



דף נוסחאות במנועי סילון

כונס:

$$\eta_d = \frac{T_{02s} - T_a}{T_{02} - T_a}$$

$$\frac{P_{02}}{P_a} = \left[1 + \eta_d \cdot \frac{k-1}{2} \cdot M_a^2 \right]^{\frac{k}{k-1}}$$

$$T_{0a} = T_{01} = T_{02} \Rightarrow P_{0a} = P_{01}$$

$$\frac{T_{02}}{T_a} = 1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_a^2$$

$$P_{02} = RR \cdot P_{01}$$

$$\frac{P_{01}}{P_{0a}} = 1 \Rightarrow P_{0a} = P_{01} = P_{02}$$

$$\pi d = \frac{P_{02}}{P_{01}}$$

$$M_a = \frac{v_a}{a} = \frac{v_a}{\sqrt{k_a R T_a}}$$

$$\frac{P_{01}}{P_{0a}} \neq 1 \Rightarrow P_{0a} = P_{01} \neq P_{02}$$

$$\pi d = \pi di \cdot RR$$

$$R = \frac{C_p \cdot (k-1)}{k}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{02}}{P_{01}} \cdot \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_a^2}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_2^2} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

מדחס:

$$w_c = C_{pc} (T_{02} - T_{01}) = \frac{C_{pc} \cdot T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c-1}{k_c}} - 1 \right]$$

$$P_c = \dot{m}_c C_{pc} (T_{02} - T_{01})$$

$$P_c = \dot{m}_a \cdot w_c$$

$$P_c = \frac{\dot{m}_c C_{pc} T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c-1}{k_c}} - 1 \right]$$

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c-1}{k_c \cdot \eta_{pc}}}$$

$$\eta_c = \frac{\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c-1}{k_c}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1}$$

$$\eta_c = 1 \Rightarrow \frac{P_{02}}{P_{01}} = \left(\frac{T_{02}}{T_{01}} \right)^{\frac{k_c}{k_c-1}}$$

$$\eta_c = \frac{\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c-1}{k_c}} - 1}{\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c-1}{k_c \cdot \eta_{pc}}} - 1}$$

$$\eta_{pc} = \frac{\ln \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c-1}{k_c}}}{\ln \left(\frac{T_{02}}{T_{01}} \right)}$$



$$\eta_c = \frac{T_{02s} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \quad \frac{P_{02}}{P_{01}} = \left[\eta_c \left(\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1 \right) + 1 \right]^{\frac{k_c}{k_c - 1}}$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_c \quad \frac{T_{02}}{T_{01}} = 1 + \frac{\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{k_c - 1}{k_c}} - 1}{\eta_c}$$

$$\Delta T = \frac{T_{03} - T_{02}}{N} \quad \frac{P_{02}}{P_{01}} = R_{tot} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \sum R_n$$

$$\Delta T = T_{0_{out}} - T_{0_{in}}$$

N – מס' הדרגות במדחס

תא שריפה:

$$\dot{m}_a \cdot C_{p_c} \cdot T_{01} + \dot{m}_f \cdot q_r \cdot \eta_b = \left(\dot{m}_a + \dot{m}_f \right) \cdot C_{p_t} \cdot T_{02} \quad \text{משוואת האנרגיה של תא השריפה:}$$

$$C_{p_c} \cdot T_{01} + f \cdot q_r \cdot \eta_b = (1 + f) \cdot C_{p_t} \cdot T_{02}$$

$$\dot{m}_a \cdot C_{p_c} \cdot (T_{02} - T_{01}) = C_{p_t} \cdot (T_{03} - T_{04}) \cdot \eta_m \cdot \dot{m}_a \cdot (1 + f)$$

ללא מב"א

$$f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \left[\frac{C_{p_t} \cdot T_{02} - C_{p_c} \cdot T_{01}}{q_r \cdot \eta_b - C_{p_t} \cdot T_{02}} \right]$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a \cdot f$$

ספיקה מסית:

$$\dot{m} = \frac{P_{01}}{\sqrt{T_{01}}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{A_1 \cdot M_1}{\left[1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_1^2 \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}$$

$$\dot{m} = \varphi \cdot A \cdot V$$

$$P_1 = \varphi \cdot R \cdot T_1$$



טורבינה:

$$\eta_t = \frac{1 - \frac{T_{02}}{T_{01}}}{1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{k_t-1}{k_t}}}$$

$$\eta_t = \frac{1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\eta_{p_t}(k_t-1)}{k_t}}}{1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{k_t-1}{k_t}}}$$

$$\eta_t = \frac{T_{01} - T_{02}}{T_{01} - T_{02s}}$$

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\eta_{p_t}(k_t-1)}{k_t}}$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left[1 - \frac{1 - \left(\frac{T_{02}}{T_{01}}\right)}{\eta_t}\right]^{\frac{k_t}{k_t-1}}$$

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = 1 - \eta_t \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{k_t-1}{k_t}}\right]$$

$$\frac{P_{05}}{P_{04}} = \left[1 - \frac{\left(\frac{C_{pc}}{C_{pt}}\right) T_a \left(1 + \frac{k_c-1}{2} M^2\right) \left[\left(\frac{P_{03}}{P_{02}}\right)^{\frac{k_c-1}{k_c}} - 1\right]}{(1+f)\eta_o\eta_t\eta_m T_{04}}\right]^{\frac{k_t}{k_t-1}} = \left[\frac{T_{05}}{T_{04}} - 1 + 1\right]^{\frac{k_t}{k_t-1}}$$

$$p_t = \dot{m}_t C_{p_t} (T_{01} - T_{02})$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_a \cdot (1 + f) = \dot{m}_a + \dot{m}_f$$

$$p_t = \dot{m}_t C_{p_t} \cdot \eta_t \cdot T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{k_t-1}{k_t}}\right]$$

$$w_t = C_{p_t} (T_{01} - T_{02}) = C_{p_t} \cdot \eta_t \cdot T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{k_t-1}{k_t}}\right]$$

$$p_t = \dot{m}_t \cdot w_t$$

$$\frac{T_{02s}}{T_{01}} = \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$



נחיר פליטה:

$$v_e = \sqrt{2C_{pn}\eta_n T_{07} \left[1 - \left(\frac{P_9}{P_{07}} \right)^{\frac{k_t-1}{k_t}} \right]} \Leftarrow \kappa \quad \text{ר ימבע רלל}$$

$$\eta_n = \frac{T_{07} - T_9}{T_{07s} - T_{9s}} \quad v_e = \sqrt{2C_{pAB}\eta_n T_{07} \left[1 - \left(\frac{P_9}{P_{07}} \right)^{\frac{k_{AB}-1}{k_{AB}}} \right]} \Leftarrow \text{עם מבער אחורי}$$

$$v_e = \sqrt{2 \cdot cp(T_{0e} - T_e)}$$

$$\eta_n = 1 \quad \text{כאשר:}$$

$$\frac{P_{0e}}{P_e} = \left(\frac{T_{0e}}{T_e} \right)^{\frac{k_t}{k_t-1}}$$

בהנחה שלא ציינו
בתרגיל אז נחשב
לתהליך איזוברי:

$$\frac{P_{06}}{P_{05}} = 1 \quad \frac{P_{04}}{P_{03}} = 1$$

$$\frac{P_9}{P_{07}} = \frac{P_9}{P_a} \cdot \frac{P_a}{P_{02}} \cdot \frac{P_{02}}{P_{03}} \cdot \frac{P_{03}}{P_{04}} \cdot \frac{P_{04}}{P_{05}} \cdot \frac{P_{05}}{P_{06}} \cdot \frac{P_{06}}{P_{07}}$$

$$P_e = P_a \quad \text{במנוע מתואם:}$$

$$\left(\frac{P_{0e}}{P_a} \right)_{cr} \left\langle \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right\rangle \Rightarrow \text{נחיר בעל התפשטות מושלמת}$$

$$\left(\frac{P_{0e}}{P_a} \right)_{cr} \left\langle \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right\rangle \Rightarrow \text{נחיר חנוק}$$

$$v_e = \sqrt{2C_{pt}\eta_n T_{0e} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_{0e}} \right)^{\frac{k_t-1}{k_t}} \right]} \quad \text{מהירות יציאת הגזים מהנחיר:}$$



$$M_j = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P_{0j}}{P_j} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} : \text{מס' המאך בנחיר}$$

$$T_{0j} = T_j \cdot \left(1 + \frac{k_j - 1}{2} \cdot M_j^2 \right) : \text{טמ'פ טוטאלית ביציאה מנחיר}$$

$$F_G = \dot{m} \sqrt{2C_{pj}T_{01} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{01}} \right)^{\frac{kj-1}{kj}} \right]} : \text{דחף נחיר}$$

$$F_G = \frac{2k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_{01}}{P_a} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right] \cdot A_j \cdot P_{01}$$

מבער אחורי:

$$f_{AB} = \frac{C_{pAB} \cdot T_{07} - C_{pt} \cdot T_{05}}{\eta_{AB} \cdot Q_R - C_{pAB} \cdot T_{07}} = \frac{\left[1 - \frac{C_{pt} \cdot T_{05}}{C_{pAB} \cdot T_{07}} \right]}{\frac{\eta_{AB} \cdot Q_R}{C_{pAB} \cdot T_{07}} - 1}$$

$$f_{AB} = \frac{\dot{m}_{f_{AB}}}{\dot{m}_a + \dot{m}_f}$$

יחס דלק
אוויר
במב"א

$$f_{AB} = \frac{C_{pAB} \cdot T_{06AB} - C_{pt} \cdot T_{05}}{\eta_{bAB} \cdot Q_R - C_{pAB} \cdot T_{06AB}}$$



משוואת הדחף:

$$1) T = \dot{m}_a [(1+f)v_e - v_a] + A_e \cdot (P_e - P_a) \quad (1) \text{ ללא מב"א}$$

$$2) T = \dot{m}_a [(1+f)(1+f_{AB})v_e - v_a] + A_e \cdot (P_e - P_a) \quad (2) \text{ עם מב"א}$$

$$3) T = \dot{m}_a (v_e - v_a) + A_e \cdot (P_e - P_a) \quad (3) \text{ ללא מב"א כאשר } f \ll 1$$

$$4) T = \dot{m}_a [(1+f)v_e - v_a] \quad (4) \text{ מנוע מתואם}$$

$$5) T = \dot{m}_a (v_e - v_a) \quad P_e = P_a \quad (5) \text{ ללא מב"א כאשר } f \ll 1 \text{ ומנוע מתואם}$$

דחף סגולי:

$$T = (1+f)v_e - v_a \quad \text{דחף סגולי כאשר מנוע מתואם:}$$

$$T_{\text{סגל}} = \frac{T}{\dot{m}_a}$$

תצרוכת דלק סגולית:

$$T.S.F.C = \frac{\dot{m}_f + \dot{m}_{f_{AB}}}{T} \quad \text{עם מב"א:}$$

$$T.S.F.C = \frac{\dot{m}_f}{T} \quad \text{ללא מב"א:}$$

$$T.S.F.C = \frac{f}{(1+f)v_e - v_a} \quad \text{למנוע מתואם:}$$

נצילות הנעה:

$$\eta_p = \frac{T \cdot v_a}{\frac{\dot{m}_a}{2} [(1+f)v_e^2 - v_a^2]}$$

$$\eta_p = \frac{2 \left(\frac{v_a}{v_e} \right)}{1 + \frac{v_a}{v_e}} \quad \text{למנוע מתואם ו- } f \ll 1 :$$



נצילות תרמית:

$$\eta_{th} = \frac{(1+f) \frac{v_e^2}{2} - \frac{v_a^2}{2}}{f \cdot Q_R}$$

נצילות כללית:

$$\eta_o = \eta_p \cdot \eta_{th}$$

$$\eta_o = \frac{(v_e - v_a) v_a}{f \cdot Q_R} \quad \text{למנוע מתואם}$$

$$\eta_o = \frac{T \cdot v_a}{\dot{m}_f \cdot Q_R}$$

$$v_e = 2v_a \quad \text{תנאי לנצילות כללית מקסימלית:}$$

מאזן האנרגיה במכלול- מדחס, תא שריפה, טורבינה:

$$Q_{in} = P_t - P_c$$

$$C_{p_c} \cdot T_{02} + \eta_b \cdot f \cdot q_r = (1+f) \cdot C_{p_t} \cdot T_{05}$$

מאזן האנרגיה במבער אחורי:

$$Q_{AB} = Q_{out_{AB}} - Q_{in_{AB}}$$

$$f_2 = \frac{(1+f) \cdot (C_{p_{AB}} \cdot T_{06_{AB}} - C_{p_5} \cdot T_{05})}{(\eta_{b_{AB}} \cdot q_r \cdot C_{p_{AB}} \cdot T_{06_{AB}})}$$



• **כשאינ מב"א ויש M_e ניתן להשתמש בנוסחא:**

$$\frac{T_{07}}{T_7} = 1 + \frac{k_e - 1}{2} \cdot M_e^2 \qquad M_e = \frac{v_e}{\sqrt{k \cdot R \cdot T_7}} = a_{\gamma A'}$$

• **כשיש מב"א ויש M_e ניתן להשתמש בנוסחא:**

$$M_e = \frac{v_e}{\sqrt{k_{eAB} \cdot R_{eAB} \cdot T_{7AB}}} = a_{AB}$$

נוסחאות נוספות:

$$\dot{m}_{in/out} = \frac{P_{0t}}{\sqrt{T_{0t}}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{A_e \cdot M}{\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_t + \dot{m}_{fAB}$$

$$M = \frac{V}{a}$$

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T}$$

במנוע טורבו מניפה

$$\eta_0 = \left(1 + \frac{\dot{m}_{aC}}{\dot{m}_{aH}}\right) \frac{V_a (\bar{V}_e - V_a)}{f \cdot q_r}$$

נצילות כללית:

$$\bar{V}_e = \frac{\dot{m}_{aH} \cdot (1 + f) \cdot V_{eH} + \dot{m}_{aC} \cdot V_{eC}}{\dot{m}_{aH} \cdot (1 + f) + \dot{m}_{aC}}$$

מהירות יציאה ממוצעת מהנחיר:

$$V_8 = V_{eC} = \sqrt{2 \cdot \eta_f \frac{K}{K-1} R \cdot T_{02.5} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{08}}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]}$$

מהירות הזרימה ביציאה
מנחיר המניפה:

$$V_e = \sqrt{2 \frac{K}{K-1} R \cdot T_{06} \left[1 - \left(\frac{P_7}{P_{06}}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]}$$

מהירות הזרימה החמה
ביציאה מהנחיר:

$$r_f = \frac{P_{02.5}}{P_{02}}$$

יחס לחצי עצירה
במניפה:

$$\beta = BPR = \frac{\dot{m}_{aC}}{\dot{m}_{aH}}$$

יחס עקיפה:

$$T_{02.5} = T_{02} \left[1 + \frac{1}{\eta_f} \left(r_f^{\frac{K-1}{K}} - 1\right)\right]$$

טמפ' העצירה אחרי המניפה:

מאזן הספקים בין הטורבינה, המדחס והמניפה

$$(1 + f) C_{P_t} (T_{04} - T_{05}) = C_{P_c} (T_{03} - T_{02}) + BPR \cdot C_{P_f} (T_{02.5} - T_{02})$$



$$R_F = \frac{P_{025}}{P_{02}} \text{ יחס לחצים במניפה:}$$

$$\frac{T_{025}}{T_{02}} = 1 + \frac{1}{\eta_c} \cdot \left[R_F^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ יחס טמפ' במניפה:}$$

$$\eta_o = (1 + B.P.R) \cdot \frac{(\bar{v}_e - v_a) \cdot v_a}{f \cdot Q_R} \text{ נצילות כללית:}$$

$$P_{0t} - \text{לחץ הסטגנציה ביציאה}$$

$$P_{0t} = P_{025} \text{ מהנחיר הקר.}$$

$$\bar{v}_e = \frac{\dot{m}_{aH} \cdot (1 + f) \cdot v_{eH} + \dot{m}_{aC} \cdot v_{eC}}{\dot{m}_{aH} \cdot (1 + f) + \dot{m}_{aC}} \text{ מהירות יציאה ממוצעת:}$$

$$v_{eC} = \sqrt{2 \cdot \eta_F \cdot C_{pf} \cdot T_{025} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{0t}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \text{ מהירות יציאת זרימה קרה:}$$

$$v_{eH} = \sqrt{2 \cdot C_{pt} \cdot T_{06} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_{06}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \text{ מהירות יציאת זרימה חמה:}$$

משוואת הדחף:

$$T = \frac{\dot{m}_{aH} \cdot [(1 + f + f_{AB})V_e - V_a] + A_e \cdot (P_e - P_a) + \dot{m}_{aC} \cdot (V_{eC} - V_a) + A_e \cdot (P'_e - P_a)}{}$$

תמורת הסילון החם

תמורת הסילון הקר

$$B.P.R = \frac{\dot{m}_{aC}}{\dot{m}_{aH}} \text{ יחס העקיפה:}$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{aH} + \dot{m}_{aC} \text{ ספיקות:}$$

$$f = \frac{\dot{m}f}{\dot{m}_{aH}} \text{ יחס דלק-אוויר:}$$



הספקים:

$$P_t = P_c + P_f$$

$$P_t = \dot{m}_{aH} (1 + f) C_{pt} \cdot (T_{04} - T_{05})$$

$$P_c = \dot{m}_{aH} \cdot C_{pc} \cdot (T_{03} - T_{02})$$

$$P_f = \dot{m}_a \cdot C_{pf} \cdot (T_{03} - T_{02}) \cdot \eta_f$$

מאזן הספקים: טורבינה-מדחס-מניפה (רק כשהם יושבים על אותו ציר):

$$(1 + f) \cdot C_{pt} \cdot (T_{04} - T_{05}) = C_{pc} \cdot (T_{03} - T_{02}) + B.P.R. \cdot C_{pf} \cdot (T_{025} - T_{02})$$

$$\frac{(1 + f) \cdot C_{pt} \cdot T_{04}}{\eta_t} \cdot \left(\frac{P_{05}}{P_{04}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 = \frac{C_p \cdot T_{03}}{\eta_t} \cdot \left[\left(\frac{P_{03}}{P_{02}} \right)^{\left[\frac{k-1}{k} \right]} - 1 \right] + \frac{B.P.R. \cdot C_{pf}}{\eta_t} \cdot \left[\left(\frac{P_{025}}{P_{02}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$



טבלת אטמוספירה סטנדרטית

גובה מעל פני הים	טמפרטורת האוויר	מהירות הקול	לחץ האוויר	צפיפות האוויר	צמיגות האוויר
h (Km)	T (° C)	a $\left(\frac{m}{sec}\right)$	P $\left(\frac{N}{m^2}\right)$	ρ $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	μ $\left(\frac{Kg}{m \cdot sec}\right)$
0	15.0	340	1.0132×10^5	1.226	1.780×10^{-5}
1	8.5	336	0.8987×10^5	1.112	1.749×10^{-5}
2	2.0	332	0.7948×10^5	1.007	1.717×10^{-5}
3	-4.5	329	0.7010×10^5	0.909	1.684×10^{-5}
4	-11.0	325	0.6163×10^5	0.820	1.652×10^{-5}
5	-17.5	320	0.5400×10^5	0.737	1.619×10^{-5}
6	-24.0	316	0.4717×10^5	0.660	1.586×10^{-5}
7	-30.5	312	0.4104×10^5	0.589	1.552×10^{-5}
8	-37.0	308	0.3558×10^5	0.526	1.517×10^{-5}
9	-43.5	304	0.3073×10^5	0.467	1.482×10^{-5}
10	-50.0	299	0.2642×10^5	0.413	1.447×10^{-5}
11	-56.5	295	0.2261×10^5	0.364	1.418×10^{-5}
12	-56.5	295	0.1932×10^5	0.311	1.418×10^{-5}
13	-56.5	295	0.1650×10^5	0.265	1.418×10^{-5}
14	-56.5	295	0.1409×10^5	0.227	1.418×10^{-5}
15	-56.5	295	0.1203×10^5	0.194	1.418×10^{-5}
16	-56.5	295	0.1027×10^5	0.163	1.418×10^{-5}
17	-56.5	295	0.0785×10^5	0.141	1.418×10^{-5}
18	-56.5	295	0.0749×10^5	0.121	1.418×10^{-5}
19	-56.5	295	0.0640×10^5	0.103	1.418×10^{-5}
20	-56.5	295	0.0546×10^5	0.088	1.418×10^{-5}
30	-56.5	295	0.0117×10^5	0.019	1.418×10^{-5}