



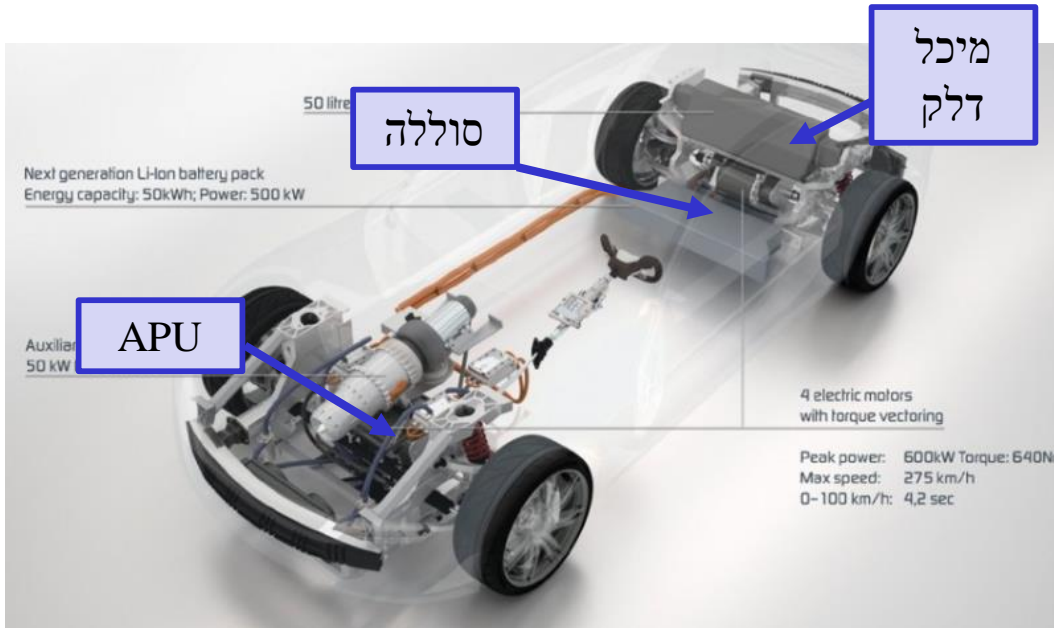
עקרונות תכן של מגדיל טווח לתחבורה המבוסס על טורבינת גז

כנס חדשנות במערכות הנעה
בית המהנדס, תל אביב, 21.02.2024

פרופ' אמריטוס ישעיהו לוי, הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל,
הטכניון



טורבינות הספק להגדלת טווח של רכב חשמלי

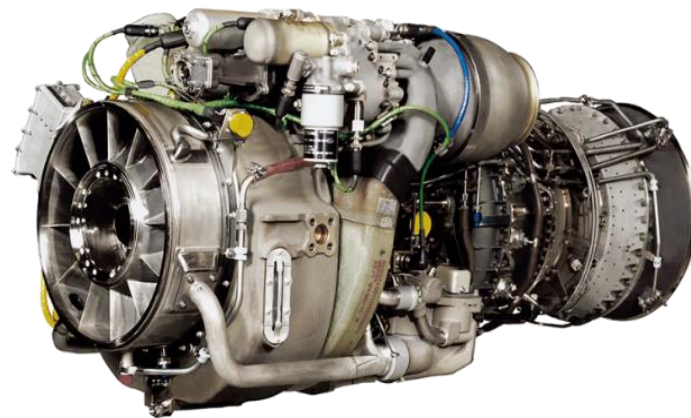


- לרכב חשמלי (EV) טווח נסיעה מוגבל ובמספר מצבים נדרש אמצעי להגדלת טווח הנסיעה.
- הפתרון בד"כ הוא שילוב של מערכת לטעינת המצברים ברכב ע"י מערכת של מנוע-גנרטור (APU) כאשר המנוע פועל בדלק בנזין או סולר.
- הגודל הפיזי של יחידת ההטענה משפיע על היכולת לשלב את המערכת בתוך הרכב.
- המנוע המניע את הגנרטור יכול להיות מסוג של מנוע בעירה פנימית או מסוג של טורבינת גז.



עקרונות תכן של מגדיל טווח לתחבורה המבוסס על טורבינת גז – פרופ' אמריטוס ישעיהו לוי,

עיקר השימוש בטורבינות גז הוא להנעת מסוקים, מטוסים מסוג טורבו-פרופלור וגנרטורים ליצור חשמל.



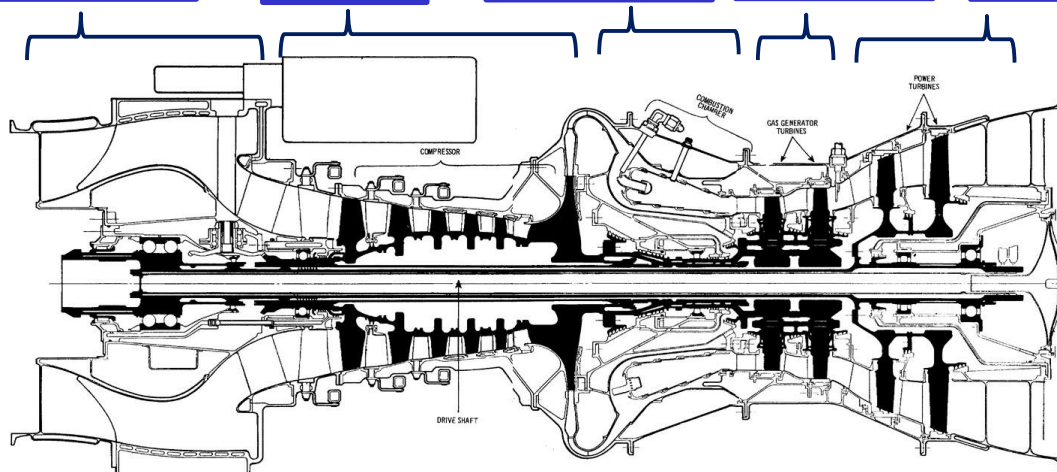
כונס/ מסנן אבק

מדהס

תא בעירה

טורבינה

טורבינה חופשית



$P \approx 2000 \text{ HP}$

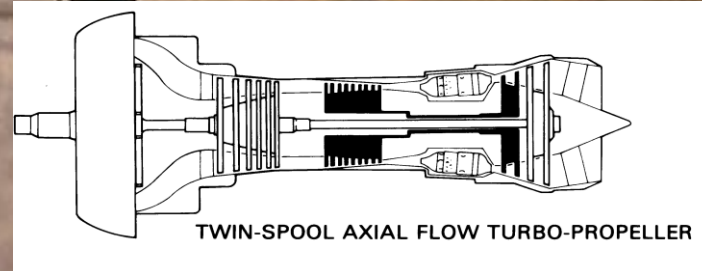
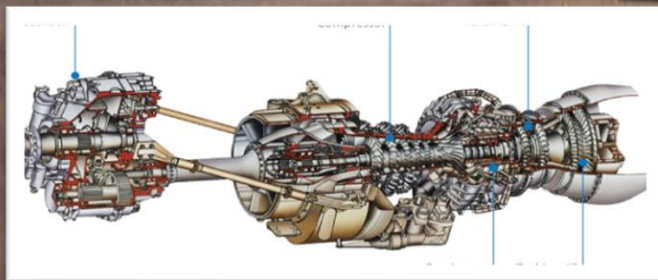
איור 1.5: טורבינת הספק GE-T700 דו צירית להנעת מסוקים



עקרונות תכן של מגדיל טווח לתחבורה המבוסס על טורבינת גז – פרופ' אמריטוס ישעיהו לוי,

TURBO – PROPELLER

טורבו – מדחף



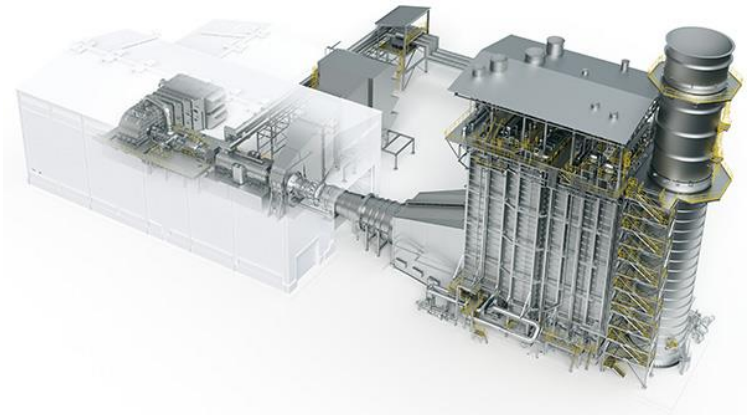
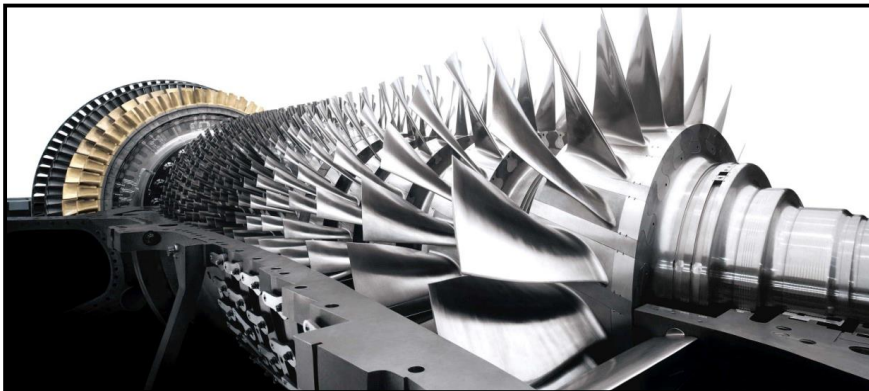
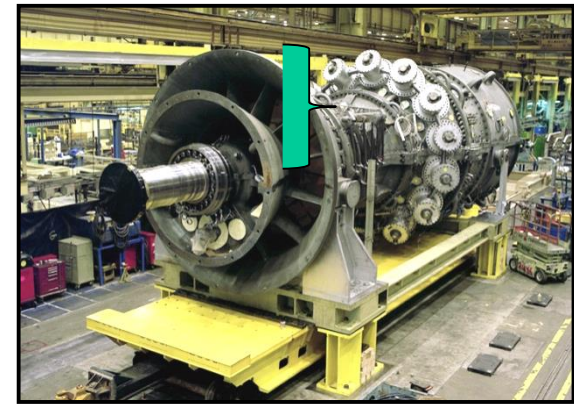


Advanced Gas Turbine Technology

GE 9HA.02 – 50 Hz - 575 MW

$\eta_{\text{Simple cycle}} = 44\%$

$\eta_{\text{Combined cycle}} = 64\%$

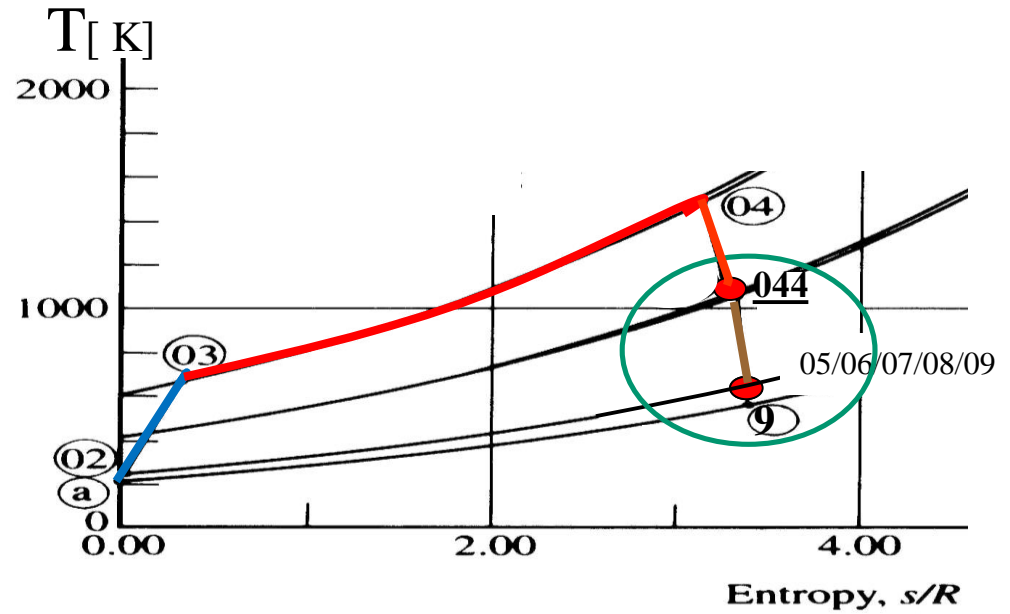




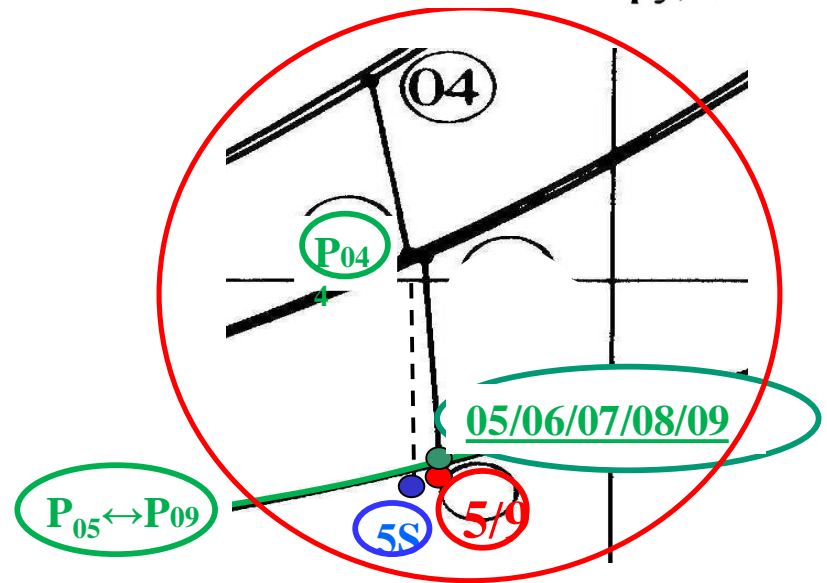
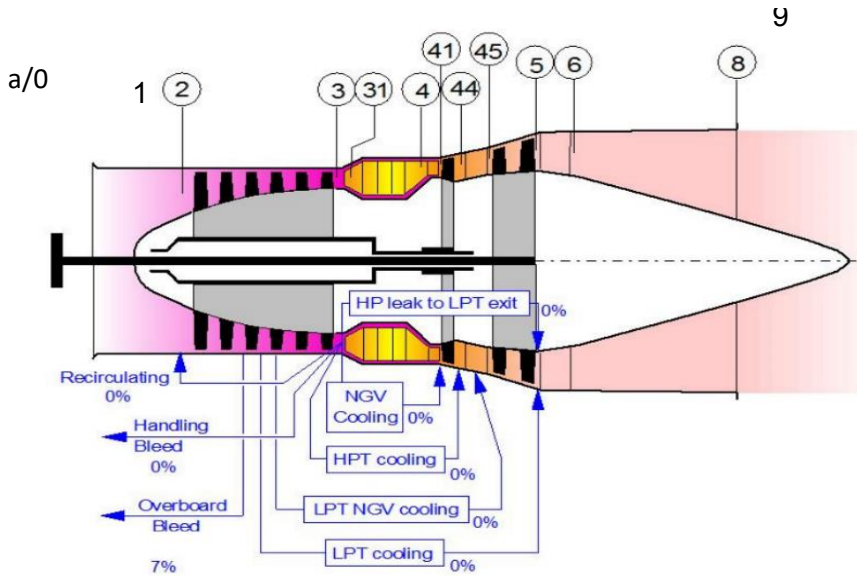
עקרונות תכן של מגדיל טווח לתחבורה המבוסס על טורבינת גז – פרופ' אמריטוס ישעיהו לוי,

תיאור מחזור ברייטון (ג'אול) של טורבינת גז

דיאגרמת T-S למחזור ברייטון ששל
טורבינת הספק בעלת רכיבים מעשיים
כולל הרחבה של אזור הטורבינות.

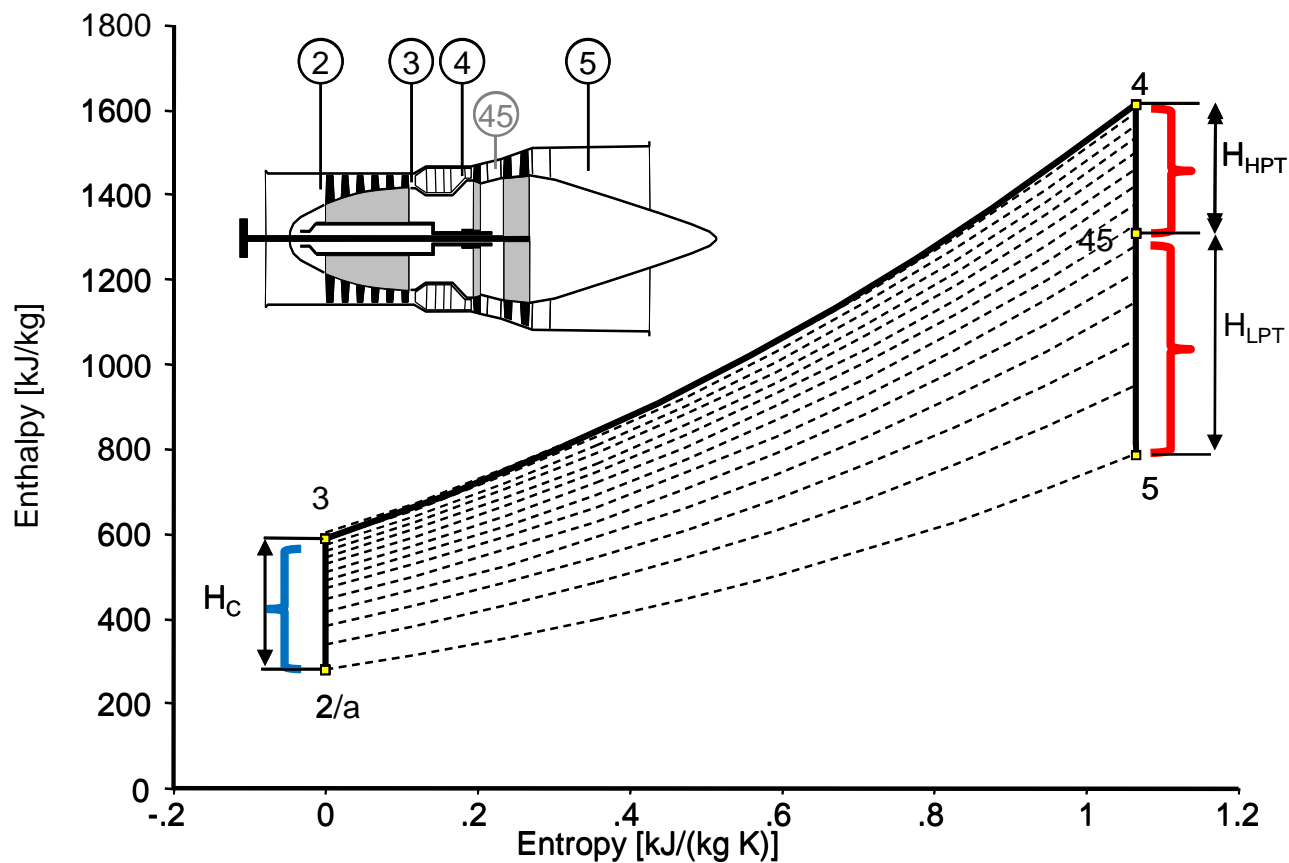


סימוני תחנות במנוע "טורבינת גז"





ניתוח מחזור ברייטון (אידאלי)





תיאור מחזור ברייטון (ג'אול) של טורבינת גז

הנחות: 1. מהירויות נמוכות בכניסה וביציאה מהמנוע:

$$u = 0$$

$$u_5 \approx 0$$

2. תכונות הזורם קבועות לאורך המנוע:

$$C_p; \gamma = \text{constant}$$

3. מפלי לחץ בתוך המנוע זניחים:

$$\frac{P_{03}}{P_{04}} = 1 \quad f \rightarrow 0$$

$$\frac{P_a}{P_5} = 1$$

4. תהליכי זרימה בכונס, במדחס, בתא הבעירה

ובטורבינה אידאליים ונטולי חיכוך:

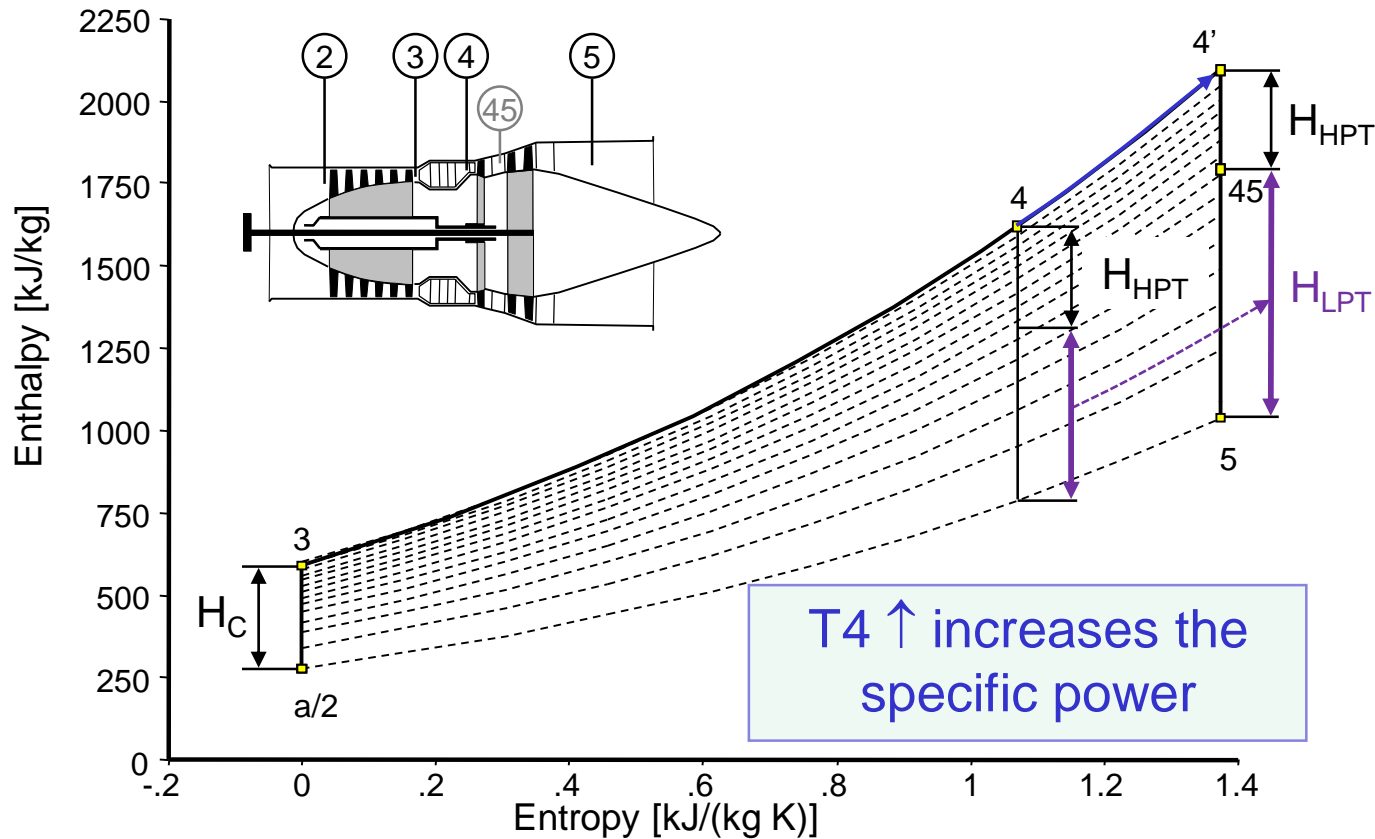
$$\eta_{i(i=d,c,b,t,n,m)} = 100\%$$

$$S_{03} = S_a$$

$$S_{04} = S_9$$



השפעה של הגדלת הטמפרטורה בכניסה לטורבינה על ההספק הסגולי של המנוע.



$$T_{0a} = T_a$$

$$T_{09} = T_9$$

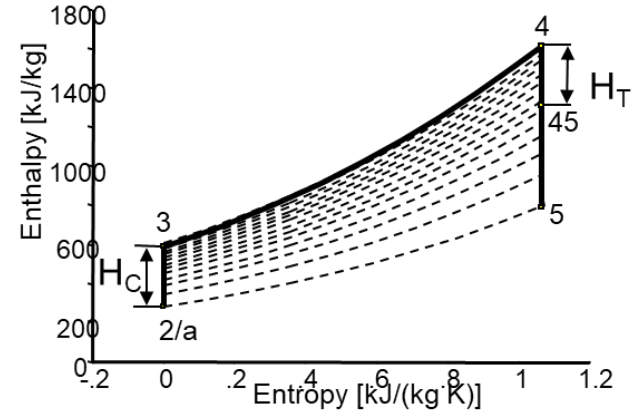
$$P_{0a} = P_a$$

$$P_{09} = P_9$$



נצילות המחזור = (הספק נטו חלקי אנרגיה מושקעת):

$$\eta = \frac{\overbrace{C_P (T_{04} - T_5)}^{\text{TURBINES POWER}} - \overbrace{C_P (T_{03} - T_a)}^{\text{COMPRESSOR POWER}}}{\underbrace{C_P (T_{04} - T_{03})}_{\text{INVESTED ENERGY}}}$$



עבור C_p קבוע:

$$\eta = 1 - \frac{T_5 - T_a}{T_{04} - T_{03}}$$

עבור נצילות רכיבי מנוע של 100% (תהליכים איזנטרופיים):

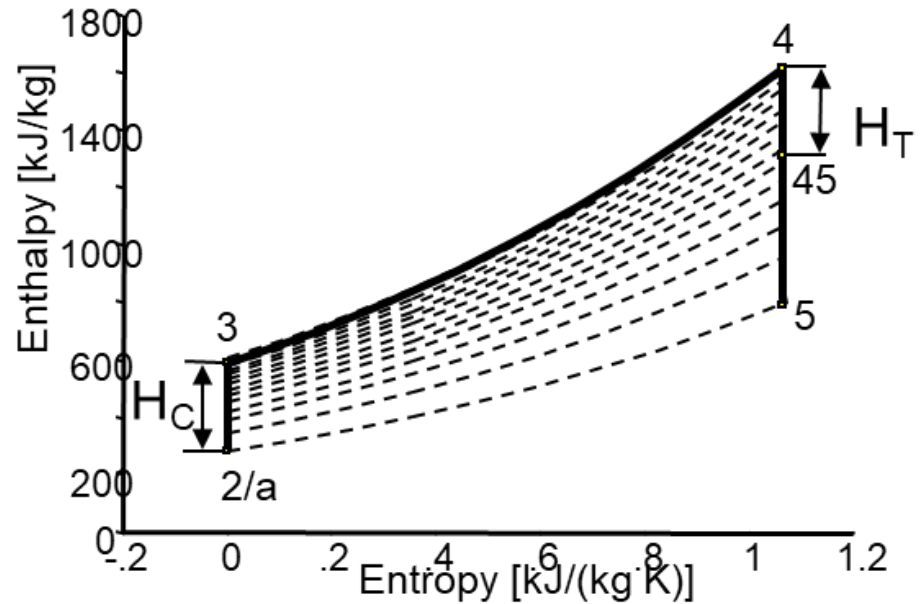
$$\frac{P_{04}}{P_5} = \frac{P_{03}}{P_a} \Rightarrow \frac{T_{04}}{T_5} = \frac{T_{03}}{T_a} \Rightarrow \frac{T_5}{T_a} = \frac{T_{04}}{T_{03}}$$



$$\eta = 1 - \frac{T_a \left(\frac{T_9}{T_a} - 1 \right)}{T_{03} \left(\frac{T_{04}}{T_{03}} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_a}{T_{03}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_{03}}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

נעזרנו בקשר
של תהליך
איזנטרופי:

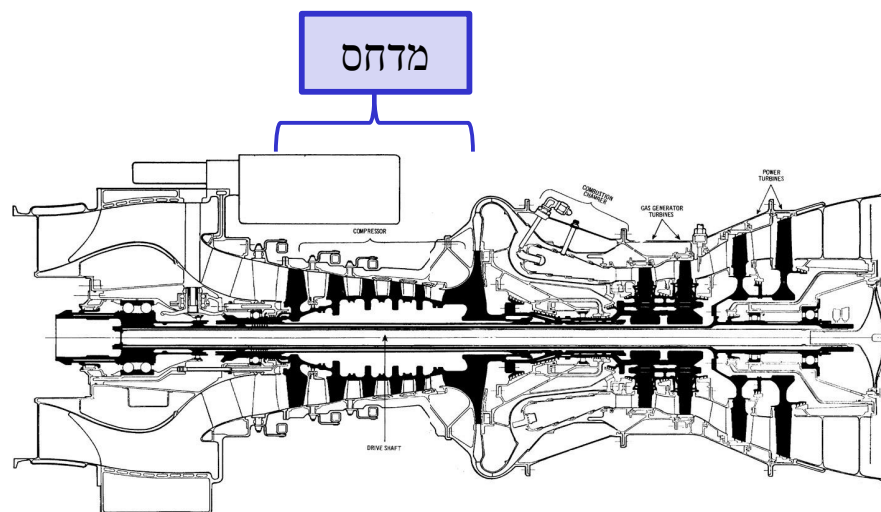
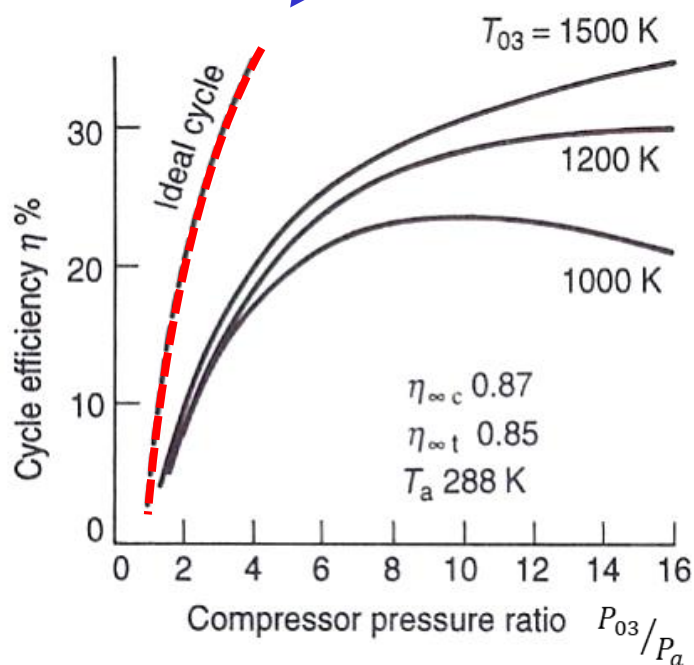
$$\frac{T_{03}}{T_a} = \left(\frac{P_{03}}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$





נגדיר את יחס הטמפרטורות ויחס הלחצים בצורה חסרת ממד:

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{P_{03}/P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$



והנצילות תלויה (וגדלה) עם יחס
הלחצים במדחס ($\gamma=1.4$)



$$\left[\frac{\frac{\frac{J}{s}}{Kg}}{\frac{J}{(Kg \cdot K)} \cdot K} \right] [-] \frac{P}{\dot{m} \cdot C_p T_a}$$

ההספק הסגולי (המנורמל) המתקבל לכל ק"ג אויר לשנייה שזורם דרך המנוע.

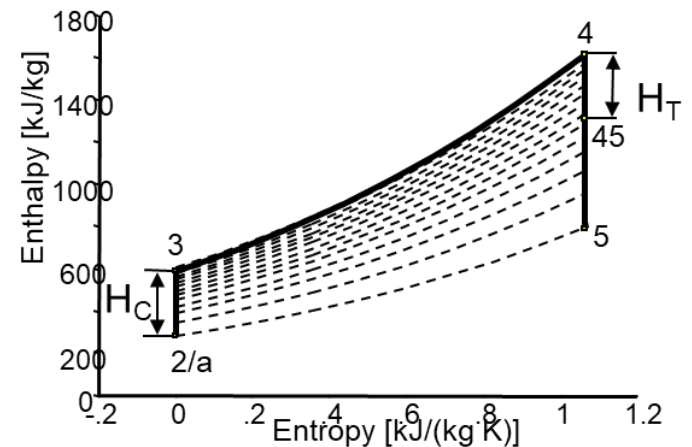
$$P = \dot{m} [C_p (T_{04} - T_9) - C_p (T_{03} - T_a)]$$

ההספק הסגולי נטו:

$$P = \dot{m} \left[C_p T_a \left[\frac{T_{04}}{T_a} \left(1 - \frac{T_9}{T_{04}} \right) - \left(\frac{T_{03}}{T_a} - 1 \right) \right] \right]$$

$$\delta \equiv \frac{P_{03}}{P_a} \quad \theta \equiv \frac{T_{04}}{P_a}$$

$$\frac{T_9}{T_{04}} = \left(\frac{P_{03}}{P_a} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \delta^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$





הספק סגולי נטו (מנורמל):

$$\frac{P}{\dot{m} \cdot C_p T_a} = \theta \left(1 - \delta^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) - \left(\delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

חישוב יחס דחיסה אופטימלי לקבלת הספק סגולי מנורמל מקסימלי עבור יחס טמפרטורות (θ) נתון:

$$\frac{\partial \left(\frac{P}{\dot{m} \cdot C_p T_a} \right)}{\partial \left(\delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} \Bigg|_{\theta=\text{const.}} = 0$$



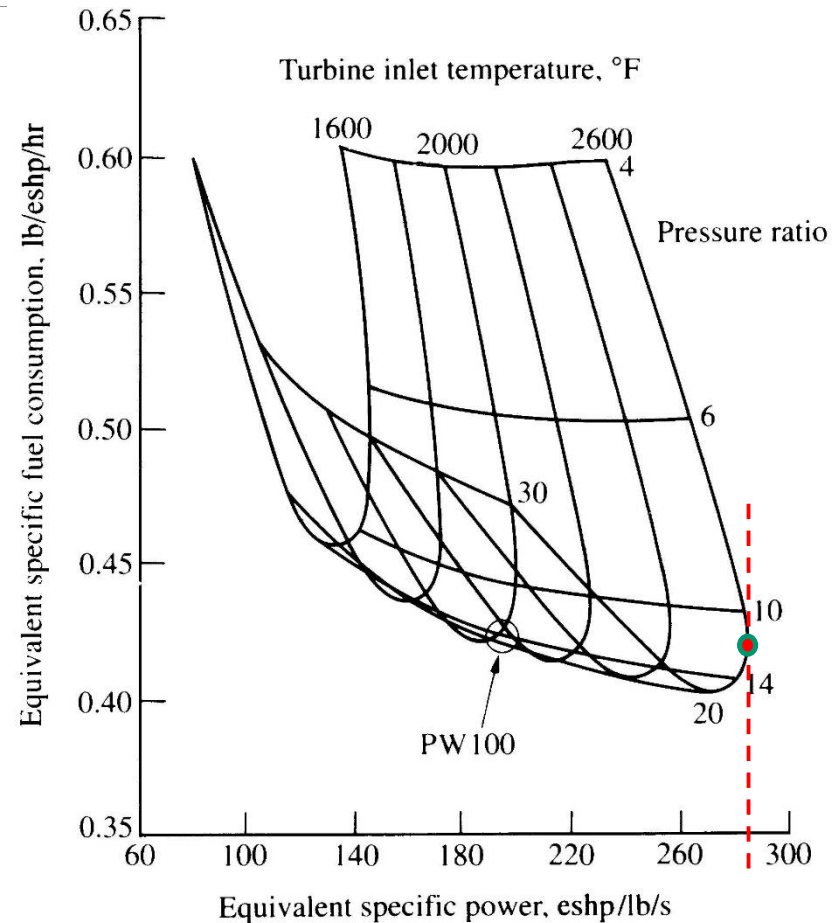
$$\delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \theta^{\frac{1}{2}} \rightarrow \delta = \theta^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$$

$$\frac{P_{03}}{P_a} = \left(\frac{T_{04}}{T_a} \right)^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$$

$$\gamma = 1.4 \rightarrow \delta = \theta^{1.75}$$

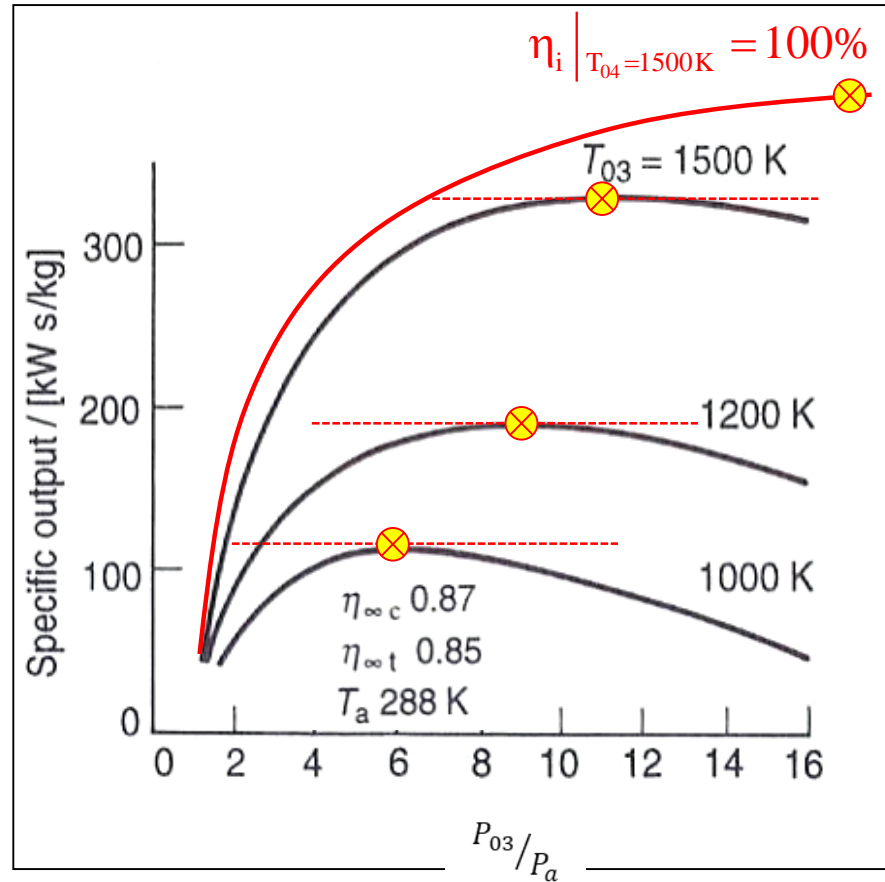
$$\text{for: } T_{04} = 1500 \text{ K}$$

$$\theta = 5 \rightarrow \delta = 16.72$$





הספק סגולי כנגד יחס לחצים וטמפרטורה כולל השפעת נצילות הרכיבים



$$\theta = 5 \rightarrow \delta = 16.72$$

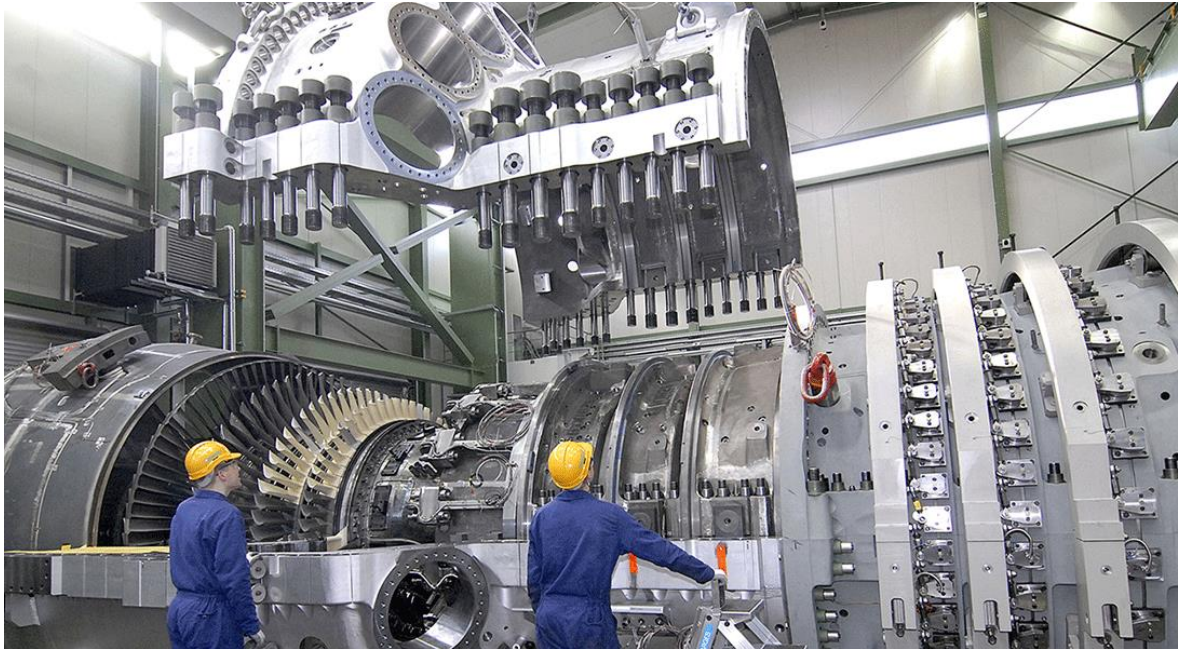


עקרונות תכן של מגדיל טווח לתחבורה המבוסס על טורבינת גז – פרופ' אמריטוס ישעיהו לוי,

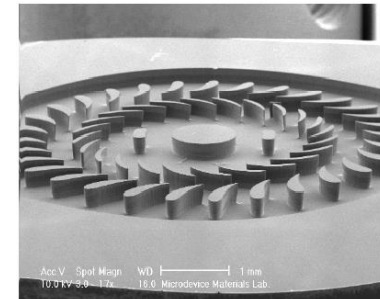


המנוע שריפה פנימית Wärtsilä RT-flex96C בעל כ 109,000 כ"ס

וט"ג מסדרת GE - 9HA.02 מייצרת עד כ 770,000 כ"ס ב 44% נצילות ע"י מנוע בודד.

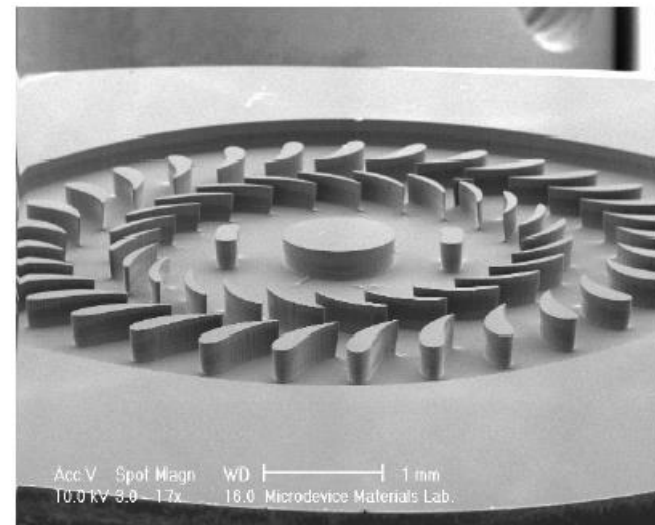
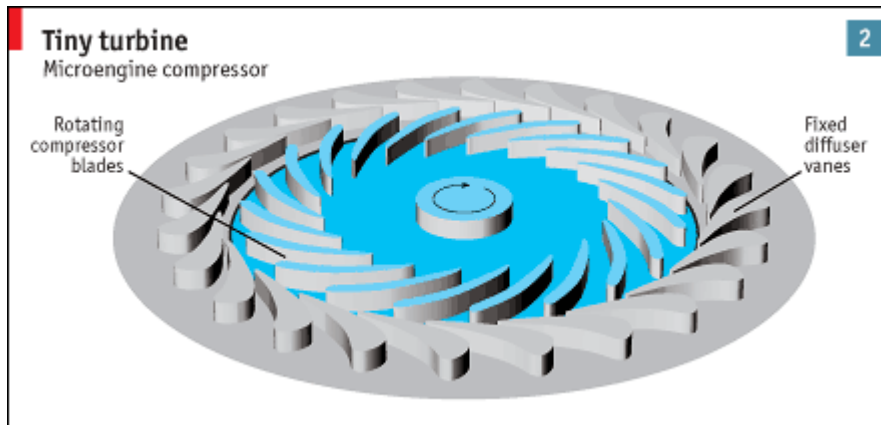
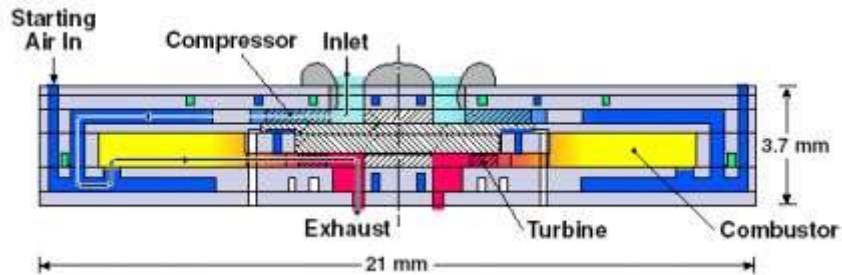


ויש גם...





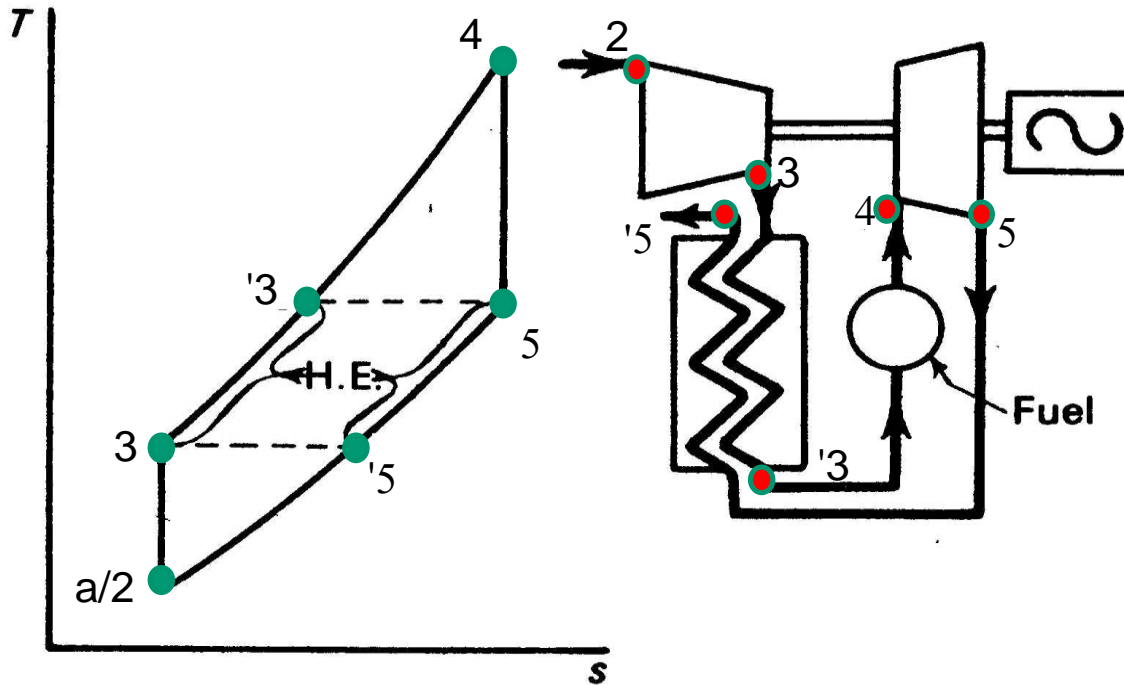
MICROTURBINES





מערכת של טורבינת גז עם מחליף חום

(כאשר כל הרכיבים הם אידאליים)



$$\eta_{i(i=d,c,b,t,n,m)} = 100\%$$

$$\eta_{h.e.} = 100\%$$

$$\frac{P_{03}}{P_{04}} = 1$$

$$f \rightarrow 0$$

$$\frac{P_a}{P_5} = 1$$

$$u_5 \approx 0$$

$$u = 0$$

$$C_p; \gamma = \text{Constant}$$



$$\eta_{H.E.} = \frac{C_p (T_{04} - T_5) - C_p (T_{03} - T_a)}{C_p (T_{04} - T_{03'})}$$

$$T_5 = T_{03'}$$

$$T_{03} = T_{5'}$$

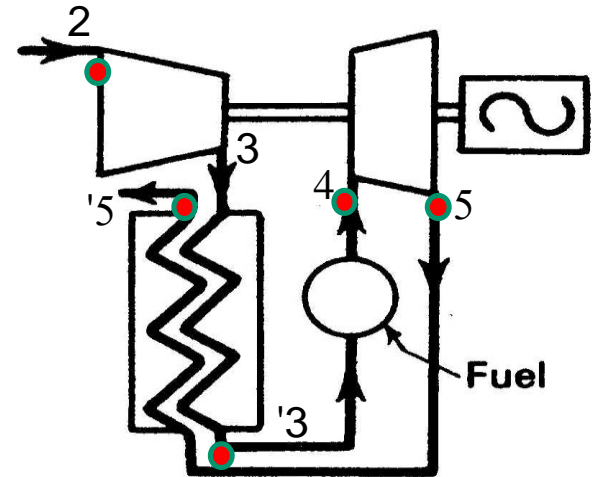
מחליף חם אידיאלי:

$$\eta_{H.E.} = 1 - \frac{\frac{T_{03} - 1}{T_a} T_a}{\frac{T_{04} - 1}{T_5} T_5} = 1 - \frac{T_a}{T_5} = 1 - \frac{T_a}{T_{04}} \frac{T_{04}}{T_5}$$

$$\delta \equiv \frac{P_{03}}{P_a}$$

$$\theta \equiv \frac{T_{04}}{P_a}$$

$$\eta_{H.E.} = 1 - \frac{1}{\theta} \delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$





התנאי לכדאיות שימוש במחליף חם הוא:

$$\eta_{\text{H.E.}} > \eta_{\text{noH.E.}}$$

ז.א. כאשר:

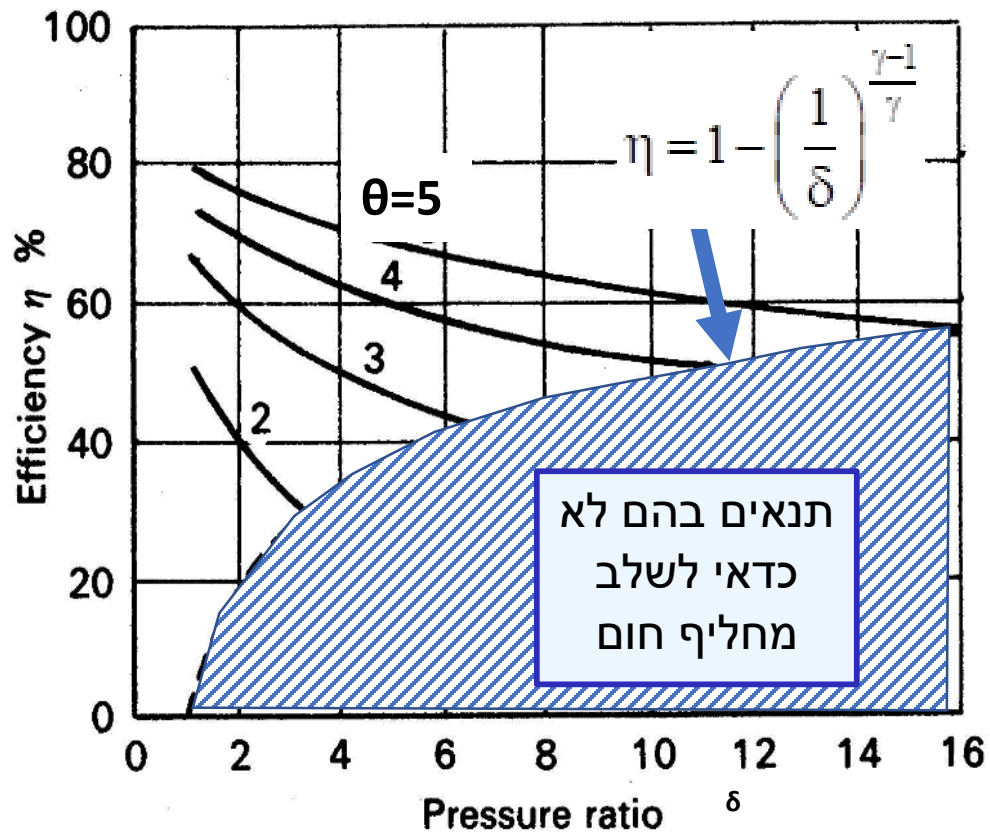
$$1 - \frac{1}{\theta} \delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} > 1 - \frac{1}{\delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

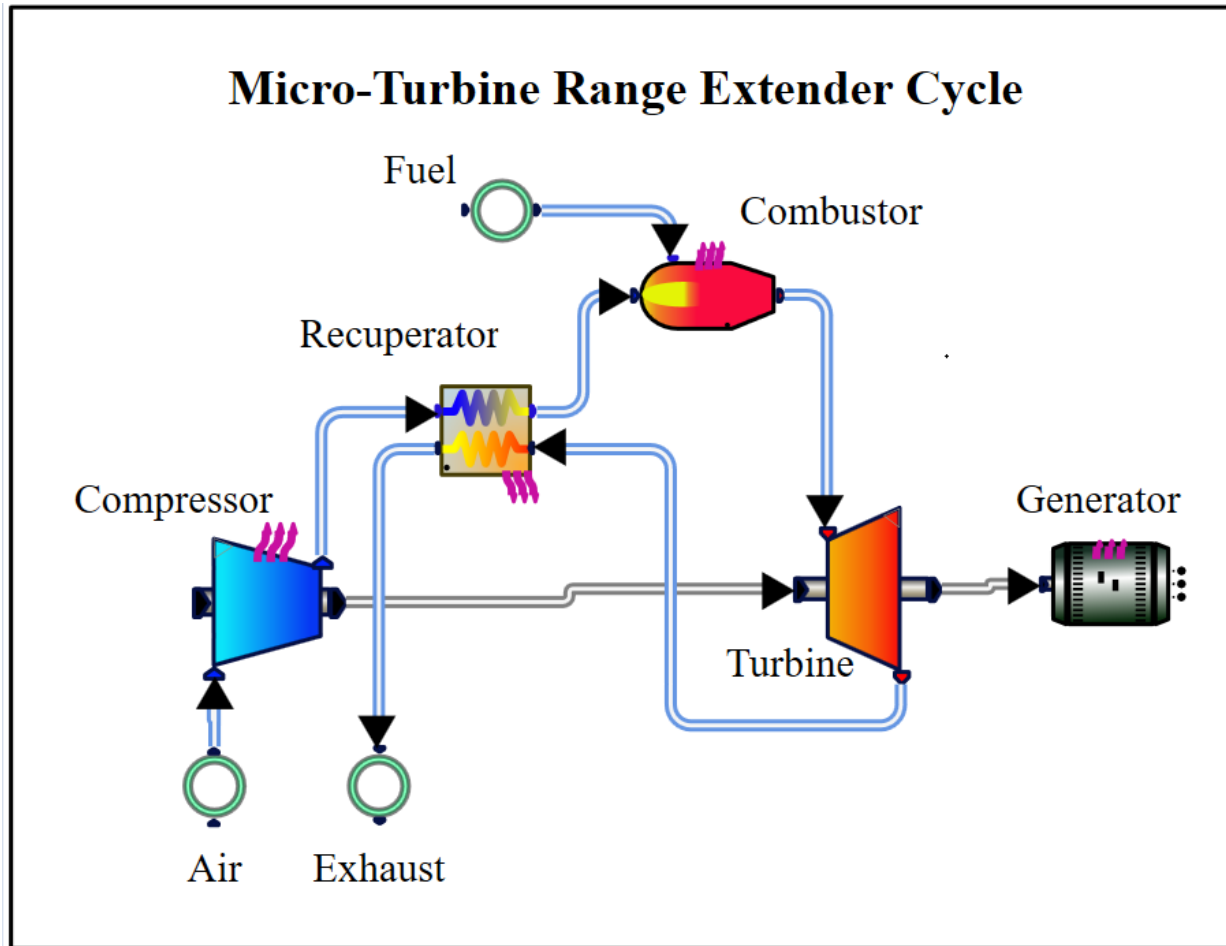
$$\frac{1}{\theta} < \frac{1}{\delta^{\frac{2(\gamma-1)}{\gamma}}}$$

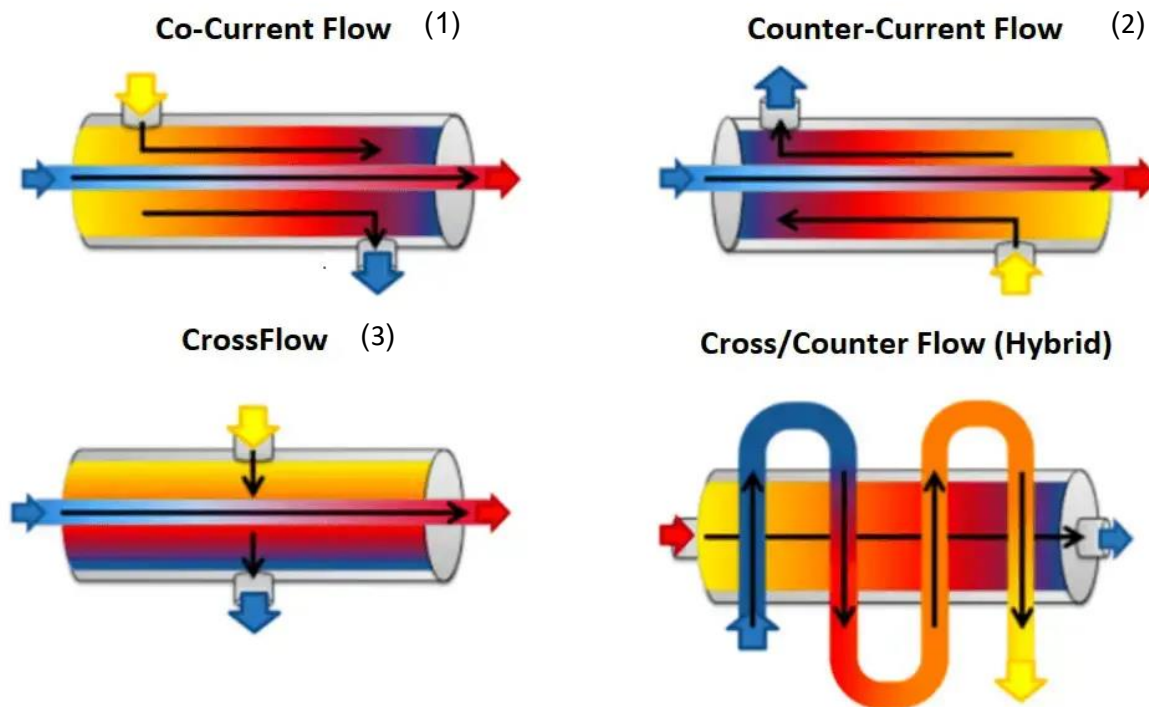
$$\theta > \delta^{\frac{2(\gamma-1)}{\gamma}} \quad ; \quad \delta < \theta^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$$



$$\eta_{H.E.} = 1 - \frac{1}{\theta} \delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$



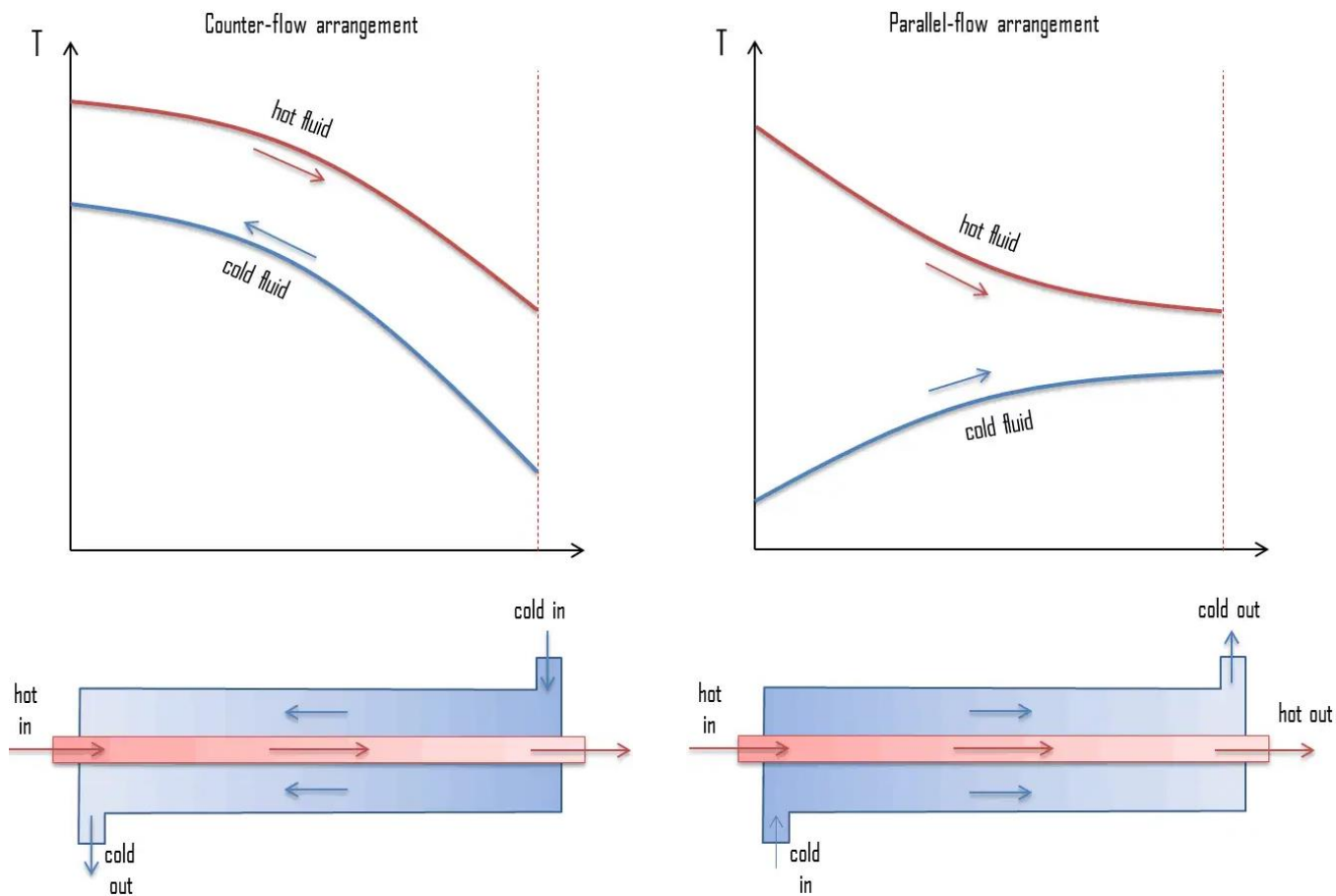




דוגמאות של סוגים שונים מחליפי חום: מחליף חום עם זרימה מקבילה (1), מחליף חום עם זרימה הפוכה (2), מחליף חום עם זרימה צולבת (3) ומחליף חום עם מסלול זרימה היברידי (4)



ההתנהגות התרמית של מחליף חום עם זרימה הפוכה ושל מחליף חום עם זרימה מקבילה

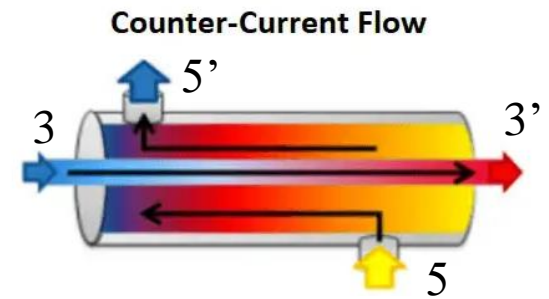




בחישוב מדוייק של המחזור יש גם להתחשב בנצילות של מחליף החם עצמו.

$$\eta_{h.e} = \frac{\text{Transferred Energy}}{\text{Potential Transfer of Ener}}$$

$$\eta_{h.e} = \frac{\dot{m}_3 C_{Pc} (T_{03'} - T_{03})}{\dot{m}_5 (C_{Ph} T_{05} - C_{Pc} T_{03})}$$



חוק שימור האנרגיה

$$\dot{m}_3 C_{Pc} (T_{03'} - T_{03}) = \dot{m}_5 C_{Ph} (T_{05} - T_{05'})$$



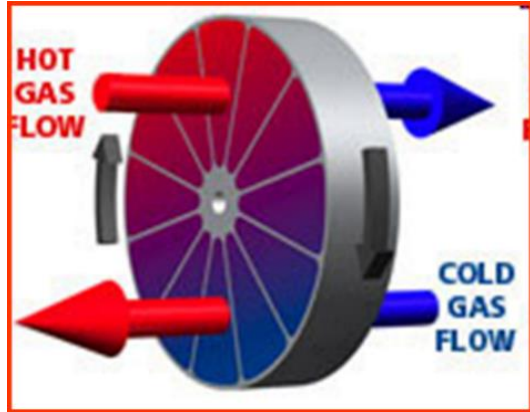
שני סוגים ש מחליפי חום:

רגנרטיבי (regenerative): חום מעבר מהזורם החם (המקורר) לתוֹך ביניים בעל קיבול חום גבוה ובהמשך, החום האגור בתוֹך מעבר לזורם הקר (המחומם).

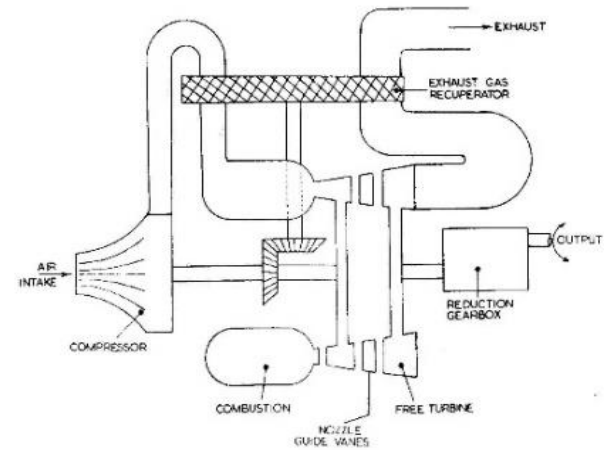
רקופרטיבי (recuperative): חום עובר מהזורם החם (המקורר) דרך דופן אטומה ומוליכת חום ישירות לזורם הקר (המחומם).



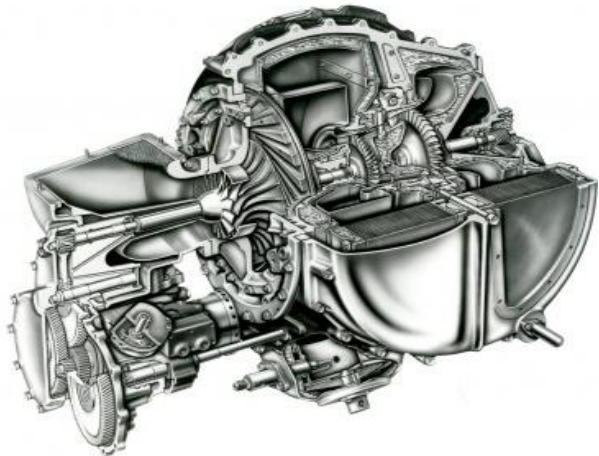
מחליף חום רגנרטיבי (regenerative):



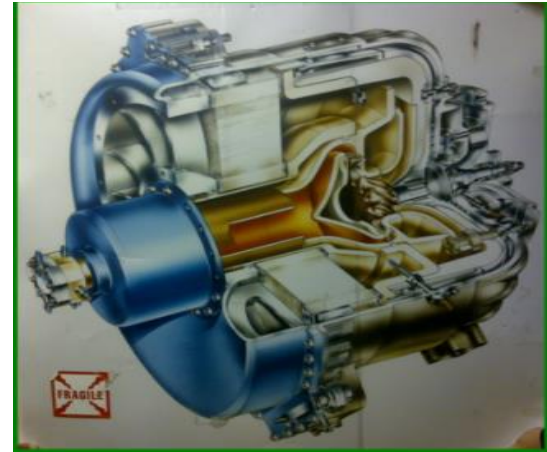
.א



.ב



.ג



.ד

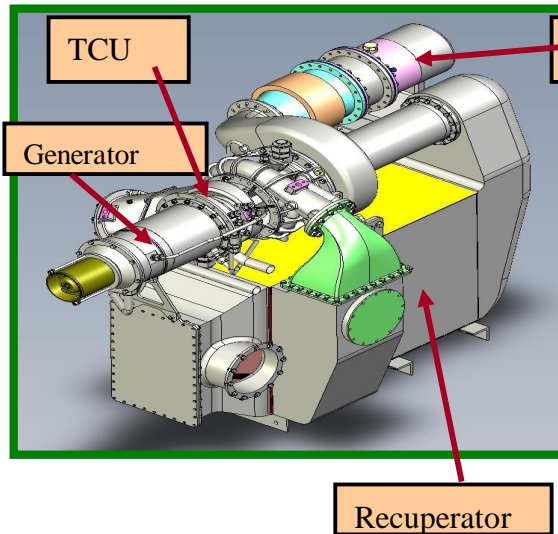
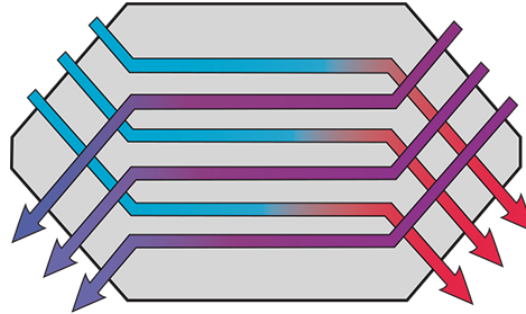
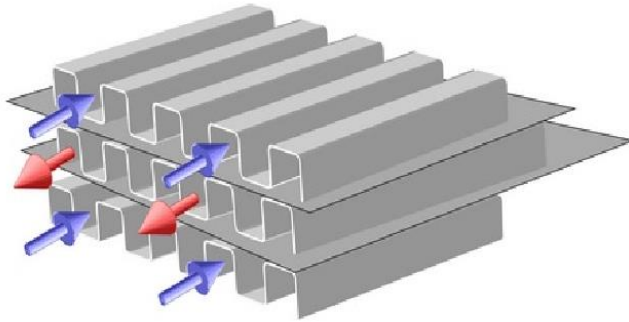
א- גלגל קרמי פורוזיבי סובב ב. סכמות דו ממדיות של הזרימה בט"ג

ג. ט"ג עם זו גלגלים קרמיים בעלי ציר סיבוב בניצב לציר הראשי של המנוע מתוצרת קרייזלר

ד. ט"ג עם גלגל קרמי עם ציר סיבוב בהמשך לציר הראשי של המנוע מתוצרת חברת Allison



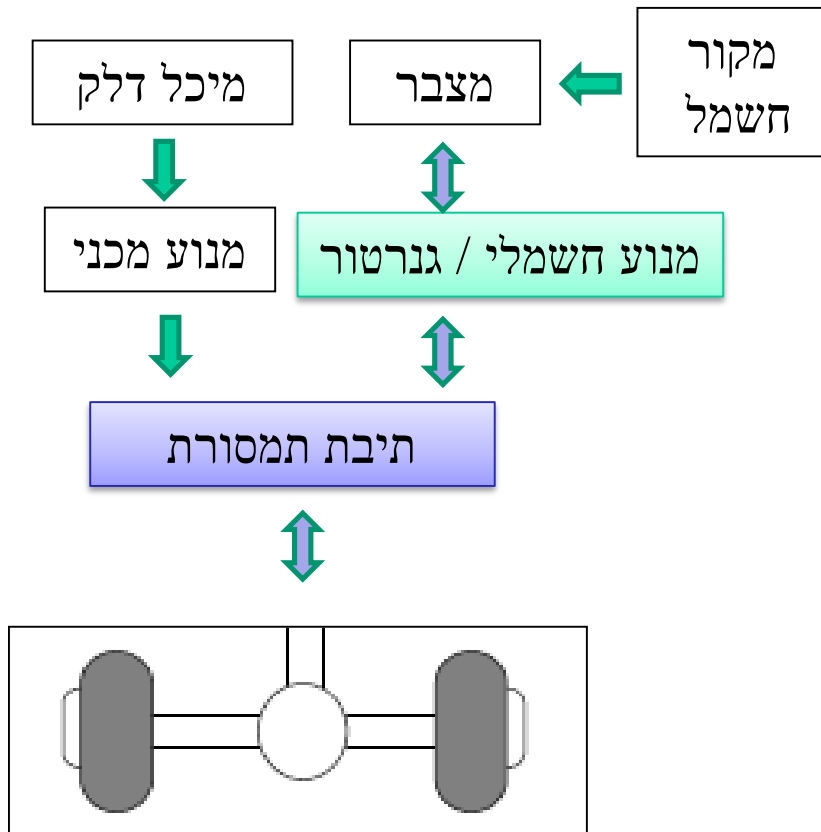
מחליף חום רקופרטיבי (recuperative):



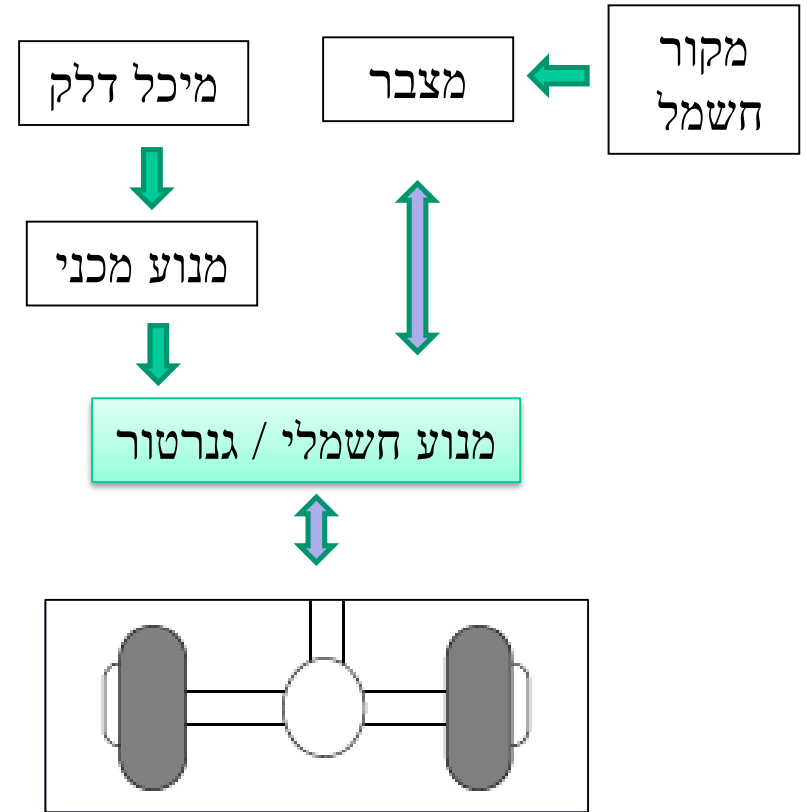
9-40 KW Electrical Output
80 K RPM, 400 VAC 3 Ø
1300 Hz
P.R : 3
Thermal Efficiency 36 %
Weight: 120kg



מערכת משולבת מקבילה



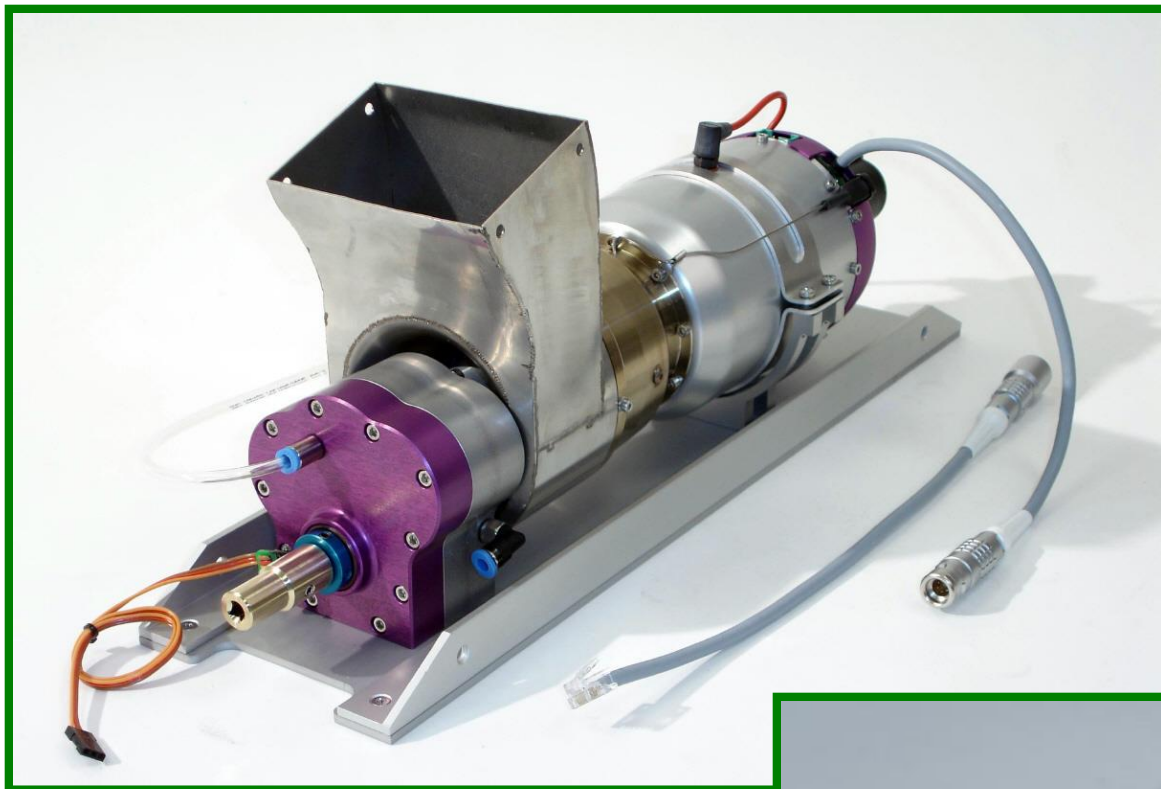
מערכת משולבת טורית





טורבינת הספק עם מחליף חום רקופרטיבי, יצור בהדפסה 3D טכניון





6 KW free turbine Turbo shaft

Max RPM : 170000 RPM

Weight : 5 Kg



LMT 3080

AC Alternator

11 KW, 110 v AC

Max RPM : 50000 RPM

Weight : 1.6 Kg

Diameter : 60 mm

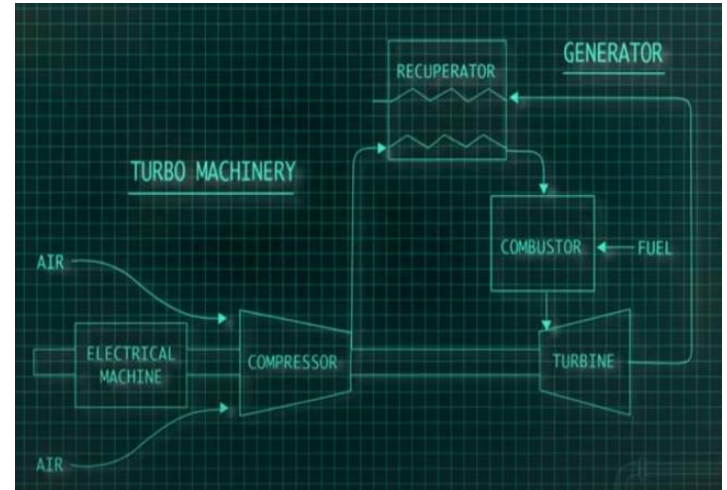
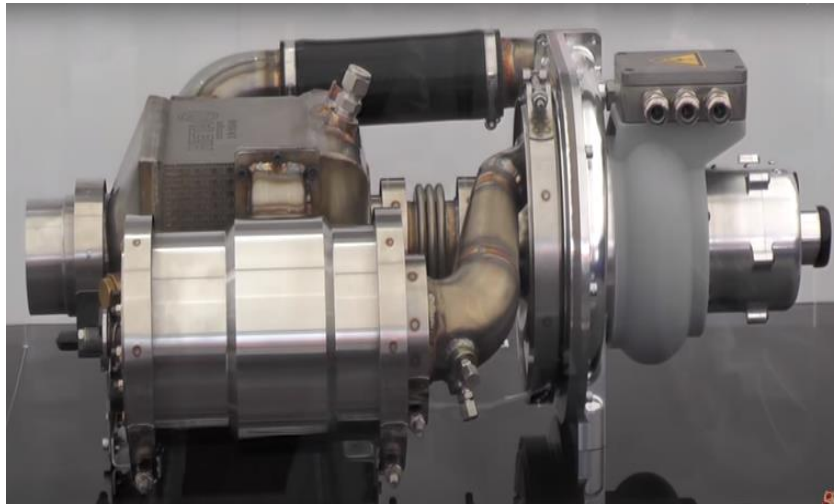
L = 120 mm





עקרונות תכן של מגדיל טווח לתחבורה המבוסס על טורבינת גז – פרופ' אמריטוס ישעיהו לוי,

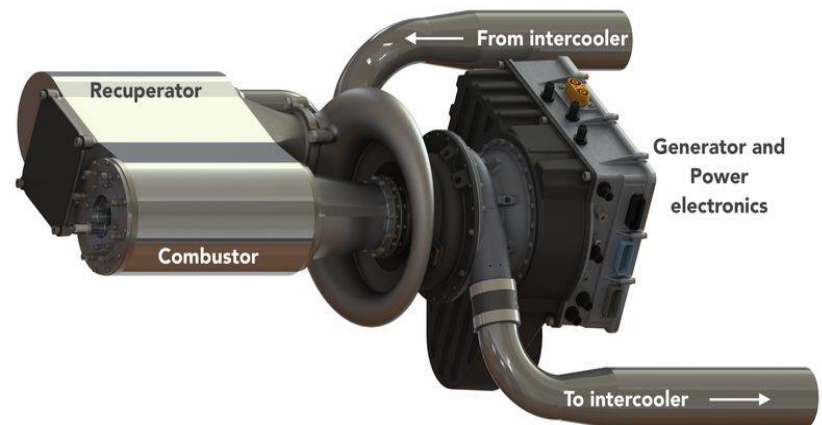
מגדילי טווח לתחבורה על בסיס טורבינת גז



Delta MiTRE Micro-Turbine, 47 כ"ס (35 ק"ואט)



Cosworth Ltd, UK (דגם Cat Gen 35 ק"ואט),



Wrightspeed Inc (80 kW Fulcrum)



מגדילי טווח לתחבורה מבוססי טורבינת גז

יתרונות:

- הספק סגולי גבוה – נפח ומשקל יחסית קטנים
- נצילות אנרגטית גבוהה
- פליטת מזהמים נמוכה
- פעולה חלקה וללא רעידות

חסרונות:

- מחיר יחסית גבוה (תלוי בכמויות הייצור)
- טכנולוגיה צעירה



תודה על
ההקשבה,
שאלות



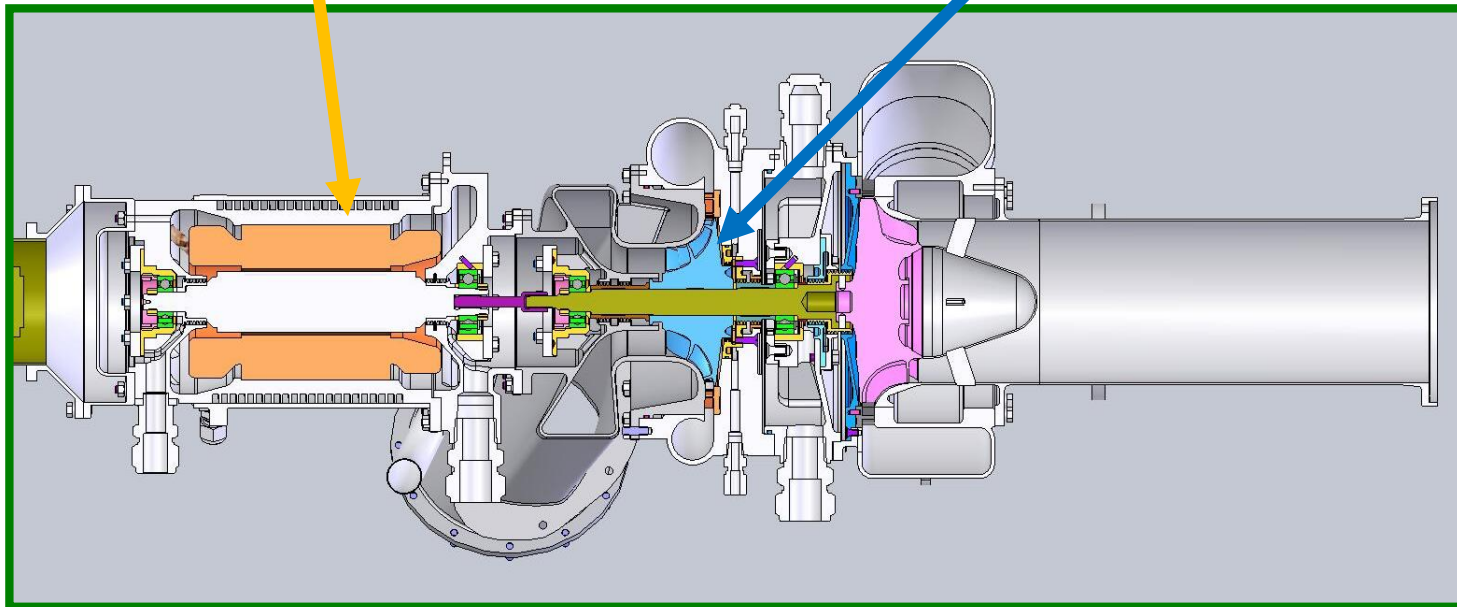


TPU Cut View

(RJET Ltd. ETV Ltd)

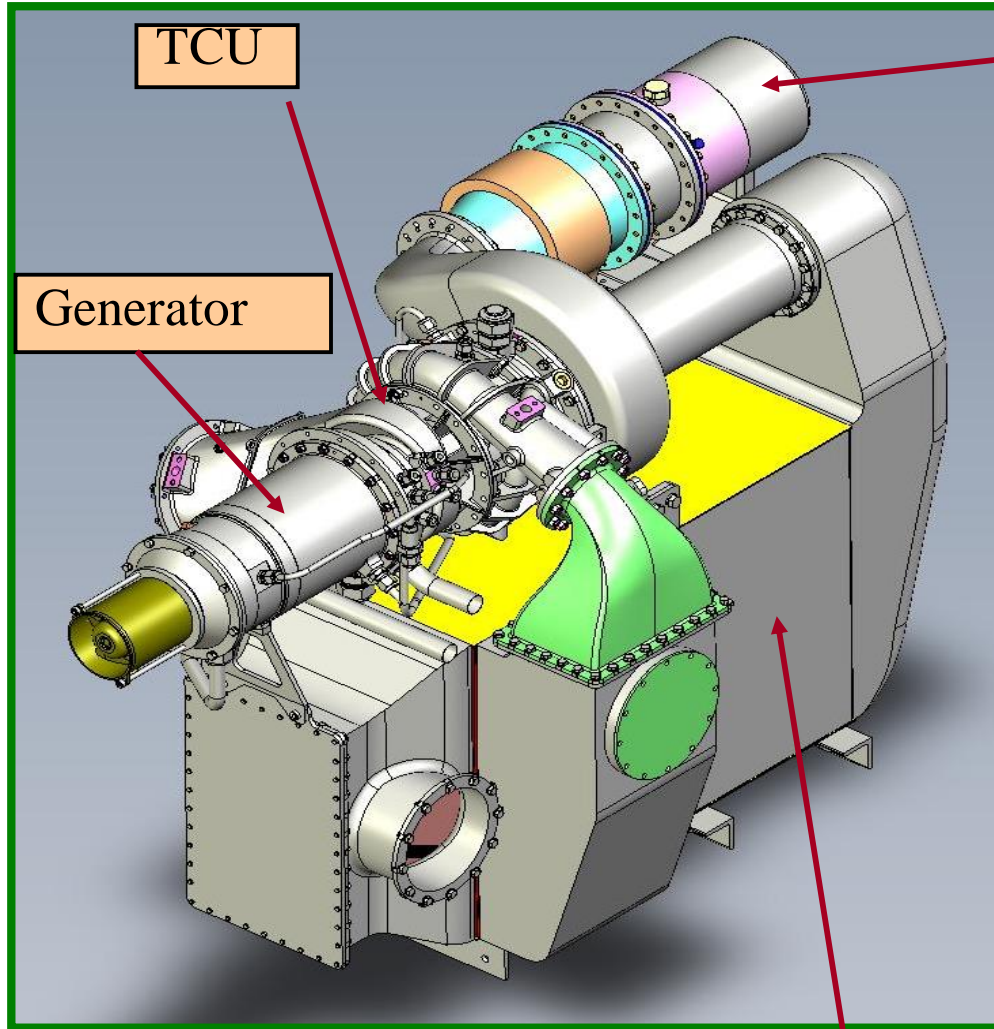
Generator

Turbo-compressor

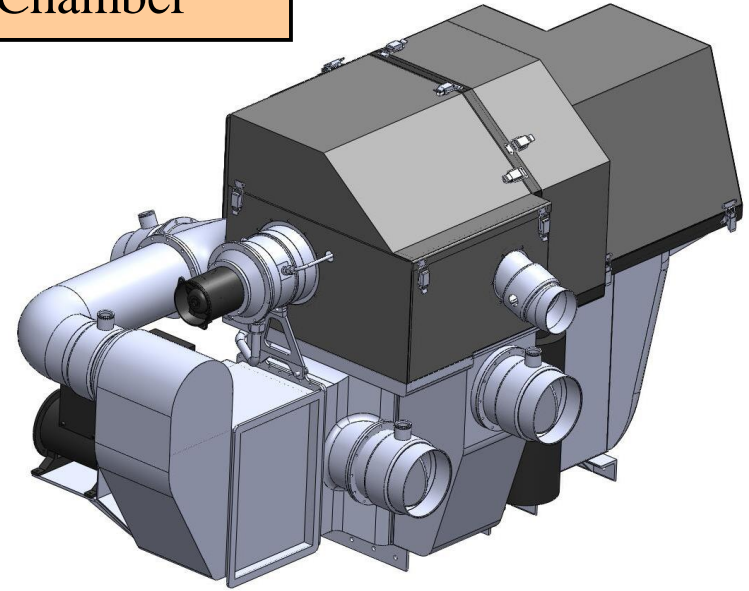




Turbo-Generator



Combustion Chamber



9-40 KW Electrical Output
80 K RPM, 400 VAC 3 Ø 1300 Hz
P.R : 3
Thermal Efficiency 36 %
Weight: 120kg

Recuperator