

الباب الثانى

النظرية الأساسية لمحركات الديزل

Elementary theory of Diesel engine

1-مقدمة .

مفهوم إصطلاح محرك الديزل فى الوقت الحالى بأنه محرك ترددى وذلك لتردد المكبس داخل الإسطوانة من أعلى إلى أسفل وبالعكس لإنتاج هواء مضغوط ينتج عن ضغطه درجة حرارة عالية تصل من 550°C إلى 600°C للحصول على حريق تلقائى عند حقن وقود الديزل وإختلاطه بهواء الشحن المضغوط داخل الإسطوانة.

2.1 الدورة الحرارية النظرية Theoretical heat cycle .

الدورة الحرارية النظرية من الوجهة التطبيقية فى الوقت الحاضر معظمها مختص بالحقن الجاف .

وتسمى بالدورة الثنائية Dual cycle أو الدورة المختلطة mixed cycle وهى موضحة بالرسم التخطيطى 2-1، 2-2 .

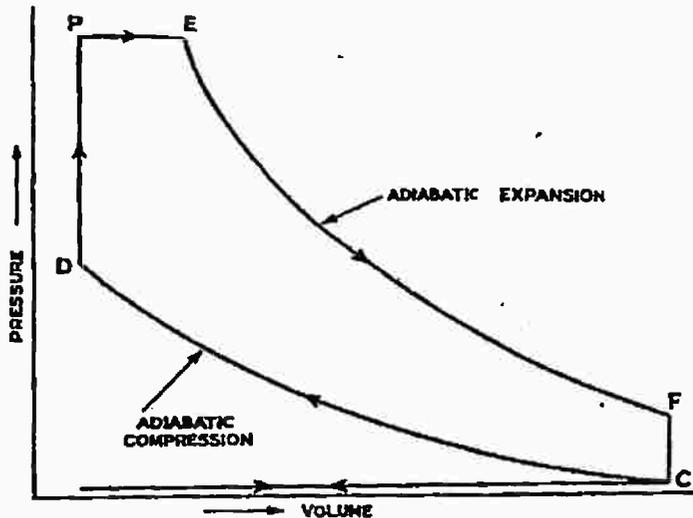


Figure 2.1

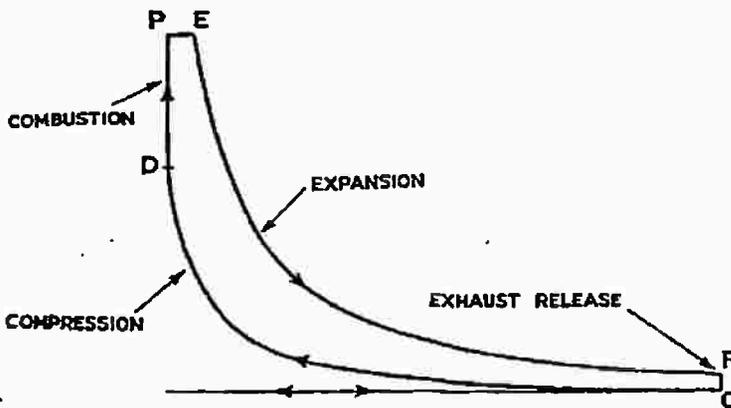


Figure 2.2

وتبدأ من النقطة C بضغط الهواء ضغطاً أديباتياً Adiabatically حتى النقطة D وعند النقطة D يبدأ حقن الوقود، وباشتعال الوقود وإنفجاره يرتفع الضغط فجأة تحت حجم ثابت كما هو موضح بالخط الرأسى DP. ثم ضغط ثابت كما هو موضح بالخط الأفقى PE وفى النقطة E يبدأ شوط التمدد نتيجة لنزول المكبس. كل ما تقدم حتى النقطة F يسمى بالتمدد الأديباتى. ويتمدد الغاز تتخفف درجة حرارته وينخفض ضغطه تحت حجم ثابت كما هو موضح بالخط الرأسى FC.

2.2 الكفاءة المثالية The Ideal efficiency

فى هذه الدورة الرباعية والمتمثلة فى هبوط مساحة الرسم التخطيطى وهى حوالى من 40% إلى 60% إلى مساحة حوالى من 40% إلى 45% نتيجة فقد الحرارة المعطاه لغازات العادم ومفقودات أخرى. وفى هذه الدورة يمثل شوط السحب بالخط الأفقى والمنتهى عند النقطة C كذلك شوط العادم والمنتهى عند النقطة F ليس لهما تأثير فى الدائرة وتأثيرهما بالسالب. وشكل المنحنى البيانى ربما يبدو حقيقياً تقريباً كما هو موضح بالرسم البيانى 2-2.

3.3 الكفاءة الحرارية Thermal efficiency

التعريف : هي الحرارة الحقيقية المفقودة كما هو موضح في الدائرة النظرية ولقد بذل الكثير من الجهد من قبل الصناع والمهندسين البحريين لتحسينها وهي موضحة كالآتي :

أولاً : الحرارة المفقودة في عملية الشغل المبذول (المستفاد) heat/work .

ثانياً : الحرارة المفقودة في مياه التبريد عن طريق المكبس ثم جدار الإسطوانة إلى مياه التبريد وكذلك الحرارة المفقودة في زيت التزييت وزيت تبريد المكابس المبردة بالزيت ، والحرارة المفقودة بالإشعاع ، والحرارة المفقودة عن طريق غازات العادم .

ثالثاً : الحرارة المفقودة للتغلب على الإحتكاك في نهاية عمود المرفق

crank shaft ويقع على عاتق المهندسين البحريين العمل على تحسين الشغل الموضح بالرسم البياني 1-2 كذلك الحصول على تشغيل جيد وناعم لتقليل استهلاك الوقود fuel consumption وتعرف الكفاءة الحرارية بالمقياس المعياري للأداء .

4.2 - الكفاءة الحرارية المطلقة Thermal efficiency Absolute

$$= \frac{\text{heat converted into useful work}}{\text{total heat supplied}} \quad 2-1 \quad \frac{\text{الحرارة المحولة الى شغل مستفاد}}{\text{الحرارة المعطاه}}$$

ويعبر عنها بطريقتين :

A - الكفاءة الحرارية البيانية Indicated thermal efficiency .

B - الكفاءة الحرارية الفرملية Brake thermal efficiency .

والمعادلات التالية تعبر عن وحدات فنية مترية .

أولاً : الكفاءة الحرارية البيانية I . th . eff

$$I. th . Eff = \frac{\text{one horse-power hour}}{g \times K \times E} = \frac{270000}{g \times K \times E} = \frac{632.6}{g \times K} \quad 2-2$$

ثانياً : لكفاءة الحرارية الفرملية. Brak thermal efficiency.

$$B . th . eff = \frac{\text{one horse-power hour}}{G \times K \times E} = \frac{270000}{G \times K \times E} = \frac{632.6}{G \times K} = 2-3$$

where $g = WT$ of fuel burned in kg/ lhph(metric)

$G = WT$ of fuel burned in kg / bhph (metric)

$K =$ calorific value of fuel burned in k cal /kg

One metric horse – power = 75 kg / metres per sec .

One horse - power(metric)=60 x 60 x 75 = 270000 kg /metres .

$E = 426.8$ kg metres = one metric heat unite (K cal/ kg) ; $\frac{270000}{426.8}$
= 632.6 = one horse - power hour (metric) (in kcal /kg)

المعامل K يعبر عنه بالإصطلاحات الآتية :

الإرتفاع ، الحجم ، الإنخفاض ، الصافي ، ومصطلح المعامل k فى المعادلة السابقة وقيمته المعلنة بالأرقام يجب أن تكون موضحة بقيمة k المستخدمة فى الحسابات وبخلاف ذلك فإن إجمالى القيمة يكون محسوباً طبيعياً .

مثال : محرك ثنائى الأشواط two stroke engine أحادى التأثير single acting يحتوى على 6 إسطوانات وقطر مكبس 250 مم ، ومساحة سطح المكبس 0.0493 ، طول شوط المكبس 300 مم عند 450 لفة / د (7.5 لفة / ثانية) والضغط المتوسط المؤثر الفرملى 13 بار ، ويستهلك 170 كيلوجرام من وقود الديزل فى الساعة ، والقيمة الحرارية للوقود 46 ميجا جول لكل كيلوجرام . أوجد الكفاءة الحرارية الفرملية للمحرك .

$$\text{Thermal. eff} = \frac{\text{heat covered into work}}{\text{total heat supplied}}$$

Total heat supplied per sec = 170 x 46 MJ / 3600 = 2.17 x 10⁶ J

Bar. = 10⁵ N / m² where N = Newton; N = J / m

heat converted into work per sec = 6 x 13 x 10⁵ J / m³ x 0.0493
m² x 0.300 m x 7.5 = 8.65 x 10⁵ J

thermal eff = 8.65 X 10⁵ J / 2.17 X 10⁶ J = 0.399

2.5 الدوائر النظرية للمحركات الترددية .

Theoretical cycle of reciprocating engine .

عام : العملية المعقدة نتيجة تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكى فى محركات الإحتراق الداخلى والتي لا تتم عن الحالة الحقيقية للطاقة المكتسبة لوجود بعض المفقودات losses الغير محسوبة فى القانون الثانى للديناميكا الحرارية Second law of thermodynamic إذا ما قورنت الكفاءة الحرارية الحقيقية بالكفاءة الحرارية النظرية . وفى حالة تطبيق القانون الثانى للغازات تكون الكفاءة الحرارية النظرية كالاتى .

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{w_{cyc}}{q_1} \quad 2-4$$

حيث أن q_2 هى قيمة مطلقة للحرارة المفقودة خلال الدورة عن طريق مياه التبريد

q_1 ، J / KG هى كمية الحرارة المفقودة J / KG خلال الدائرة ، w_{cyc} هو الشغل المبذول بواسطة واحد كيلوجرام من الشغل المتوسط لكل دائرة J/kg ، $w_{cyc} = q_1 - q_2$ ،

ويبين الشكل 2-3 المنحنى البيانى المغلق - المكافئ الحرارى للشغل الميكانيكى $K cal / KG-m$ لآى دائرة مغلقة ، $W_{cyc} = \int p dv$ حيث أن $V = volume$ $P = pressure$ فى إحداثيات المنحنى البيانى PV ، شكل 2.3 يوضح الشغل المبذول عن طريق كسح المكبس للهواء من v_{min} - v_{max}

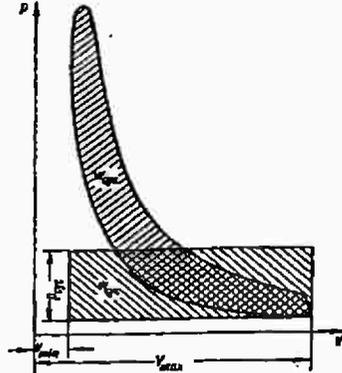


Figure 2.3

$$P_{cyc} = \frac{W_{cyc}}{v_{max} - v_{min}} = N \cdot m / m^3 \text{ or } N / m^2 \quad 2-5$$

حيث أن P_{cyc} عادة ما تساوى الضغط المتوسط للدائرة .

وفى الحسابات الهندسية يعبر عن الضغط المتوسط للدائرة MN / m^2

$$(1 \text{ MN} / \text{m}^2 = 10^6 \text{ N} / \text{m}^2).$$

وفي نظام الكيلوجرام قوة - ثانية فإن الضغط المتوسط يعبر عنه KG/cm^2 مثلا إذا كان

$$P \text{ cyc} = 1.5 \times 10^6 \text{ Nm}^2 = 1.5 \text{ MN} / \text{m}^2$$

حينئذ في نظام الكيلوجرام متر قوة . ثانية

$$P \text{ cyc} = 14.715 \text{ kg} / \text{cm}^2 \cong 15 \text{ kg} / \text{cm}^2 .$$

2.6 نوالر المحركات الترددية $2.6a$ الدائرة العامة :

بما أن هذه الدائره مطبقة في المحركات الترددية فعلينا أن نتخيل الحالة العامة للدورة النظرية كما هو موضح بالمنحنى البياني 2-4 وفي إحداثيات هذه المنحنيات $P-V$, $T-S$ عملية الإنضغاط يعبر عنها بالخط ac والتمدد بالخط zb وكلاهما يحدث بدون تغيير في درجة الحرارة المحيطة به $dq = 0$ ، وكمية الحرارة q_1' معطاه عند الحجم الثابت ، وكمية الحرارة q_2'' معطاه عند الضغط الثابت . كذلك كمية الحرارة المقفودة مركبة من كمية الحرارة q_1' المقفودة عند الحجم الثابت ، وكمية الحرارة q_2'' مقفودة عند الضغط الثابت . كمية الحرارة المعطاة من خلال الدائرة لكل واحد كيلوجرام من الوقود مع حساب الشغل المتوسط تكون موضحة كالتى : 2.6

$$q_1 = c_v (T_{z'} - T_c) + c_p (T_z - T_{z'})$$

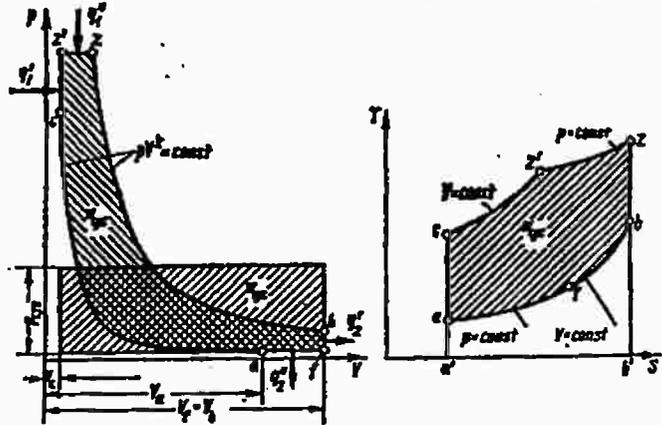


Figure 2.4

حيث أن c_p , c_v تساوى السعة الحرارية النوعية للكتلة عند الضغط الثابت والحجم الثابت بالتوالى ويعبر عنها $\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{deg})$ or $\text{k cal} / \text{kg} \cdot \text{deg}$ ودرجات حرارة الدائرة $T_{z'}$, T_c and T_z عند النقط z' , c and z ، في

إحداثيات الرسم البياني T - S كمية الحرارة المعطاه q_1 تساوى تقريباً المساحة $a'aczzbb'a'$ وتحسب كمية الحرارة المطلقة المفقودة كالآتى :

$$q_2 = c_v (T_b - T_f) + c_p (T_f - T_a) \quad 2-7$$

حيث أن درجات الحرارة فى الدائرة عند النقط a, f, b على التوالي. وفى إحداثيات المنحنى T-S كمية الحرارة q_2 تساوى تقريباً المساحة

$$a', a, f, b, b', a'.$$

وتكون الكفاءة الحرارية للدائرة كالآتى :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v}{c_p} \left[\left(\frac{(T_b - T_f) + k(T_f - T_a)}{(T_{z'} - T_c) + k(T_z - T_{z'})} \right) \right] \quad 2-8$$

حيث أن المعامل k من المعادلة عندما يكون التمدد أديباتى *adiabatic*. وباستخدام المنحنى T-S نحصل على .

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\text{area } a' a f b b' a'}{\text{area } a' a c z z b b' a'} \quad 2 - 9$$

وفى شكل 2-4 يمكن الإشارة إلى أن .

$$\epsilon = \frac{v_a}{v_c} = \text{compression ratio} \quad \text{نسبة الانضغاط}$$

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c} = \text{pressure increase with heat added in process at constant volume .}$$

$$\rho = \frac{v_z}{v_c} = \text{ratio of preliminary expansion with heat added in process .}$$

$$p_z = \text{constant.}$$

2.6b نسبة التمدد التمهيدى بإضافة الحرارة عند الضغط الثابت .

$$\delta = \frac{v_b}{v_z} \text{ ratio of subsequent expansion .}$$

$$\rho' = \frac{v_b}{v_a} = \frac{v_f}{v_a} = \text{ratio of preliminary compression with rejected to cool sink at constant pressure .}$$

2.6c نسبة الإنضغاط التمهيدى للحرارة المفقودة فى التبريد عند ضغط ثابت
والحصول على معادلة الكفاءة الحرارية للدائرة يتم التعبير عنها فى المعادلة 2-8
من خلال درجة الحرارة T_a فى بداية شوط الإنضغاط .

$$T_c = T_a \left(\frac{V_a}{V_c} \right)^{k-1} = T_a \varepsilon^{k-1} \quad 2-10$$

$$T_{z'} = T_c \frac{P_{z'}}{P_c} = T_c \lambda = T_a \lambda \varepsilon^{k-1} \quad 2-11$$

$$T_z = T_{z'} \frac{V_z}{V_{z'}} = T_{z'} \rho = T_a \lambda \rho \varepsilon^{k-1} \quad 2-12$$

$$T_b = T_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{k-1} = T_z \frac{1}{\delta^{k-1}} = T_a \lambda \rho \left(\frac{\varepsilon}{\delta} \right)^{k-1} \quad 2-13$$

$$\frac{\varepsilon}{\delta} = \frac{V_a V_z}{V_c V_b} = \frac{\rho}{\rho'}$$

ولكن

$$\text{Then } T_b = T_a \lambda \rho \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)^{k-1} \quad 2-14$$

$$T_f = T_a \frac{V_f}{V_a} = T_a \rho' \quad 2-15$$

وبالتعويض فى المعادلة 2-8 نحصل على :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\lambda \rho \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)^{k-1} - \rho' + k(\rho' - 1)}{\varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]} \quad 2-16$$

$$\text{or } \eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho' [\lambda \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)^k - 1] + k(\rho' - 1)}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \quad 2-17$$

وفى الدائرة العامة سيكون الضغط المتوسط كالاتى :

$$P_{cyc} = \frac{W_{cyc}}{V_f - V_c} \quad 2-18$$

وإذا أخذنا فى الاعتبار أن .

$$q_1 = C_v T_a \varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] \quad 2-19$$

$$\text{Then } V_f - V_c = V_c \left(\frac{V_f}{V_c} - 1 \right) = V_c (\epsilon \rho' - 1) = \frac{V_a}{\epsilon} (\epsilon \rho' - 1) \quad 2-20$$

وإذا أخذنا قيمة شغل الدائرة w_{cyc} من المعادلة 2-4 ومقدار قيمة كمية الحرارة المعطاه للدائرة من المعادلة 2-19 ومقدارها $V_f - V_c$ ومن المعادلة 2-20 والمعادلة 2-18 نحصل على .

$$P_{cyc} = c_v \frac{T_a \epsilon^{k-1}}{V_a (\rho' \epsilon - 1)} \eta h [\lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)] \quad 2-21$$

$$\text{Hence } C_v = \frac{R}{k-1} \text{ and } P_a = \frac{RT_a}{V_a}$$

2.6d الدائرة الحرارية بإعطاء الحرارة عند ثبوت الحجم (*Otto cyc*) شكل 2-5 يبين شكل 2-5 إحداثيات المنحنى P, V and T, S والحرارة المعطاه q_1 والحرارة المفقودة q_2 فى حالة الحجم الثابت .

كذلك الشغل الناتج عن حركة المكبس من النقطة الميتة السفلى B, D, C إلى النقطة الميتة العليا T, D, C يكون .

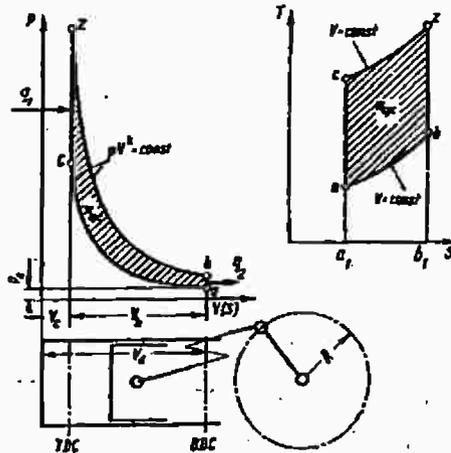


Figure 2.5

$$V_h = V_a - V_c = V \max - V \min = \frac{\pi}{4} D^2 S \quad 2.23$$

حيث أن D تعساوى قطر الإسطوانة ، S يساوى طول شوط المكبس ($S = 2R$) حيث R ($R = \text{crank radius}$) وهذه الدائرة تخالف ما تقدم حيث أنه لا يوجد

الخط $Z'Z$ وكذلك f_g في شكل 4-2 وفي هذه الحالة $\rho = 1$ وأيضا $\rho' = 1$ وبالتعويض بهذه القيم في المعادلة 2-17 ، 2-22 نحصل على قيم الكفاءة الحرارية والضغط المتوسط للدائرة .

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \quad 2-24$$

$$P_{cyc} = \frac{P_a}{k-1} \frac{\epsilon^k}{\epsilon-1} \eta_{th} (\lambda - 1) \quad 2-25$$

2.6e الدائرة الحرارية بإعطاء الحرارة عند الضغط الثابت (Diesel cycle) دورة ديزل في شكل 2-6 .

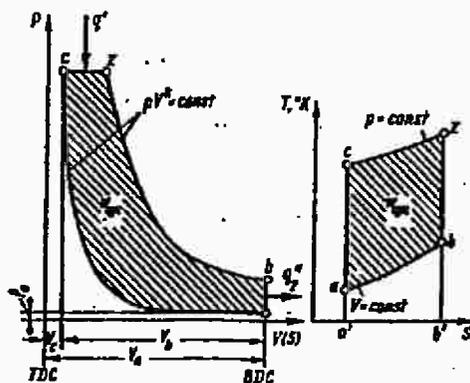


Figure 2.6

في شكل 2-6 يبين إحداثيات المنحنيات $p - v$ ، $T - s$ حيث أن الحرارة المعطاه عند ضغط ثابت والحرارة المفقودة عند حجم ثابت على التوالي في هذه الحالة عندما تكون قيم $\lambda = 1$ ، $\rho' = 1$ وبالتعويض عنهما في المعادلة 2-17 ، 2-22 سوف نحصل على .

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\rho^{k-1}}{k(\rho-1)} \quad 2-26$$

$$P_{cyc} = \frac{P_a}{k-1} \frac{\epsilon^k}{\epsilon-1} \eta_{th} k(\rho-1) \quad 2-27$$

2.6f الدائرة المشتركة Cycle with combined heat addition .

إعطاء الحرارة عند الحجم الثابت والضغط الثابت كما هو موضح بالشكل 2-7.

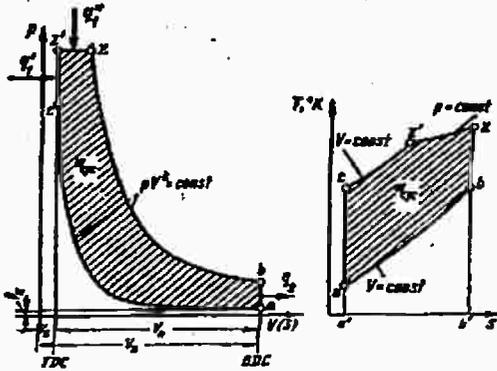


Figure 2.7

الذي يبين إحداثيات المنحنى $P-V$, $T-S$ على التوالي عند إعطاء كمية الحرارة q_1' عند الحجم الثابت ، كمية الحرارة المعطاه عند الضغط الثابت ، والحرارة المفقودة q_2 عند الحجم الثابت .

وتختلف هذه الدائرة عن الدائرة العامة لعدم وجود خط مماثل للخط fa في شكل 2-4 والتي تكون فيه الحرارة المفقودة عند ضغط ثابت في هذه الحالة تكون $1 = p'' =$ وفي المعادلة 2-17 تصبح الكفاءة الحرارية للدائرة المشتركة والحرارة المعطاه تأخذ الشكل الآتي :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda p^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda (\rho - 1)} \quad 2-28$$

والضغط المتوسط للدائرة سيكون موضح كالآتي :

$$P_{cyc} = \frac{P_a}{k-1} \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} \eta_{th} [\lambda - 1 + k\lambda (\rho - 1)] \quad 2-29$$

2.7 تأثير العوامل المتغيرة على الكفاءة الحرارية والضغط المتوسط للدائرة :

2.7a أولا : الدائرة الحرارية بإضافة الحرارة عند حجم ثابت volume constant .

وتوضح المعادلة 2-24 كفاءة الدائرة الحرارية والتي تعتمد على نسبة الإنضغاط ε وطبيعة الشغل المتوسط والذي يحدد بالمعامل k .

وفي الشكل 2-8 يبين العلاقة بين الكفاءة الحرارية للدائرة η_{th} ونسبة الإنضغاط ε لقيمتي أس الأديباتك .

حيث أن الأس $k = 1.41$ يفترض استخدام الضغط المتوسط لغاز الهواء (a biatomic) غاز ثنائي الذرة ، مع ثبوت السعة الحرارية .
وعندما تكون قيمة $k = 1.3$ يتطابق تقريبًا بالأس المتوسط للخط الأديباتي وذلك لإنتاج حريق خليط من الهواء والوقود.

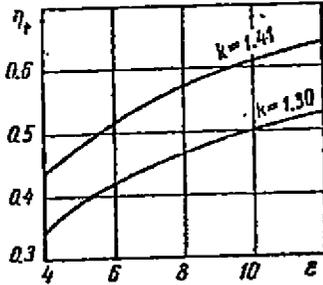


Figure 2-8 thermal efficiency of a cycle η_t with heat addition at constant volume versus compression ratio ϵ for various adiabatic exponent k .

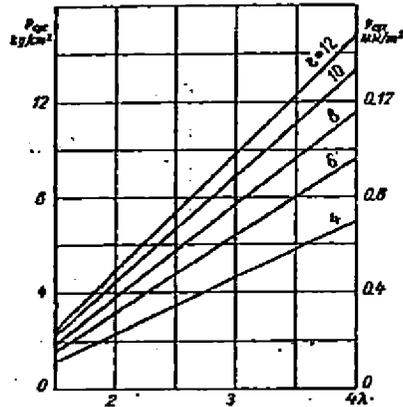


figure 2.9 mean pressure of a cycle p_{cyc} versus pressure increase λ for various compression ratio ϵ

وتعمد كفاءة الدائرة الحرارية على قيمة نسبة الإنضغاط ϵ .
نسبة الإنضغاط العالية تسبب زيادة في الكفاءة الحرارية للدائرة النظرية وكذلك زيادة قيمة الأس k في حالة العملية الأديباتيكية .
وبفرض أن نسبة الإنضغاط ϵ ، والأس k والكفاءة الحرارية قيم ثابتة ولا تعتمد على زيادة الضغط λ .

وبناءً عليه : فإن كمية الحرارة المعطاه تتناسب مع الحمل الخارج من المحرك وتحليل المعادلة 2-25 نلاحظ أن الضغط المتوسط للدائرة يزيد بنسبة زيادة الضغط الابتدائي p_a ويسبب زيادة في نسبة الإنضغاط ϵ وأيضًا زيادة الضغط المتوسط للدائرة p_{cyc} ويتناسب مع الكفاءة الحرارية .

وزيادة الضغط λ ينتج عن زيادة كمية الحرارة المعطاه .

ويوضح شكل 2-9 نتائج لحسابات p_{cyc} ويكون التغيير في نسبة الإنضغاط ϵ عندما تكون قيمة الأس $k = 1.3$ ، والزيادة في الضغط λ يتغير من 1.5 إلى 4 والضغط p_a عندما تكون $\epsilon = 4 = 0.1 \text{ MN} / \text{m}^2$.

ولتحديد الكفاءة الحرارية والضغط المتوسط للدائرة نجد أن قيمة نسبة الإنضغاط ϵ العالية لها أكبر الأثر لتحسين خصائص المحرك .

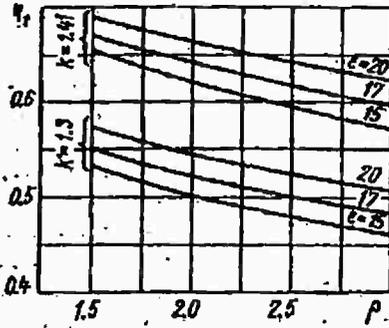


Figure 2.10 thermal efficiency η_t of a cycle with addition at constant pressure versus the ratio of preliminary expansion p for various compression ratio ϵ and adiabatic exponent k

2.7b ثانيا : الدائرة الحرارية بإضافة الحرارة عند الضغط الثابت .

توضح المعادلة 2-31 الكفاءة الحرارية للدائرة وتعتمد على نسبة الإنضغاط ϵ والأس k في حالة التمدد والضغط الأديبتي ، نسبة التمدد الابتدائي p في شكل 2-10 تبين كيفية إعتداد الكفاءة الحرارية للدائرة على نسبة التمدد الابتدائي لقيمتي أس المعادلة للعملية الأديباتيكية ، والتغيير في نسبة الإنضغاط عندما يعمل المحرك بمعدلات تتطابق مع هذه الدائرة وبإسقاطنا مشاهدته من تحليلات المعادلة 2.26 في شكل 2.10 كما هو في الدنرة السابقة ، والزيادة في نسبة الإنضغاط تسبب الزيادة في الكفاءة الحرارية مع العلم أن الزيادة في نسبة التمدد الابتدائي p تعمل على إنخفاض نسبة الإنضغاط ϵ وبالتالي الكفاءة الحرارية كما هو مبين في الشكل 2.10 ومن الدائرة نجد أنه عند زيادة الحمل يجب إضافة كمية كبيرة من الحرارة وقيم الزيادة في الكفاءة الحرارية تتناسب مع الشغل المثالي للمحرك والعلاقة بين الكفاءة الحرارية والحمل مهمة جداً

للإستفادة من الحرارة عند حالات التشغيل المختلفة . كما أن المعادلة 2-29 تبين زيادة الضغط المتوسط بزيادة الضغط الابتدائي p_a ، أس العملية الأديباتيكية ، ونسبة الإنضغاط ϵ والكفاءة الحرارية η_{th} وتزيد نسبة التمدد الابتدائي p عند إعطاء كمية كبيرة من الحرارة q_1 والتي تعمل على زيادة p cycle وإنخفاض η_{th} .

2.7c ثالثا : الدائرة الحرارية عند إضافة الحرارة إلى الدائرة المركبة .

وتبين المعادلة 2-22 الكفاءة الحرارية للدائرة المركبة عند إضافة الحرارة وتعتمد على الأس k للمعادلة الأديباتيكية ، نسبة الإنضغاط ϵ والزيادة في الضغط λ وأس الضغط التحضيري p . كما أن إعتبار الدائرة السابقة تعتمد على زيادة نسبة الإنضغاط والقيم العالية لأس العملية الأديباتيكية تسبب الزيادة في الكفاءة الحرارية .

والعلاقة بين الكفاءة الحرارية ، λ ، p أكثر تعقيدا مع الكمية الثابتة للحرارة المضافة q_1 ، وقيم λ ، p تعتمد على جزء الحرارة المضافة إلى الضغط الثابت .

وكمية الحرارة الكلية المعطاه الموجودة في المعادلة 2-19 لإعطاء نسبة الإنضغاط ، والكميات المتغيرة القيمة عندما تكون $q_1 = \text{constant}$.

$$\frac{q_1}{c_v T_a \epsilon^{k-1}} = \lambda - 1 + k \lambda (p - 1) = \text{cons} \quad 2-30$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\lambda p^{k-1}}{\text{constant}} \quad 2.31$$