

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  $550c^0$  إلى  $600c^0$  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 .

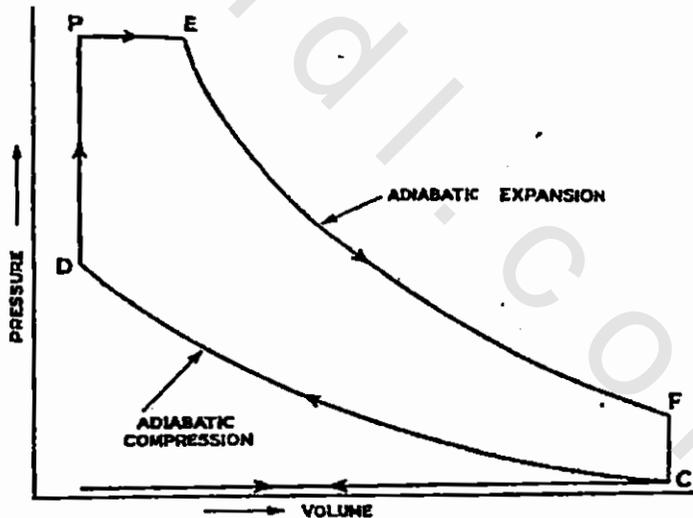


Figure 2.1



### 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 : كفاءة الحرارية الفعلية. 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 .

$$E = 426.8 \text{ kg metres} = \text{one metric heat unite ( K cal/ kg ) ; } \frac{270000}{426.8}$$

$$= 632.6 = \text{one horse - power hour ( metric ) (in kcal /kg )}$$

المعامل  $K$  يعبر عنه بالإصطلاحات الآتية :

الإرتفاع ، الحجم ، الإنخفاض ، الصافي ، ومصطلح المعامل  $k$  فى المعادلة السابقة وقيمتة 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 الفعلية للمحرك .

$$\text{Thermal. eff} = \frac{\text{heat coverted into work}}{\text{total heat supltied}}$$

$$\text{Total heat supplied per sec} = 170 \times 46 \text{ Mj} / 3600 = 2.17 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{Bar.} = 10^5 \text{ N} / \text{m}^2 \text{ where N} = \text{Newton; N} = \text{J} / \text{m}$$

$$\text{heat converted into work per sec} = 6 \times 13 \times 10^5 \text{ J} / \text{m}^3 \times 0.0493 \text{ m}^2 \times 0.300 \text{ m} \times 7.5 = 8.65 \times 10^5 \text{ J}$$

$$\text{thermal eff} = 8.65 \times 10^5 \text{ J} / 2.17 \times 10^6 \text{ J} = 0.399$$

## 2.5 الدوائر النظرية للمحركات الترددية .

### Theoretical cycle of reciprocating engine .

عام : العملية المعقدة نتيجة تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي في 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 الدنرة 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  $K cal / KG-m$  لأى 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  $v_{min}$  -  $v_{max}$

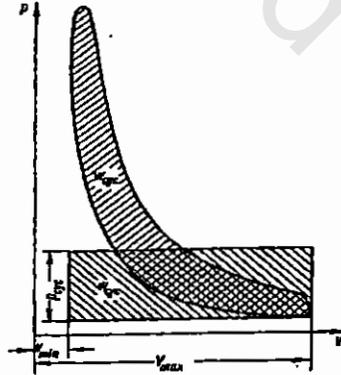


Figure 2.3

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

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  $\text{KG/cm}^2$  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 دوائل المحركات الترددية Cycles of reciprocating engine

2.6a الدائرة العامة :

بما أن هذه الدائرة مطبقة في المحركات الترددية فعلياً 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 كالتالي : 2.6

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

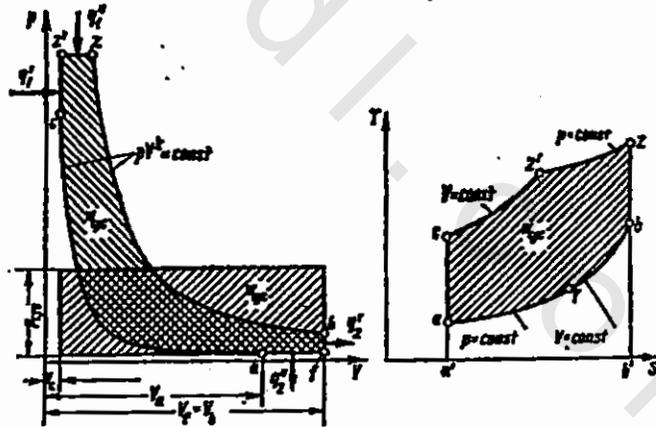


Figure 2.4

حيث أن  $c_p, c_v$  تساوى السعة الحرارية النوعية للكتلة عند الضغط الثابت والحجم الثابت بالتوالي 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 تقريبًا 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 تقريبًا المساحة

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

وتكون الكفاءة الحرارية للدائرة كالآتى :

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

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 الإعتبار 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 .

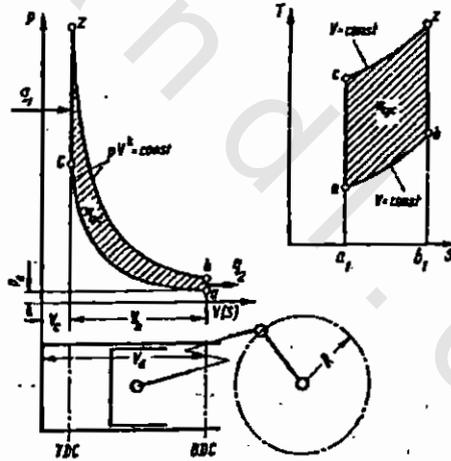


Figure 2.5

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

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

الخط  $Z'$  وكذلك  $f_a$  في شكل 4-2 وفي هذه الحالة  $\rho = 1$  وايضاً  $\rho' = 1$  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 .

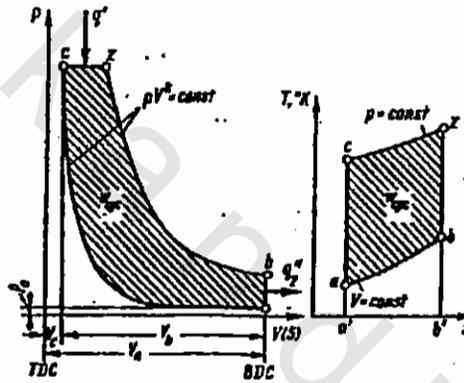


Figure 2.6

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.

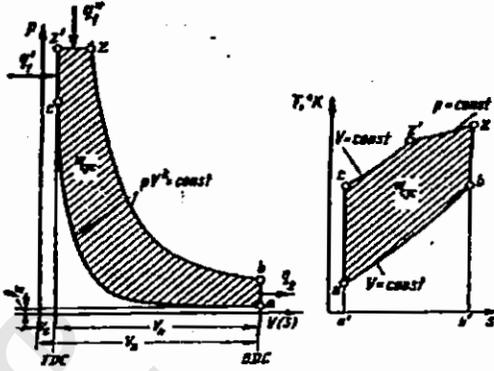


Figure 2.7

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 عند الحجم الثابت .

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

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

والضغط المتوسط للدائرة سيكون موضح كالآتي :

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

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  $\epsilon$  وطبيعة الشغل المتوسط والذي يحدد بالمعامل k .

وفي الشكل 2-8 يبين العلاقة بين الكفاءة الحرارية للدائرة  $\eta_{th}$  ونسبة الإنضغاط  $\epsilon$  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.

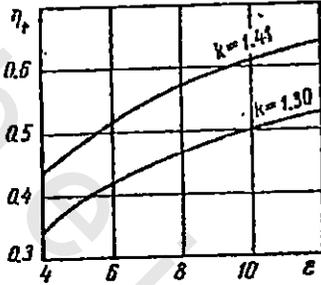


Figure 2-8 thermal efficiency of a cycle  $\eta_t$  with heat addition at constant volume versus compression ratio  $\epsilon$  for various adiabatic exponent  $k$  .

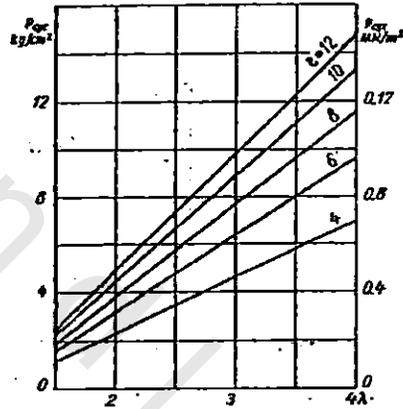


figure 2.9 mean pressure of a cycle  $p_{cyc}$  versus pressure increase  $\lambda$  for various compression ratio  $\epsilon$

وتعمد كفاءة الدائرة الحرارية على قيمة نسبة الإنضغاط  $\epsilon$  .  
 نسبة الإنضغاط العالية تسبب زيادة في الكفاءة الحرارية للدائرة النظرية وكذلك زيادة قيمة الأس  $k$  في حالة العملية الأديباتيكية .  
 ويفرض أن نسبة الإنضغاط  $\epsilon$  ، والأس  $k$  والكفاءة الحرارية قيم ثابتة ولا تعتمد على زيادة الضغط  $\lambda$  .

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  $\epsilon$  وأيضًا زيادة الضغط المتوسط للدائرة  $p_{cyc}$  ويتناسب مع الكفاءة الحرارية .

وزيادة الضغط  $\lambda$  ينتج عن زيادة كمية الحرارة المعطاه .

ويوضح شكل 2-9 نتائج لحسابات  $p_{cyc}$  ويكون التغيير في نسبة الإنضغاط  $\epsilon$  عندما تكون قيمة الأس  $k = 1.3$  ، والزيادة في الضغط  $\lambda$  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  $\epsilon$  العالية لها أكبر الأثر لتحسين خصائص المحرك .

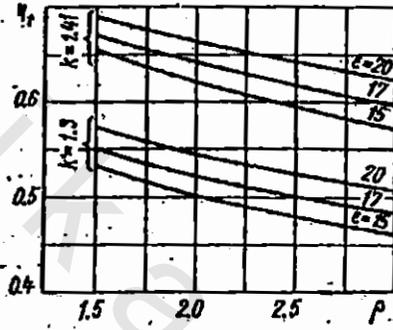


Figure 2.10 thermal efficiency  $\eta_t$  of a cycle with addition at constant pressure versus the ratio of preliminary expansion  $p$  for various compression ratio  $\epsilon$  and adiabatic exponent  $k$

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

توضح المعادلة 2-31 الكفاءة الحرارية للدائرة وتعتمد على نسبة الإنضغاط  $\epsilon$  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 وبإستطاعتنا 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  $\epsilon$  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  $\epsilon$  والكفاءة الحرارية  $\eta_{th}$  وتزيد نسبة التمدد الابتدائي  $p$  عند إعطاء كمية كبيرة من الحرارة  $q_1$  والتي تعمل على زيادة  $p$  cycle وإنخفاض  $\eta_{th}$  .

2.7c ثالثاً : 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  $\epsilon$  والزيادة في الضغط  $\lambda$  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 ،  $\lambda$  ،  $p$  أكثر تعقيداً مع الكمية الثابتة للحرارة المضافة  $q_1$  ، وقيم  $\lambda$  ،  $p$  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  $q_1 = \text{constant}$  .

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

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