגר שסתום היניקה.

❖ מהלך הדחיסה:

במהלך זה עולה הבוכנה מהנקודה התחתונה לנקודה העליונה, כך שהתערובת נדחסת. לאורך מהלך זה שסתומי היניקה והפליטה סגורים.

❖ מהלך ההתפשטות (מהלך העבודה):

לפני תחילתו של מהלך זה מוצתת התערובת הדחוסה על ידי ניצוץ חשמלי. שריפה זו גורמת להתפשטות הגזים השרופים, המאלצים את הבוכנה לנוע מהנקודה העליונה לנקודה התחתונה. האנרגיה המכנית הנוצרת במהלך זה מנוצלת לסיבוב גל הארכובה בשלושת המהלכים הנותרים, משמע יתר המהלכים הנם מהלכי עזר בעוד מהלך ההתפשטות הנו מהלך העיקרי במחזור. גם במהלך זה סגורים שסתומי הפליטה והיניקה.

❖ מהלך הפליטה:

במהלך זה הבוכנה עולה מהנקודה התחתונה לעליונה, תוך כדי פתיחת שסתום הפליטה. הגזים השרופים נפליטים מהצילינדר והצילינדר מוכן למהלך היניקה.

לחצו כאן להדמיית מחזור ארבעה מהלכים

במחזור פעולה אחד יורדת הבוכנה במהלך היניקה ובמהלך העבודה, ועולה במהלך הדחיסה ובמהלך הפליטה. כלומר הבוכנה עולה ויורדת פעמיים בכל מחזור פעולה, אולם כל שסתום נפתח פעם אחת בלבד. לשם פעולתו התקינה של המנוע יש הכרח בתיאום מלא בין השסתומים לבוכנה. תיאום זה נקרא תזמון שסתומים.

מחזור דו מהלכי בשיטת אוטו

במנוע דו מהלכי משתמשים בו זמנית בחלל הצילינדר מעל הבוכנה ובחלל בית הארכובה. באופן זה ניתן לבצע שתי פעולות בו זמנית.

❖ מהלך הדחיסה:

הבוכנה נעה מעלה, התערובת הכלואה בצילינדר נדחסת, ותערובת חדשה נכנסת לבית הארכובה דרך פתח היניקה.

❖ מהלך ההתפשטות (מהלך העבודה):

בו זמנית הגזים השרופים מתפשטים בתוך הצילינדר, הבוכנה נעה מטה, הגזים נפליטים החוצה, והתערובת נדחסת בבית הארכובה ומועברת לצילינדר.

במחזור פעולה אחד הבוכנה יורדת ועולה פעם אחת, כלומר מהלך העבודה מתרחש כל סיבוב של גל הארכובה. אין צורך בשסתומי יניקה ופליטה.

למרות שמהלך העבודה במחזור דו מהלכי מתרחש כל סיבוב של גל הארכובה, יתרונו של מנוע זה לעומת מנוע ארבעה מהלכים קטן וזאת בשל היותו בזבזני בדלק (דלק טרי נפלט דרך פתחי הפליטה בצילינדר). במנוע דו מהלכי משתמשים כאשר נדרש יחס גבוה בין הספק המנוע למשקלו.

ריבוי צילינדרים

בדגמים הראשונים של כלי הרכב השתמשו במנועים בעלי צילינדר אחד, אולם עד מהרה נתבררו יתרונות רבים למנועים מרובי הצילינדרים. שהרי כפי שהוזכר במנוע בעל צילינדר יחיד מהלך העבודה הנו 180 מעלות באופן תיאורטי שהם 140 מעלות באופן מעשי, כך שיתר 540 מעלות הסיבוב של גל הארכובה הנם מהלכי עזר. מכאן שבמנוע בעל 4 צילינדרים נגיע למהלך עבודה של 640 מעלות מתוך 720 ואילו במנוע 6 צילינדרים נקבל חפיפה בין מהלכי העבודה.

העשרה:

מנוע ארבעה מהלכים בשיטת דיזל

ההבדלים העיקריים בין מנוע הפועל לפי מחזור אוטו לבין זה הפועל בשיטת דיזל הנם: באופן הזנת הדלק, אופן הכנת התערובת ואופן ההצתה. בעוד שבמנוע אוטו מתערבב הדלק עם האוויר מחוץ לצילינדר, הרי שבמנוע דיזל רק אוויר נכנס לצילינדר במהלך היניקה ואילו הדלק מוזרק לתא השריפה רק בסוף מהלך הדחיסה. כמו כן, בניגוד למנוע אוטו בו הצתת התערובת נעשית על ידי ניצוץ חשמלי, במנוע דיזל התערובת ניצתת מעצמה בשל הלחץ והטמפרטורה הגבוהים בתא השריפה.

איפיון מנועים

מנוע שריפה פנימית מאופיין על ידי הפרמטרים הבאים:

- פרמטרים בסיסיים: מספר צילינדרים, אופן הצבתם, מספר הפעמות וסוג המחזור.
- גדלים פיסיים: משקל כללי, נפח תזוזה כולל, אורך מהלך, קוטר צילינדר ויחס דחיסה.
- אופייני ביצוע: עקומת עבודה בעומס מלא ובעומס חלקי ושיעור הגזים הנפלטים לסוגיהם.
- נתונים מיוחדים: מיקום השסתומים ואופן הפעלתם, צורת חלל השריפה, עקרון מערכת ההצתה, אופן הזנת הדלק ועוד.

אופייני ביצוע

אופייני הביצוע של מנוע מוצגים גרפית בעקומת עבודה בעומס מלא וכמפת ביצועים בעומס חלקי. קיימים שישה פרמטרים בעזרתם ניתן לאפיין את המנוע. פרמטרים אלו תלויים במהירות סיבוב גל הארכובה:

- **Friction power – f_p** : ההספק המתבזבז הן בחיכוך בין חלקיו הפנימיים של המנוע, והן בהפעלת מערכות עזר ההכרחיות לפעולתו התקינה של המנוע. אם אופיין זה אינו ידוע ניתן להניח כי גודלו שווה בקירוב לריבוע מהירותו הסיבובית של גל הארכובה.

$$f_p \approx N^2$$

- **Indicator power – i_p** : ההספק האינדיקטורי, משמע ההספק נטו המועבר אל הבוכנה עצמה. זהו השטח הכלוא בדיאגרמת P-V.

$$i_p = \frac{W_i \cdot n \cdot N}{X}$$

- **Brake power – b_p** : הספק המנוע לבלימה, משמע ההספק המתקבל על גל הארכובה.

$$b_p = i_p - f_p$$

- **T -Torque** : המומנט המתפתח על גל הארכובה.

$$2\pi r FN = b_p, \quad F = \frac{T}{r}$$

↓

$$b_p = 2\pi TN$$

- **mep -Mean effective pressure** : הלחץ האפקטיבי הממוצע. לחץ זה יכול להיות לחץ אינדיקטורי, בלימה או חיכוך.

$$imep = \frac{i_p}{V_d n \frac{N}{X}}$$

$$bmep = \frac{b_p}{V_d n \frac{N}{X}} = \frac{2\pi T}{V_d \frac{n}{X}}$$

$$fmep = \frac{f_p}{V_d n \frac{N}{X}}$$

כאשר

$$V_d = \frac{\pi d^2}{4} L_d$$

- **sfc – Specific fuel consumption** : תצרוכת הדלק הסגולית של המנוע. היא מוגדרת ליחידת הספק אינדיקטורי, בלימה או חיכוך.

$$isfc = \frac{\dot{m}_f}{i_p}$$

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{b_p}$$

$$fsfc = \frac{\dot{m}_f}{f_p}$$

- נצילות מכנית של מנוע:

$$\eta_m = \frac{b_p}{i_p}$$

כאשר:

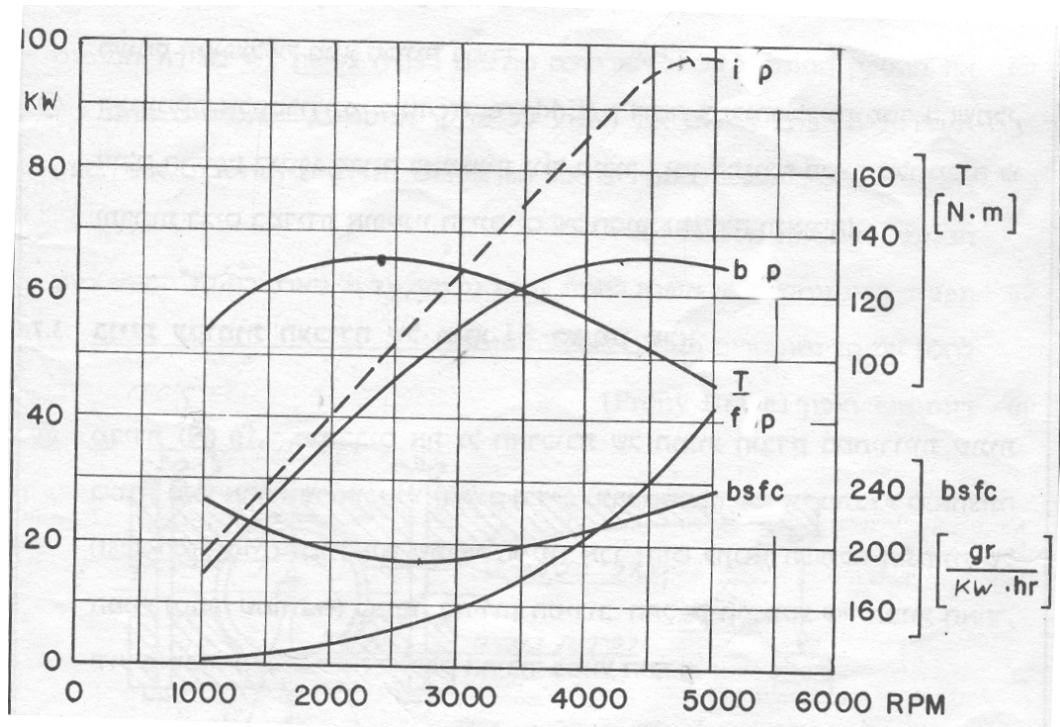
W_i	זו העבודה נטו המתקבלת על הבוכנה בכל צילינדר לכל מחזור.
n	הנו מספר הצילינדרים.
X	הנו מספר סיבובי גל הארכובה לכל מחזור עבודה. ($2=X$ עבור מנוע ארבעה מהלכים ואילו $1=X$ עבור מנוע דו מהלכי.)
N	הנו מהירות סיבוב גל הארכובה.
\dot{m}_f	ספיקה מסית של דלק הנצרכת על ידי המנוע.
L_d	אורך המהלך.
V_d	נפח התווזה.

לחצו כאן לקבלת מידע נוסף על אופייני הביצוע

מדידה של הספק המנוע לבלימה נעשית באמצעות שימוש בדינמומטר המעמיס את גל הארכובה בצורה מבוקרת. קיימים סוגים שונים של דינמומטרים, אנו נתמקד בדינמומטר החשמלי שהוא למעשה גנרטור חשמלי המועמס על ידי מעגל חשמלי חיצוני. ניתן לנצל כעומס שלילי המדמה את העומס המופעל על מנוע המכונית במורד.

עקומות עבודה בעומס מלא עבור מנוע אוטו

עקומות העבודה בעומס מלא של מנוע מסוים מתארות את ההספקים השונים של המנוע, את המומנט המתפתח על גל הארכובה ואת תצרוכת הדלק הסגולית שלו כתלות במהירות הסיבוב.



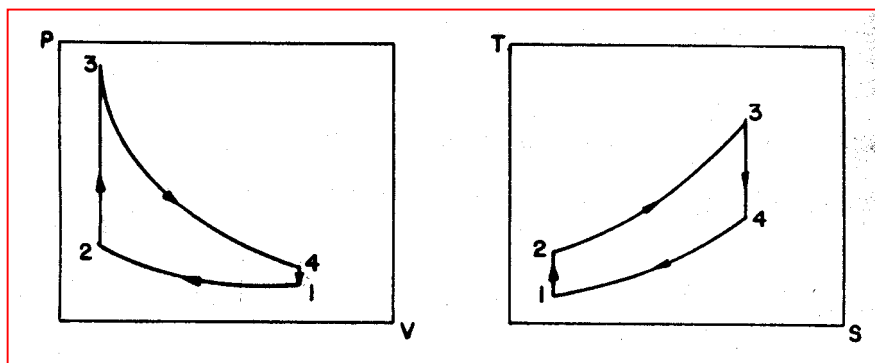
ניתן לראות כי עקום ההספק האינדיקטורי, i_p , עולה עם מהירות הסיבוב. אולם, במהירות גבוהה מדי משך הזמן העומד לרשות התערובת להיכנס לצילינדר קטן, כך שבמהירויות גבוהות מסת התערובת הנכנסת לצילינדר קטנה, ועל כן i_p קטן. מהירות הסיבוב האופטימלית עבור כל אחד מהמאופיינים שונה.

מחזור אוטו אידיאלי

במנועי שריפה פנימית כל מהלך מורכב ממספר תהליכים לא הפיכים. על כן קשה לתאר את התהליך האמיתי בעזרת אוסף של תהליכים אידיאליים. נוכל בכל זאת לייצג את התהליך על ידי שימוש במשוואות מתמטיות לשם בדיקה איכותית של השפעת הגורמים השונים על נצילות המחזור, עבודת המחזור ועוד. ההנחות בהן נשתמש הן:

- ההרכב הכימי של חומר העבודה אינו משתנה במשך המחזור.
- חומר העבודה נחשב לאויר המתנהג כגז אידיאלי.
- תהליכי הפליטה והיניקה מוחלפים בתהליך של גריעת חום בנפח קבוע.
- קיבול החום של חומר העבודה אינו תלוי בטמפרטורה ובלחץ.
- תהליך השריפה מוחלף בתהליך של תוספת חום בנפח קבוע.
- אין הפסדי חום.
- כל התהליכים הפיכים.

מחזור אוטו הנו מחזור תרמודינמי הכולל שתי איזותרות ושתי איזנטרופות.



דיאגרמת P-V נקראת דיאגרמה אינדיקטורית של המחזור.

- | | |
|---|-------|
| הנו מהלך הדחיסה, דחיסה איזנטרופית. | 1 → 2 |
| הנו תהליך הבעירה, תוספת חום בנפח קבוע. | 2 → 3 |
| הנו מהלך העבודה, התפשטות איזנטרופית. | 3 → 4 |
| הנו מהלך הפליטה והיניקה, גריעת חום בנפח קבוע. | 4 → 1 |

בשל ההנחה כי התהליכים הפיכים, נוכל להשתמש בקשרים התרמודינמיים הבאים:

$$W = \oint PdV$$

$$Q = \oint TdS$$

משמע:

השטח בדיאגרמת P-V, השטח תחת העקום מייצג עבודה.

השטח בדיאגרמת T-S, השטח תחת העקום מייצג חום.

החוק הראשון של תרמודינמיקה עבור תהליך מחזורי הנו:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

במחזור אוטו נקבל:

$${}_2Q_3 + {}_4Q_1 = {}_1W_2 + {}_3W_4$$

הנצילות התרמודינמית (נצילות אינדיקטורית) של המחזור מוגדרת כיחס בין העבודה המתקבלת נטו לכמות החום המושקעת:

$$\eta_i = \frac{W_i}{{}_2Q_3}$$

לשם חישוב W_i ו- ${}_2Q_3$ נשתמש בחוק הראשון של התרמודינמיקה עבור מערכת במצב של SSSF:

$$Q = W + \Delta E$$

בהזנחת השינוי באנרגיה הפוטנציאלית והקינטית נקבל:

$$Q = W + \Delta U$$

תהליכים 3 → 2 ו- 1 → 4 הנם תהליכים בנפח קבוע, על כן נוכל להשתמש בקשר:

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$$

לכן:

$${}_2Q_3 = {}_2W_3 + U_3 - U_2 = 0 + mC_v(T_3 - T_2)$$

$${}_4Q_1 = {}_4W_1 + U_1 - U_4 = 0 + mC_v(T_1 - T_4)$$

העבודה המתקבלת נטו:

$$W_i = {}_1W_2 + {}_3W_4 = {}_2Q_3 + {}_4Q_1$$

מהצבת הקשרים הנ"ל במשוואת הנצילות התרמודינמית מתקבל הקשר הבא:

$$\eta_i = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

תהליכים 1 → 2 ו- 3 → 4 הנם אדיאבטים והפיכים (איזנטרופים), וחומר העבודה הנו גז אידיאלי. לכן נוכל להשתמש בקשרים הבאים:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{1-k}, \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{1-k}$$

מדיאגרמת P-V ניתן לראות כי:

$$R_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

לכן:

$$\eta_i = 1 - R_v^{1-k}$$

כאשר:

$$7 < R_v < 12, \quad 1 < k = \frac{C_p}{C_v} < 1.66 \quad . \text{ עבור יחס דחיסה של } 8.5 \text{ ו- } k=1.4 \text{ נצילות זו שווה ל- } 57.5\% .$$

תהליך שריפה במנוע בנוזן

תהליך השריפה הנו תהליך העיקרי והחשוב ביותר במחזור. בשריפה מתרחשת תגובה כימית בה המגיבים (אוויר ודלק) הופכים לתוצרים (גזי פליטה). כדי לנתח את התהליך מבחינה תרמודינמית, עלינו להציג מספר הגדרות שימשו אותנו בהמשך:

יחס דלק אוויר:

זהו היחס בין הספיקה המסית של הדלק לספיקה המסית של האוויר.

$$FA = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_A}$$

תצרוכת דלק סגולית:

זהו היחס בין צריכת הדלק להספק היעיל.

$$bsfc = \frac{b_p}{\dot{m}_f}$$

יחס תערובת:

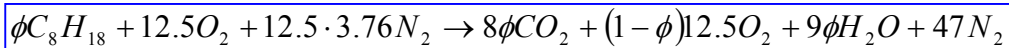
יחס תערובת הנו היחס בין FA של התערובת ל- FA סטוכיומטרי. תערובת דלק אוויר נקראת סטוכיומטרית אם תוצרי הבעירה של התגובה הכימית בין הדלק והחמצן יכולו רק פחמן דו-חמצני ומים.

$$\phi = \frac{FA}{FA_{stc}}$$

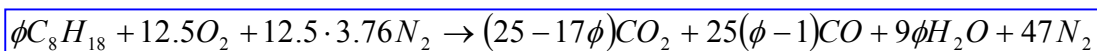
$$FA_{stc} = \frac{1}{14.9} \quad C_8H_{18}, \text{ בו נשתמש בניסוי, יחס אוויר דלק סטוכיומטרי הנו:}$$

מכאן, כאשר התערובת סטוכיומטרית נקבל $\phi = 1$.

כאשר התערובת מכילה עודפי אוויר התערובת נקראת תערובת עניה, $\phi < 1$, ותוצרי הבעירה יכולו בתוכם גם מולקולות חמצן.

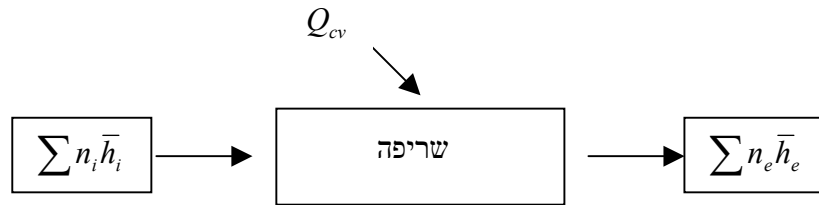


כאשר התערובת מכילה עודפי דלק התערובת נקראת תערובת עשירה, $1 < \phi < 1.47$, ותוצרי הבעירה יכולו בתוכם גם מולקולות של חד תחמוצת הפחמן.



מבחינה תרמודינמית, נניח כי השריפה מתרחשת בנפח קבוע (כמוצג בסכימה), על כן נקבל את הקשר הבא מתוך משוואת החוק הראשון של תרמודינמיקה:

$$Q_{cv} = \sum n_e (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_e + \sum (n\bar{h}_f^\circ)_e - \sum n_i (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_i - \sum (n\bar{h}_f^\circ)_i$$



כאשר $\sum n (\bar{h} - \bar{h}^\circ)$ הנו הפרש האנתלפיה מנקודת ייחוס לנקודה הקיימת.

ואילו $\sum n \bar{h}_f^\circ$ הנו אנתלפית היווצרות של החומר בנקודת הייחוס.

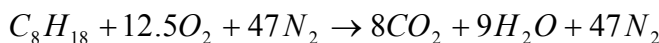
עבור חומר הנמצא בצורתו הטהורה בטבע, אנתלפית היווצרות הנה 0, משמע: $(\bar{h}_f^\circ)_{O_2} = (\bar{h}_f^\circ)_C = (\bar{h}_f^\circ)_{N_2} = 0$

$$\left[\frac{kJ}{kmole} \right]$$

נקודת הייחוס לפיה נמצאו אנתלפיות החומרים השונים הנה בתנאים סטנדרטיים, משמע: $T_0 = 25[^\circ C]$, $P_0 = 100[kPa]$. ערכי אנתלפית היווצרות של החומרים השונים מוצגים בטבלה 1.

ערך היסק

ערך היסק הנו החום המתקבל אם התהליך התבצע בתנאים סטנדרטיים וסטוכיומטרים. לדוגמה עבור שרפת אוקטן ביחס סטוכיומטרי נקבל את ערך ההיסק הבא :



$$\bar{h}_{RP} = 8(\bar{h}_f^\circ)_{CO_2} + 9(\bar{h}_f^\circ)_{H_2O} - (\bar{h}_f^\circ)_{C_8H_{18}}$$

$$h_{RP} = \frac{\bar{h}_{RP}}{M_{C_8H_{18}}} = 44,250 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\begin{aligned} Q_{cv} &= \sum n_e (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_e + \sum (n\bar{h}_f^\circ)_e - \sum n_i (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_i - \sum (n\bar{h}_f^\circ)_i \\ &= n_{CO_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{CO_2} + n_{H_2O} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{H_2O} + n_{N_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{N_2} + \\ &\quad + n_{CO_2} \bar{h}^\circ_{f_{CO_2}} + n_{H_2O} \bar{h}^\circ_{f_{H_2O}} + n_{N_2} \bar{h}^\circ_{f_{N_2}} - \\ &\quad - n_{C_8H_{18}} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{C_8H_{18}} - n_{O_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{O_2} - n_{N_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{N_2} - \\ &\quad - n_{C_8H_{18}} \bar{h}^\circ_{f_{C_8H_{18}}} - n_{O_2} \bar{h}^\circ_{f_{O_2}} - n_{N_2} \bar{h}^\circ_{f_{N_2}} = \\ &= \underbrace{n_{CO_2} \bar{h}^\circ_{f_{CO_2}} + n_{H_2O} \bar{h}^\circ_{f_{H_2O}} - n_{C_8H_{18}} \bar{h}^\circ_{f_{C_8H_{18}}}}_{\bar{h}_{RP}} + \underbrace{n_{CO_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{CO_2} + n_{H_2O} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{H_2O}}_{\bar{h}_p} \\ &\quad - \underbrace{(n_{C_8H_{18}} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{C_8H_{18}} + n_{O_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{O_2})}_{\bar{h}_R} \end{aligned}$$

מכאן:



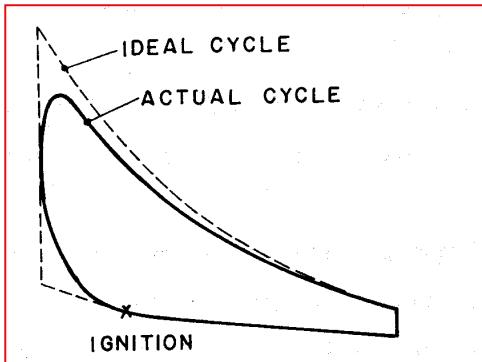
$$\dot{Q}_{cv} = \dot{W} + \dot{H}_p - \dot{H}_R$$

כאשר:

$$\dot{H}_R = \dot{m}_{air} C_{p_{air}} (T_R - T_0) + \dot{m}_{fuel} [C_{p_{fuel(vapor)}} (T_R - T_0) + h_{RP}]$$

$$\dot{H}_P = (\dot{m}_{CO_2} c_{p_{CO_2}} + \dot{m}_{H_2O} c_{p_{H_2O}} + \dot{m}_{N_2} c_{p_{N_2}}) (T_P - T_0)$$

בפועל תהליך השריפה לא נעשה בנפח קבוע על כן השטח הכלוא תחת דיאגרמת P-V המייצגת מחזור אוטו אידיאלי קטן יותר. מכאן שהנצילות המעשית קטנה מהאידיאלית.



ניסוי ראשון – מציאת עקומת עבודה בעומס מלא

מטרות הניסוי

- קביעת ביצועי המנוע בעומס מרבי.
- ביצוע מאזן אנרגיה על המנוע.

מערכת הניסוי



מערכת הניסוי בה נשתמש כוללת מנוע בנזין מקורר מים, שנלקח ממכונת יונדאי לנטרה. מנוע זה הנו מנוע ארבע פעימות עם ארבעה צילינדרים ומערכת הזרקה דלק. המנוע מצויד בממיר קטליטי, שיעילותו המרבית מתקבלת עבור תערובת סטויכומטרית, על כן לאורך הניסוי נשמר היחס הסטויכומטרי בתערובת.

המערכת מכילה גם:

- דינמומטר שבעזרתו ניתן לשלוט על עומס המנוע.
- מדידי טמפרטורה, בעזרתם ניתן למדוד את טמפרטורת מי הקירור בכניסה, T_1 , וביציאה מהמנוע, T_2 , טמפרטורת גזי הפליטה, T_p , טמפרטורת האוויר בכניסה למנוע, T_R וטמפרטורת החדר בסמוך למנוע, T_0 .
- מערכת מדידה בעזרתה ניתן למדוד את מהירותו הסיבובית של המנוע, את מומנט הבלימה המופעל על ציר המנוע, ומדי ספיקה בעזרתם ניתן למדוד את ספיקת האוויר ומי הקירור.

מהלך הניסוי

בניסוי זה ישנן שלוש סדרות מדידות. עבור שלושת מצבי המצערת השונים יש לבצע את הסעיפים הבאים:

מעבדה בתרמודינמיקה

נושא : מנועים

- 12 -

1. התניעו את המנוע וקבעו מהירות סיבוב של כ- $2,500[rpm]$.
2. המתינו להתייצבות ורשמו את הטמפרטורות השונות, את המומנט המתקבל, את הספיקה הנפחית של האויר ומי הקירור.
3. חזרו על הסעיפים הקודמים עבור $2,000[rpm]$ ו- $1,500[rpm]$.

$\omega[rpm]$	$T[N \cdot m]$	$\dot{m}_{air} \left[\frac{g}{s} \right]$	$\dot{V}_{water} \left[\frac{l}{m} \right]$	$T_0 [^{\circ}C]$	$T_R [^{\circ}C]$	$T_P [^{\circ}C]$	$T_2 [^{\circ}C]$	$T_1 [^{\circ}C]$	מצב המצערות
מהירות סיבובית של ציר המנוע	מומנט המתקבל על גל הארכובה	ספיקה מסית של אוויר	ספיקה נפחית של מי הקירור	טמפרטורת החדר בסמוך למנוע	טמפרטורת מגיבים	טמפרטורת פליטה	טמפרטורת יציאת מי הקירור	טמפרטורת כניסת מי הקירור	
									1
									2
									3

נתונים נוספים:

הערך הנתון	הפרמטר
$750 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	ρ_{fuel} - צפיפות הדלק
$\frac{1}{14.9}$	FA_{stc} - יחס דלק אוויר סטוכיומטרי
$0.287 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	R - קבוע הגזים של אוויר
$1.71 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	$C_{p_{fuel(vapor)}}$ - קבוע החום הסגולי של אדי דלק
$1.007 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	$C_{p_{air}}$ - קבוע החום הסגולי של אוויר
$370 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	$h_{fuel(vapor)}$ - חום האיוד של הדלק
$44,250 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	h_{RP} - אנתלפית חום השריפה

עיבוד תוצאות

1. רשמו את מטרת הניסוי.
2. רשמו את הנוסחאות הבאות בצורתן הפרמטרית, והציגו דוגמת חישוב מפורטת בהתבסס על תוצאות המדידה הראשונה. אנא הקפידו על רישום היחידות.

כידוע, עבור SSSF, החוק הראשון של תרמודינמיקה מנוסח באופן הבא:

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{W}_s + \dot{H}_p - \dot{H}_R$$

כאשר:

\dot{W}_s - הנו ההספק היעיל המתקבל במנוע.

\dot{H}_R - הנה אנרגית המגיבים.

\dot{H}_p - הנה אנרגית התוצרים.

\dot{Q}_{cv} - הנו איבר אינטרקציה החום המכיל בתוכו את ההספק המתבזבז מחיכוך בין חלקיו הפנימיים של המנוע, ואת החום המתפנה בתהליך בעזרת מי הקירור.

לשם מציאת ביצועי המנוע, עלינו לעקוב אחר הסעיפים הבאים:

א. מציאת הספיקה המסית של הדלק, \dot{m}_{fuel} :

בעת הניסוי נשמר יחס סטויכומטרי בתערובת, על כן:

$$\phi = \frac{FA}{FA_{stc}} = \frac{\dot{m}_{fuel} / \dot{m}_{air}}{1/14.9} = 1$$

↓

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{air}}{14.9} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

ב. חישוב אנרגית המגיבים, \dot{H}_R :

כידוע, המגיבים בתהליך הנם אוויר ודלק. הדלק מוזרק לסעפת היניקה, ובמהלך תהליך היניקה ותחילת תהליך הדחיסה הוא מתאייד. על כן נתייחס לדלק הנכנס למנוע כאדי דלק, ועל כן ניתן לייצג את התהליך באופן הבא:

$$\dot{H}_R = \dot{m}_{air} C_{p_{air}} (T_R - T_0) + \dot{m}_{fuel} \left[C_{p_{fuel(vapor)}} (T_R - T_0) + h_{RP} - h_{fuel(vapor)} \right] \quad [kW]$$

ג. חישוב אנרגיית התוצרים, \dot{H}_P :

$$\dot{H}_P = \left(\dot{m}_{CO_2} c_{p_{CO_2}} + \dot{m}_{O_2} c_{p_{O_2}} + \dot{m}_{H_2O} c_{p_{H_2O}} + \dot{m}_{N_2} c_{p_{N_2}} \right) (T_P - T_0) \quad [kW]$$

הקשרים הבאים נמצאו מתוך המשוואה הכימית ותוך כדי התייחסות לייחס המשקלים בין הדלק לכל אחד מהתוצרים. עבור תערובת עניה או סטוכיומטרית:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CO_2} &= \left(\frac{8\phi \cdot 44.01}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = 3.082 \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{H_2O} &= \left(\frac{9\phi \cdot 18.015}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = 1.42 \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{N_2} &= \left(\frac{47 \cdot 28.013}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = \frac{11.526}{\phi} \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{O_2} &= \left(\frac{12.5(1-\phi) \cdot 32}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = 3.502(1-\phi) \dot{m}_{fuel} \end{aligned}$$

כאשר:

$$\begin{aligned} c_{p_{CO_2}} &= 0.8418 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{CO}} &= 1.0413 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{H_2O}} &= 1.8723 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{N_2}} &= 1.0416 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{O_2}} &= 0.9216 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{CO_2} &= 44.01 [kg] \\ M_{CO} &= 28.01 [kg] \\ M_{H_2O} &= 18.01 [kg] \\ M_{N_2} &= 28.01 [kg] \\ M_{O_2} &= 32 [kg] \end{aligned}$$

ד. חישוב ההספק היעיל, הנקרא גם **b_p-Brake power**. הספק המנוע לבלימה, משמע ההספק המתקבל על גל הארכובה. הספק זה נקרא לעיתים גם הספק יעיל. הספק זה ניתן למצוא מתוך המומנט שנמדד בניסוי, שהרי:

$$2\pi rFN = b_p, \quad F = \frac{T}{r}$$

↓

$$b_p = \frac{2\pi TN}{60} [W]$$

כאשר:

N – מהירות סיבובית של המנוע [rpm].

T – המומנט הנמדד בניסוי [N · m].

ה. חישוב איבר אינטרקציה החום עם הסביבה, \dot{Q}_{cv} : מתוך מאזן האנרגיה:

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{W}_s + \dot{H}_p - \dot{H}_R \quad [kW]$$

ו. חישוב החום המתפנה על ידי מי הקירור, \dot{Q}_{water} :

$$\dot{Q}_{water} = \dot{m}_{water} C_{p,water} (T_2 - T_1) \quad [kW]$$

ז. חישוב ההספק המבוזבז כתוצאה מחיכוך, \dot{W}_f , הנקרא גם **f_p-Friction power**.

איבר החום מכיל בתוכו את ההספק המתבזבז מחיכוך בין רכיביו השונים של המנוע, (הנקרא לעיתים גם friction – f_p power), כמו גם את החום המתפנה בתהליך בעזרת מי הקירור. על כן:

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{Q}_{water} + f_p \quad [kW]$$

לכן:

$$f_p = \dot{Q}_{cv} - \dot{Q}_{water} \quad [kW]$$

ח. חישוב **i_p - Indicator power**:

ההספק האינדיקטורי, משמע ההספק נטו המועבר אל הבוכנה עצמה.

$$i_p = b_p - f_p = \quad [kW]$$

ט. חישוב **bsfc – Brake specific fuel consumption**:

תצורת הדלק הסגולית של המנוע. היא מוגדרת ליחידת הספק אינדיקטורי, בלימה או חיכוך.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{b_p} \quad \left[\frac{kg}{kW \cdot h} \right]$$

י. חישוב הנצילות התרמודינמית של המנוע:

נצילות המנוע מוגדרת כיחס בין ההספק היעיל המתקבל, לבין קצב אספקת האנרגיה האגורה בדלק כחום השריפה. על כן:

$$\eta = \frac{b_p}{\dot{m}_{fuel} h_{RP}}$$

יא. חישוב הנצילות המכנית של המנוע:

את הנצילות המכנית של המנוע ניתן להגדיר כיחס בין ההספק היעיל המתקבל, לבין ההספק האינדיקטורי.

$$\eta_m = \frac{b_p}{i_p}$$

3. השתמשו בתוכנת Excel לשם חישוב הנוסחאות עבור יתר המדידות.

4. הציגו את התוצאות בטבלה מסודרת.

5. בעזרת תוכנת Excel הציגו את הגרפים הבאים:

- T כפונקציה של שלוש מהירויות המנוע בשלושת המצבים השונים של המצערת.
- הנצילות התרמודינמית של המנוע בשלוש מהירויות המנוע בשלושת המצבים השונים של המצערת.
- הנצילות המכנית של המנוע בשלוש מהירויות המנוע בשלושת המצבים השונים של המצערת.
- עקומת העבודה בעומס מלא (כשהמצערת פתוחה לגמרי):

i_p כפונקציה של rpm

b_p כפונקציה של rpm

f_p כפונקציה של rpm

$bsfc$ כפונקציה של rpm

T כפונקציה של rpm

6. רשמו את מסקנותיכם בהסתמך על הגרפים. יש לבסס מסקנות אלו על ידי שימוש בנוסחאות המתאימות.

עבודה מהנה !!!

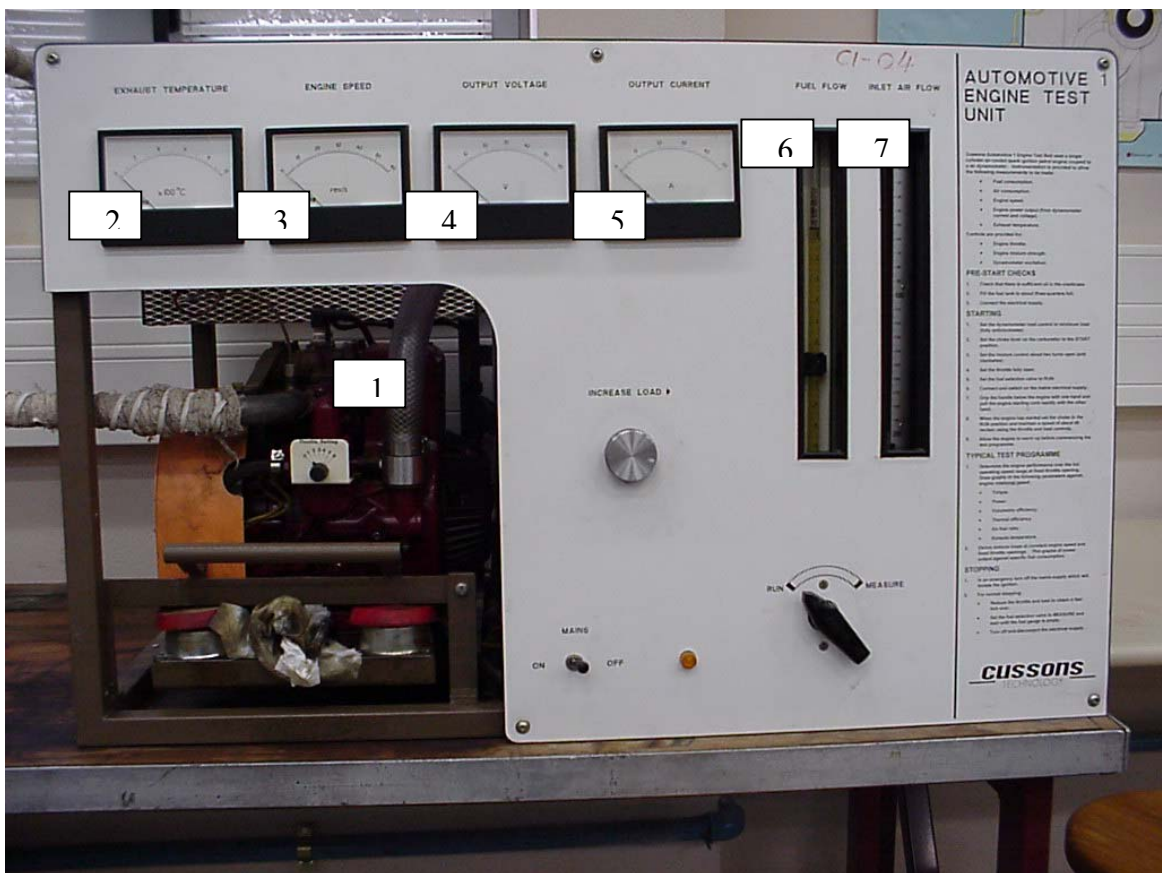
ניסוי שני – ניתוח תרמודינמי של מחזור אוטו

מטרת הניסוי

ביצוע מאזן אנרגיה על מנוע אוטו, ומציאת נצילות המנוע תוך כדי לימוד אופן המדידה וחישוב האנרגיה בצורותיה השונות: אנרגיה מכנית, אנרגיה חום ואנרגיה שריפה.

מערכת הניסוי

מערכת הניסוי בה נשתמש הנה מערכת לימודית שנרכשה מחברת Cussons Technology.



מערכת זו כוללת:

- מנוע שריפה פנימית, חד בוכנתי, ארבעה מהלכים, המקורר על ידי אויר. (1)
- אלטרננטור.
- צנרת לזרימת אויר ודלק.
- מדיד טמפרטורה (2), מד מהירות סיבובית (3), מד מתח (4), מד זרם (5), משורת דלק (6) ומד לחץ (מנומטר) (7).

האלטרננטור משמש כדינמומטר חשמלי בעזרתו ניתן לשלוט בעומס על המנוע. בעזרת המצנרת והאלטרננטור ניתן לשלוט בעומס ובמהירות הסיבוב של המנוע.

מהלך הניסוי

1. התניעו את המנוע ואפשרו את התחממותו (להתייעץ עם הטכנאי או המדריך).
2. שלטו בעומס ובמצערת בכדי לשמור על מהירות סיבובית של $50[rps]$, המתינו להתייצבות.
3. רשמו את הנתונים המתקבלים: ממד הטמפרטורה, מד המהירות, מד מתח, מד זרם, שינוי גובה הנזול במנומטר וזמן התכלות נפח של $3[ml]$ דלק במשורה.
4. העלו את העומס מספר פעמים תוך כדי שמירה על מהירות סיבובית קבועה של $50[rps]$, וחזרו על שלב 3.
5. סגרו את המצערת ועצרו את המנוע.

$T_p [^{\circ}C]$ טמפרטורת פליטה	$V[V]$ מתח היציאה מהאלטרנטור	$I[A]$ זרם היציאה מהאלטרנטור	$t[s]$ זמן צריכת $3[ml]$ דלק	$\Delta h[mmH_2O]$ מפל הלחץ על הנחיר	מספר מדידה
					1
					2
					3
					4
					5

נתונים נוספים:

הערך הנתון	הפרמטר
$11[mm]$	d - קוטר נחיר בית המדידה
$750 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	ρ_{fuel} - צפיפות הדלק
$\frac{1}{14.9}$	FA_{stc} - יחס דלק אוויר סטוכיומטרי
$50[rps]$	ω - מהירות סיבובית של ציר המנוע
$0.287 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	R - קבוע הגזים של אוויר
$44,250 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	h_{RP} - אנתלפית חום השריפה
$[^{\circ}C]$	T_o - טמפרטורת הסביבה

עיבוד תוצאות

1. רשמו את מטרת הניסוי.
2. רשמו את הנוסחאות הבאות בצורתן הפרמטרית, והציגו דוגמת חישוב מפורטת בהתבסס על תוצאות המדידה הראשונה. אנא הקפידו על בדיקת ורישום היחידות.

הנוסחאות:

א. הספק הבלימה כפי שנמדד מהאלטרנטור:

$$b_p = \frac{V \cdot I}{\eta_A}$$

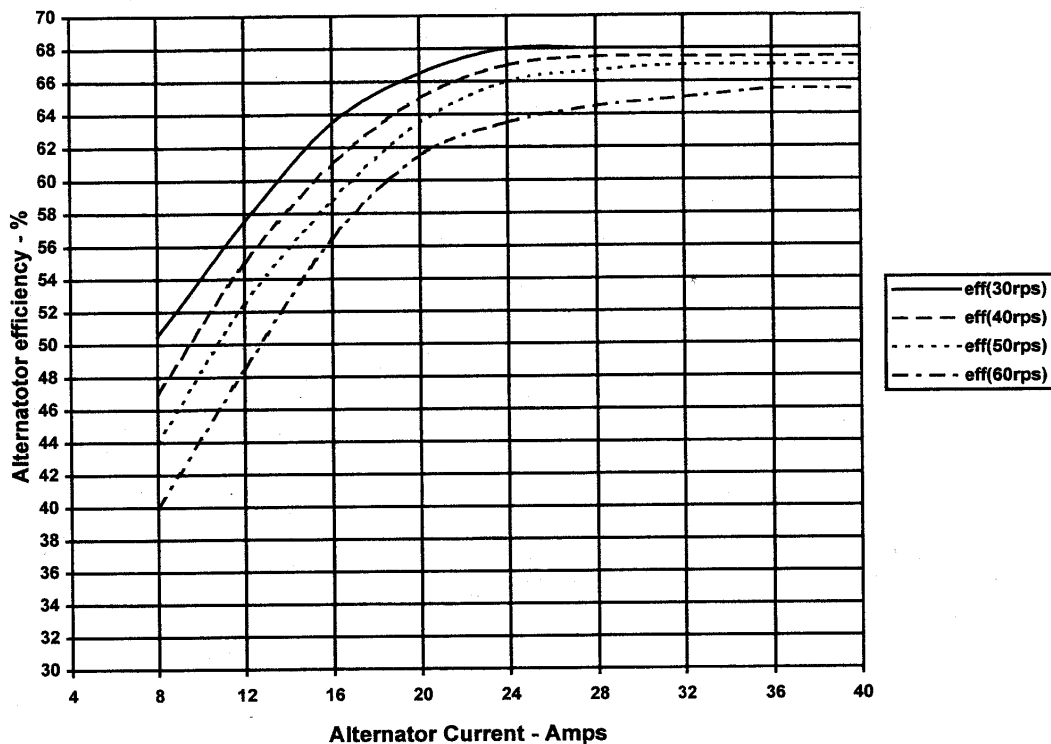
כאשר:

V הנו המתח היוצא מהאלטרנטור.

I הנו הזרם היוצא מהאלטרנטור.

η_A הנו נצילות האלטרנטור באחוזים. נצילות זו משתנה כתלות במהירות הסיבוב ובזרם.

FIGURE 2 ALTERNATOR EFFICIENCY CURVES



ב. צפיפות האוויר בתנאי הסביבה תוך שימוש במשוואת הגזים האידיאליים:

$$P_0 V = m R T_0$$

$$\frac{m}{V} = \rho$$

⇓

$$\rho_{air} = \frac{P_0}{RT_0} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

ג. הספיקה המסית של האוויר:

$$\dot{m}_{air} = 2.06 \cdot 10^{-6} d^2 \sqrt{h\rho} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

משוואה זו פותחה מתוך שימוש בחוק ברנולי.

ד. הספיקה המסית של הדלק:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{V\rho_{fuel}}{t} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

בעת הניסוי מדדתם מהו הזמן הדרוש להתכלות $\Delta V = 3[ml]$ דלק. בהסתמך על זמן זה, ניתן לחשב את ספיקת הדלק.

ה. יחס התערובת:

$$\phi = \frac{FA}{FA_{stc}} = \frac{\dot{m}_{fuel}/\dot{m}_{air}}{1/14.9}$$

יחס התערובת הנו היחס בין FA, משמע $\frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{air}}$, כפי שהתקבל בניסוי, לבין FA_{stc} , משמע $\frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{air}}$ עבור שריפה

מלאה. עבור דלק שהרכבו הכימי הנו C_8H_{18} (אוקטן), $FA_{stc} = \frac{1}{14.9}$.

יחס התערובת נע בתחום הבא: $1 < \phi < \frac{25}{17}$.

ו. אנתלפית האוויר בכניסה למנוע:
הנחה- המגיבים בטמפ' החדר.

$$\dot{H}_{air} = \dot{m}_{air} c_{p,air} (T_R - T_0) \quad [kW]$$

ז. אנתלפית הדלק בכניסה למנוע:

$$\dot{H}_{fuel} = \dot{m}_{fuel} [c_{p,fuel} (T_R - T_0) + h_{RP}] \quad [kW]$$

$$c_{p,fuel} = 1.71 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$h_{RP} = 44,250 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\dot{H}_R = \dot{H}_{fuel} + \dot{H}_{air} \quad [kW]$$

ה. אנטלפית המגיבים:

ט. אנטלפית התוצרים:

$$\dot{H}_P = (\dot{m}_{CO_2} c_{pCO_2} + \dot{m}_{CO} c_{pCO} + \dot{m}_{H_2O} c_{pH_2O} + \dot{m}_{N_2} c_{pN_2} + \dot{m}_{O_2} c_{pO_2}) (T_P - T_0) \quad [kW]$$

הקשרים הבאים נמצאו מתוך המשוואה הכימית ותוך כדי התייחסות לייחס המשקלים בין הדלק לכל אחד מהתוצרים. עבור תערובת עניה או סטוכיומטרית:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CO_2} &= \left(\frac{8\phi \cdot 44.01}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = 3.082 \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{H_2O} &= \left(\frac{9\phi \cdot 18.015}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = 1.42 \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{N_2} &= \left(\frac{47 \cdot 28.013}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = \frac{11.526}{\phi} \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{O_2} &= \left(\frac{12.5(1-\phi) \cdot 32}{\phi \cdot 114.23} \right) \dot{m}_{fuel} = 3.502(1-\phi) \dot{m}_{fuel} \end{aligned}$$

עבור תערובת עשירה:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CO_2} &= \left(\frac{9.63}{\phi} - 6.55 \right) \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{CO} &= \left(1 - \frac{1}{\phi} \right) 6.13 \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{H_2O} &= 1.42 \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{N_2} &= \frac{11.526}{\phi} \dot{m}_{fuel} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{p_{CO_2}} &= 0.8418 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{CO}} &= 1.0413 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{H_2O}} &= 1.8723 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{N_2}} &= 1.0416 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \\ c_{p_{O_2}} &= 0.9216 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{CO_2} &= 44.01 [kg] \\ M_{CO} &= 28.01 [kg] \\ M_{H_2O} &= 18.01 [kg] \\ M_{N_2} &= 28.01 [kg] \\ M_{O_2} &= 32 [kg] \end{aligned}$$

י. סה"כ איבודי האנרגיה כתוצאה מחיכוך ואיבוד חום:

$$\dot{Q} = \dot{W}_S + \dot{H}_P - \dot{H}_R \quad [kW]$$

י. הנצילות התרמודינמית של המנוע:

$$\eta = \frac{b_p}{\dot{m}_{fuel} h_{RP}}$$

יא. תצורת הדלק הסגולית:

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{b_p} \quad \left[\frac{kg}{kW \cdot h} \right]$$

3. השתמשו בתוכנת Excel לשם חישוב הנוסחאות עבור יתר המדידות.

4. הציגו את התוצאות בטבלה מסודרת.

5. בעזרת תוכנת Excel הציגו את הגרפים הבאים:

η כפונקציה של ϕ

\dot{Q} כפונקציה של b_p

η כפונקציה של b_p

BSFC כפונקציה של b_p

6. רשמו את מסקנותיכם בהסתמך על הגרפים. יש לבסס מסקנות אלו על ידי שימוש בנוסחאות המתאימות.

העשרה

<http://www.howstuffworks.com/engine2.htm>

<http://tecfa.unige.ch/staf/staf-e/paraskev/staf15/engine.html>

<http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page1/page1f.html>

<http://www.webmania.com.au/ic/welcome.html>

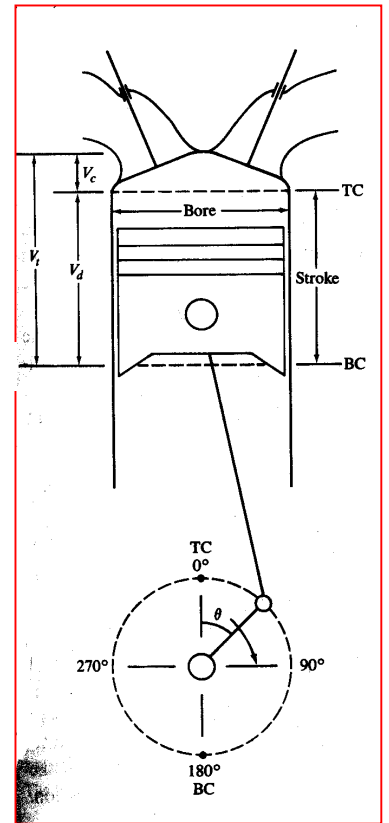
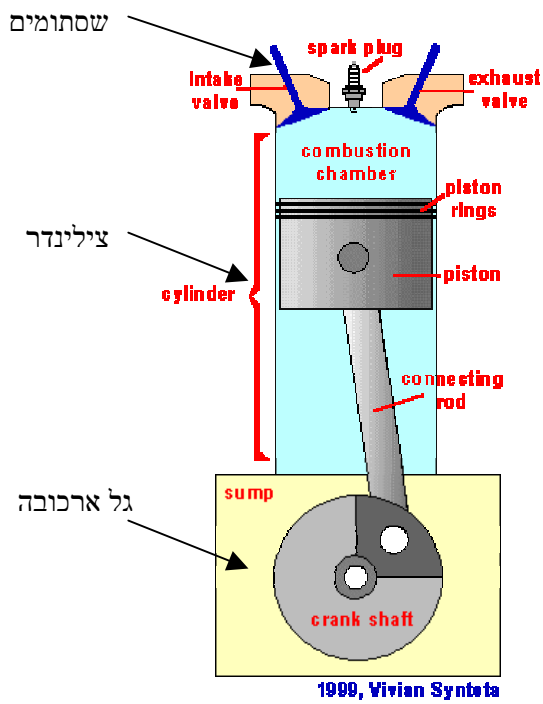
http://biketransplant.tripod.com/marc_build.htm

<http://www.coe.berkeley.edu/labnotes/0701worldssmallest.html>

ביבליוגרפיה

- שר ע, "מבוא למנועי שריפה פנימית", מכלול, 1990
- "יסודות המבנה של רכב ממונע", חיל החימוש צבא ההגנה לישראל, מערכות, 1977
- Heywood, J.B, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, 1988
- Cussons Instruction Manual, 1998

איורים



איור 1 – מבנה בוכנת המנוע

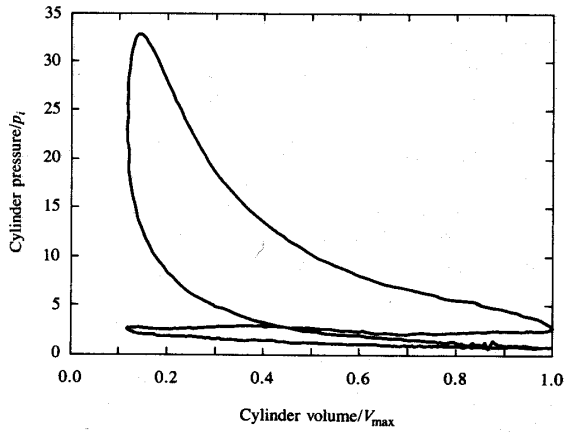
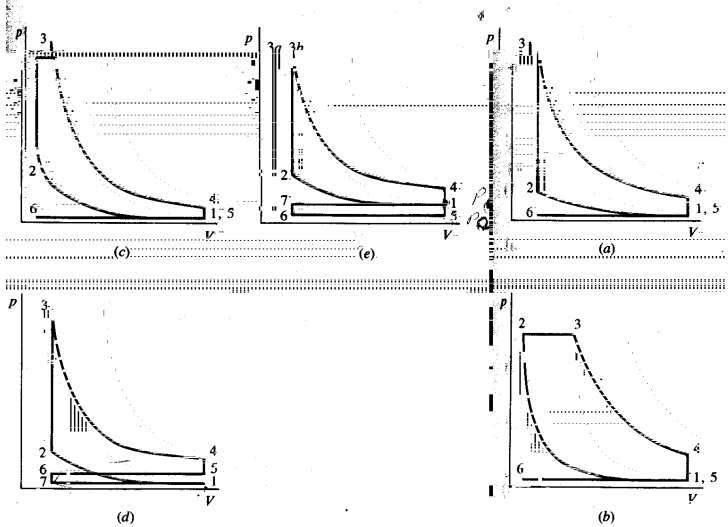


TABLE 5.1
Ideal models of engine processes

Process	Assumptions
Compression (1-2)	1. Adiabatic and reversible (hence isentropic)
Combustion (2-3)	1. Adiabatic
	2. Combustion occurs at (a) Constant volume (b) Constant pressure (c) Part at constant volume and part at constant pressure (called limited pressure)
	3. Combustion is complete ($\eta_c = 1$)
Expansion (3-4)	1. Adiabatic and reversible (hence isentropic)
Exhaust (4-5-6)	1. Adiabatic
Intake (6-7-1)	2. Valve events occur at top- and bottom-center
	3. No change in cylinder volume as pressure differences across open valves drop to zero
	4. Inlet and exhaust pressures constant
	5. Velocity effects negligible



cycles. Unthrottled operation: (a) constant-volume combustion; (c) limited-pressure combustion. (d) Throttled constant-volume cycle.

FIGURE 5-2
Pressure-volume diagrams of ideal (a) constant-volume combustion cycle; (b) constant-pressure combustion cycle; (c) limited-pressure combustion cycle; (d) throttled constant-volume cycle; (e) supercharged constant-volume cycle.

איור 2 – מחזורי PV של מנוע אוטו בתנאים שונים

TABLE 3.2
Standard enthalpies of formation

Species	State†	$\Delta\bar{h}_f^\circ$, MJ/kmol
O ₂	Gas	0
N ₂	Gas	0
H ₂	Gas	0
C	Gas	0
CO ₂	Gas	-393.52
H ₂ O	Gas	-241.83
H ₂ O	Liquid	-285.84
CO	Gas	-110.54
CH ₄	Gas	-74.87
C ₃ H ₈	Gas	-103.85
CH ₃ OH	Gas	-201.17
CH ₃ OH	Liquid	-238.58
C ₈ H ₁₈	Gas	-208.45
C ₈ H ₁₈	Liquid	-249.35

† At 298.15 K (25°C) and 1 atm.

טבלה 1 – טבלת ערכים של אנתלפיית ההיווצרות של חומרים שונים