

מדוע לא נכנסה טורבינת הגז לשימוש בהנעת  
רכב מסחרי

**טורבינת גז**

**להנעת רכב מסחרי**

# מבנה ותפעול טורבינת גז

-מנוע טורבינה כולל לפחות 4 רכיבים עיקריים :

-מדחס

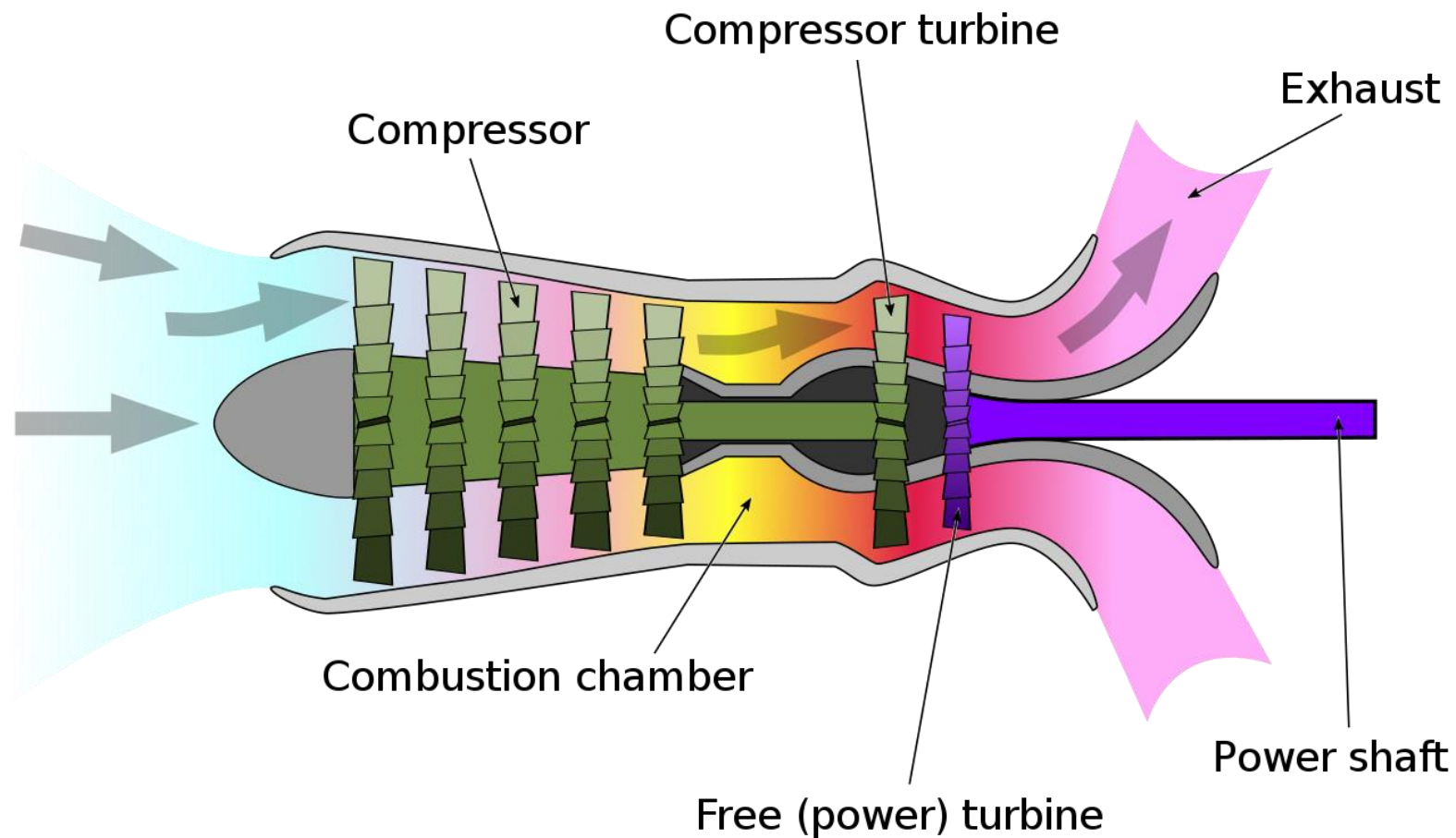
-תא שריפה

-טורבינה אחת או יותר

-צינור פליטה (כאשר תפקידו של המנוע לספק דחף זהו צנ"פ מאיץ)

המדחס יונק אוויר מהאטמוספירה , דוחס אותו ללחץ גבוה ומזרים אותו לתא השריפה בו מוזרק דלק המתרסס ומתערבב אתו. האוויר נשרף והטמפרטורה שלו עולה אך הלחץ בתא השריפה יורד באחוזים בודדים . גזי השריפה זורמים החוצה לאטמוספירה דרך טורבינה ותוך כדי כך מאבדים לחץ וטמפרטורה ומשקיעים הספק מכני בטורבינה . חלק מהספק זה מועבר מהטורבינה למדחס שמסתובב על אותו גל ויתרת ההספק היא ההספק המופק מהמנוע. בדרך כלל יש שתי טורבינות כשהראשונה מניעה את המדחס והשניה את עומס המנוע

# מבנה ופעולת טורבינת גז מסוג טורבו-גל (TURBOSHAFT)



## פיתוח מכוניות מונעות טורבינה בשנות החמישים

- אחרי מלחמת העולם השנייה הוחל בפיתוח מנועי סילון/טורבו-גל במספר מדינות במקביל להנעת כלי טיס וכשהתברר שהיחס הספק או דחף לגודל או משקל סוג זה של מנועים טוב משמעותית מאשר במנועי בוכנה, השקיעו יצרני מכוניות בפיתוח מכוניות מונעות טורבינה.
- כידוע לא החליפה טורבינת הגז את מנוע הבוכנה להנעת מכוניות נוסעים.
- אחת הסיבות לכך היא תצרוכת הדלק הסגולית הגבוהה יותר. נעמוד על הגורמים לכך.

# דוגמאות של מכוניות ניסיוניות מונעות טורבינת גז

- ROVER , JET1 , 1950
- GENERAL MOTORS , FIREBIRD , 1953
  - AUSTIN , PRINCESS TUR1 , 1954
    - FIAT , TURBINA , 1954
  - CHRYSLER ,TURBINE CAR , 1954
    - FORD , THUNDERBIRD , 1955
- RENAULT , ETOILE FILANTE , 1956
- פרט ל-CHRYSLER שהשקיעה בייצור סדרה ניסיונית ובניסויי שדה ב-1963 לפני גניזת התוכנית , לא היה המשך לניסויי אבטיפוס אלה.

התפתחות לחץ וטמפרטורת האוויר לאורך המנוע

3.2 כדי להבין את גורמי תצרוכת הדלק הגבוהה נעיין בדוגמה של מנוע הליקופטר של 508 Kw בכוח מלא עם ספיקת אוויר 0.309 Kg/h/Kw ותצרוכת דלק סגולית 60 ס"מ ואורכו 112 ס"מ. משקלו 111 ק"ג.

טמפרטורה טוטלית (C)	לחץ טוטלי (Bar)	תחנה
15	1.013	כניסה למדחס
315	8.100	כניסה לתא שריפה/יציאה ממדחס
840	7.700	כניסה לטורבינת מדחס/יציאה מתא שריפה
578	2.140	כניסה לטורבינת הספק
438	1.060	כניסה לצינור פליטה
438	1.013	יציאה מצינור פליטה

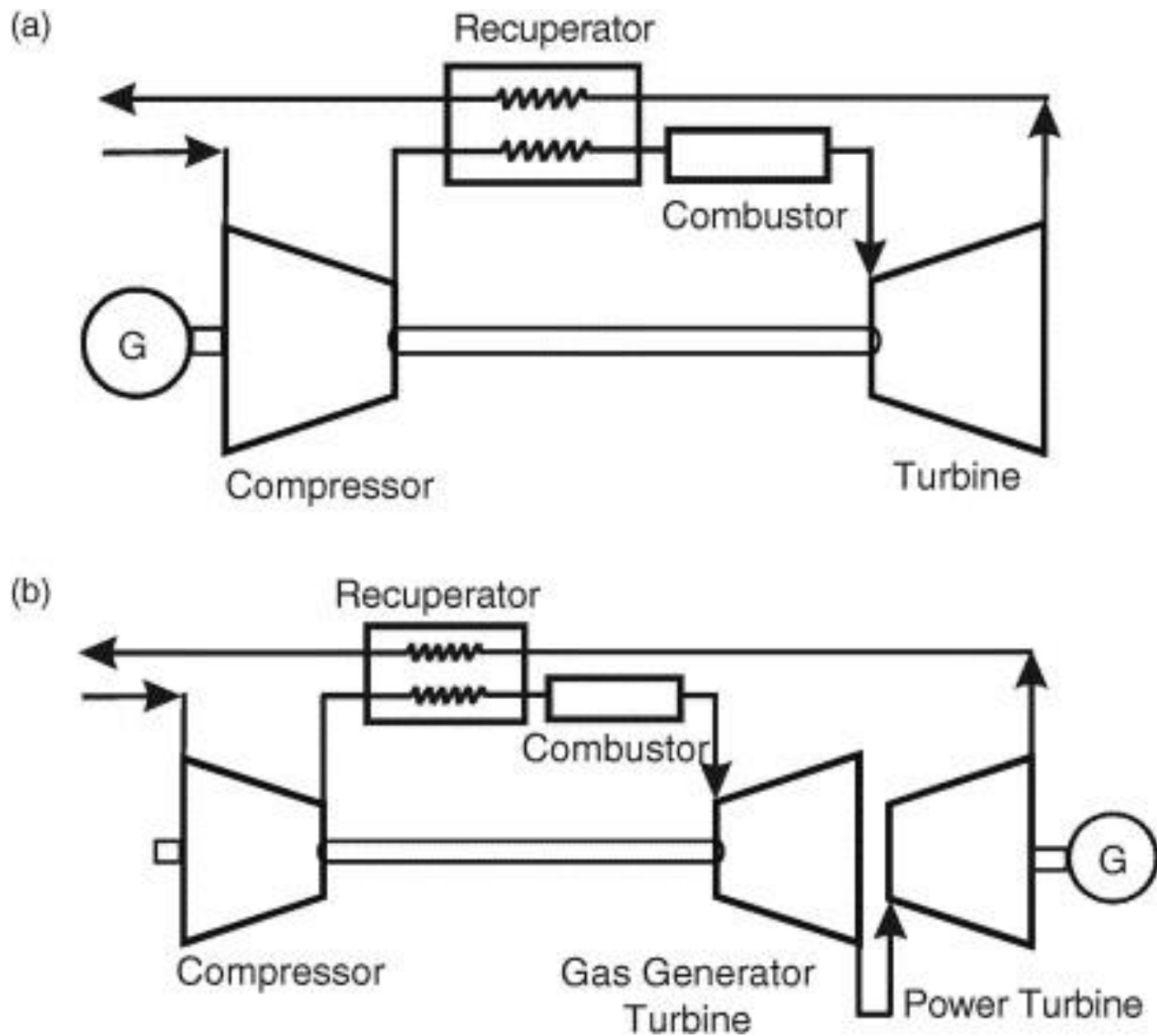
מעיון בטבלה רואים שעלית לחץ האוויר תוך זרימתו דרך המדחס מלווה בעליה של הטמפרטורה. המשמעות היא שגורם חיצוני משקיע עבודה במדחס אשר מעלה את אנרגיית האוויר. עבודה זו מבוצעת ע"י טורבינת המדחס ומופקת מירידת טמפרטורת הגזים העוברים דרכה. טמפרטורת הגזים ממשיכה לרדת בזרימתם דרך טורבינת ההספק ומירידה זו מתקבל ההספק המועיל של המנוע.

### אפשרויות של הקטנת תצרוכת הדלק הסגולית

-המשמעות של תצרוכת דלק סגולית  $0.309\text{Kg/Kw/h}$  היא נצילות של 27% של אנרגיית הדלק  
-הסיבה העיקרית לבזבז 73% מאנרגיית הדלק היא העובדה שהמנוע פולט לאטמוספירה  $3.2\text{ Kg/s}$   
אוויר שחומם ל  $438\text{ C}$  מבלי שהופק ממנו הספק מכני.

-אפשר לשפר הנצילות ע"י תיכון מנוע עם יחס לחצים גדול יותר במכסימום סל"ד אבל אם ספיקת האוויר קטנה (מפני שההספק הנדרש קטן) יש לכך גבול : בדרגות דחיסה האחרונות גובה הלהבים קטן מאוד (בגלל גידול צפיפות האוויר בלחץ גבוה) , מעברי האוויר צרים והפסדי החיכוך גדולים.  
-פתרון מעשי הוא לחמם את האוויר שיוצא מהמדחס ע"ח טמפרטורת גזי הפליטה באמצעות מחליף חום לפני כניסתו לתא השריפה. אמנם הוספת מחליף החום מגדילה מאוד את נפח המנוע אבל יש יישומים בהם פתרון זה משתלם.

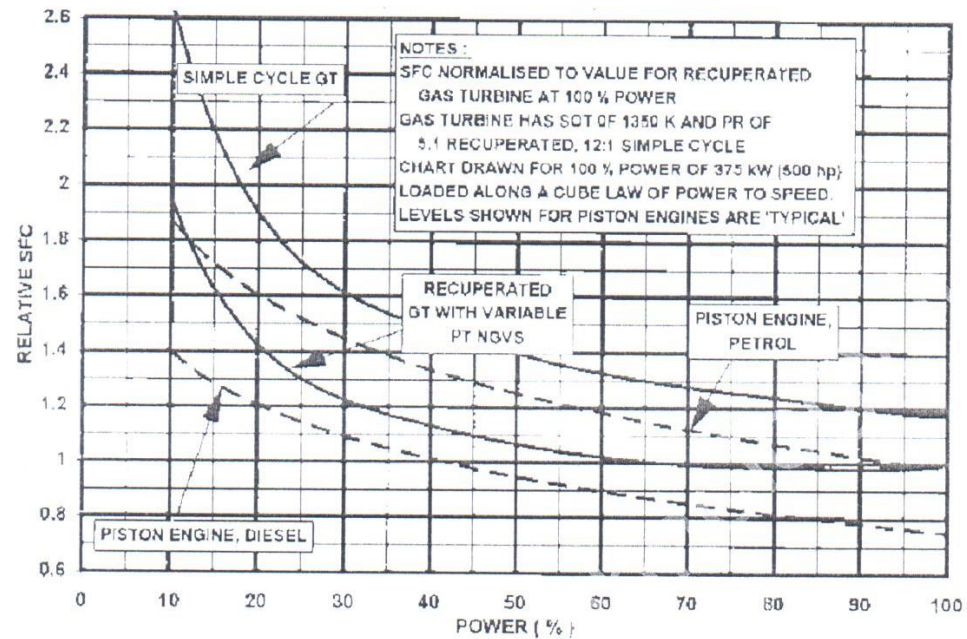
דיאגרמה  
של טורבינת  
גז עם מחליף  
חום





## Charts

Chart 1.1 Performance of gas turbines compared with piston engines.



(a) SFC versus power

השוואה בין  
 טורבינת גז  
 למנוע בוכנה

תצרוכת דלק סגולית כנגד % הספק

# תצרוכת דלק סגולית בעומס חלקי

מבדיקת הגרפים רואים שאכן תצרוכת הדלק הסגולית נמוכה יותר במנוע בוכנה.

בנוסף לכך ההבדל לרעת טורבינת הגז גדול יותר בהספק חלקי ונתון זה חשוב מאוד בהנעת רכב מפני שמנוע של מכונית נוסעים פועל רוב הזמן בהספק נמוך ממכסימום .

הסיבה לכך היא שבמנוע בוכנה יחס הדחיסה אינו תלוי ברמת ההספק לעומת טורבינת גז שפועלת בסל"ד נמוך ( ויחס דחיסה נמוך) בעומס חלקי.

שימוש במחליף חום יכול לשפר את תצרוכת הדלק הסגולית בסביבת הספק מלא אבל אינו פותר את בעיית ההספק החלקי.

# עלות הייצור של טורבינת גז

- הנתון השני לרעת טורבינת הגז הוא עלות הייצור הגבוהה שלה.
  - הסיבות לעלות הגבוהה הן :
    - שימוש בחמרים עמידים לטמפרטורות גבוהות שמחירם גבוה. חומרים קשים לעיבוד ומייקרים עוד יותר את תהליך הייצור.
    - חלקים עם צורות מסובכות לעיבוד (להבי מדחס וטורבינה)
- הוספת מחליף חום לשיפור תצרוכת הדלק גם היא מייקרת.
- שיקולי עלות הייצור הם הגורם המכריע שחסם יישום של טורבינת גז להנעת רכב מסחרי.

# השוואה בין טורבינת גז למנוע בוכנה

- גודל ומשקל המנוע בהספק נתון :
- טורבינת הגז קטנה וקלה יותר באופן משמעותי למרות תצרוכת הדלק הסגולית הגבוהה יותר.
- ספיקת אוויר נדרשת בהספק נתון :
- ספיקת האוויר גדולה פי 2-3 יותר כי יחס דלק/אוויר בטורבינת גז קטן יותר
- נתון זה משליך על תכן תעלות כניסת אוויר וסינונו וצינור פליטה.
- זיהום אוויר בהספק נתון :
- זיהום אוויר של טורבינת גז נמוך יותר בגלל יחס דלק/אוויר מופחת.
- איזון , רעידות ומהירות סיבוב :
- למכלול(ים) הסב(ים) בטורבינת גז יש צורה מאוד קרובה לגוף סיבוב לעומת מנגנון ארכובה-טלטל-בוכנה במנוע בוכנה ולכן רמת הרעידות נמוכה יותר.
- טורבינות גז יכולות לפעול במהירויות גדולות יותר וטווחי סל"ד רחבים יותר.

# השוואה בין טורבינת גז למנוע בוכנה (המשך)

---

-מערכת שמן :

---

מערכת השמן פשוטה יותר בטורבינות גז הודות לחיכוך המועט יותר.

---

-זמן התנעה :

---

זמן ההתנעה קצר יותר בטורבינת גז (בעיקר בטמפרטורות נמוכות ) בגלל מיעוט

---

החיכוך והשימוש בשמני סיכה פחות צמיגים.

---

-מומנט פיתול :

---

בניגוד לפעימות האופייניות למנוע בוכנה המומנט המופק מטורבינת גז פועל על העומס באופן רציף בזמן . כמו כן

---

טורבינת גז עם טורבינת הספק נפרדת מטורבינת המדחס יכולה לספק מומנט פיתול משמעותי כאשר מהירות

---

הסיבוב של העומס אפסית בניגוד למנוע בוכנה.

# השוואה בין טורבינת גז למנוע בוכנה (סוף)

---

עלות רכישה :

---

עלות רכישה של טורבינת גז יקרה יותר בגלל שימוש בנתכי-על/טיטניום

---

וייצור חלקים עם צורות ייחודיות.

---

אורך חיים ועלות תחזוקה :

---

החלקים החמים בטורבינת גז פועלים ברצף בטמפרטורה גבוהה לעומת

---

חלקי מנוע בוכנה המצויים 50% מהזמן בפעימות קרות (יניקה , חצי-  
דחיסה ,

---

חצי-פליטה) לכן השחיקה, צריכת חלקי חילוף ועלויות התחזוקה גדולות  
יותר

---

בטורבינת גז .