

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΥΚΛΟΙ ΚΑΥΣΙΜΟΥ-ΑΕΡΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Ο κύκλος καυσίμου αέρα ορίζεται σαν την εξιδανικευμένη θερμοδυναμική διαδικασία που προσομοιώνει αντίστοιχη διαδικασία που παρατηρείται σε κάποιο ειδικό τύπο θερμικής μηχανής. Το πραγματικό αέριο που χρησιμοποιεί ο κύκλος καυσίμου αέρα σαν λειτουργούν ρευστό, προσομοιάζει αυτό που χρησιμοποιείται στην θερμική μηχανή. Για την πραγματοποίηση ενός τέτοιου κύκλου χρειάζονται δεδομένα της θερμοδυναμικής περιγραφής των διαδικασιών, όπως και στους κύκλους αέρα. Εφ' όσον οι κύκλοι καυσίμου αέρα περιέχουν διεργασίες καύσης μη αντιστρεπτές, το θερμοδυναμικό ρευστό δεν επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση και συνεπώς η διαδικασία δεν είναι κύκλος με τη θερμοδυναμική έννοια. Ο όρος "κύκλος" απλώς υποδηλώνει μια πλήρη συνιστώσα μιας σειράς από επαναλαμβανόμενες διεργασίες. Στην περίπτωση κύκλου αέρα ο όρος "απόδοση" (η) χρησιμοποιήθηκε με τη θερμοδυναμική του σημασία, δηλαδή ο λόγος του παραγόμενου έργου προς το ποσό της θερμότητας που διειστέθηκε κατά τον κύκλο. Αντίθετα, στους κύκλους καυσίμου αέρα το μίγμα την κατάλληλη στιγμή κάηκε και απέδωσε ποσό θερμότητας μέσω χημικών αντιδράσεων. Το παραγόμενο έργο σε ένα κύκλο αέρα καυσίμου μπορεί να μετρηθεί και ο ορισμός της απόδοσης μπορεί να αποδοθεί με τον ίδιο τρόπο εφ' όσον αποδόσουμε μια τιμή για την ποσότητα θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση. Μια επιλογή είναι να επιλέξουμε την κατωτέρα θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Μια άλλη επιλογή είναι η διαθέσιμη ενέργεια καύσης (Ferguson, 1986):

$$\alpha_c = q_{net} + T_o \frac{(\sum m \cdot s - \sum_{\epsilon} m \cdot s)}{m \cdot f} \quad (4.1)$$

όπου q_{net} : κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου

T_o : θερμοκρασία αναφοράς (298 K)

$$m = m_{\text{air}} + m_{\text{fuel}}$$

$\Delta\Sigma(m*s) =$ μεταβολή εντροπίας συστήματος

Η δεύτερη επιλογή μας βοηθά να συγκρίνουμε διαφορετικές μηχανές diesel με βενζινομηχανές και διαφορετικά είδη καυσίμου ή διαφορετικούς τρόπους χρησιμοποίησης της ενέργειας των καυσίμων. Μια άλλη έκφραση της διαθέσιμης ενέργειας καύσης είναι όταν αυτή καθορίζεται υπό συνθήκες καύσης πτωχού μίγματος ως $a_o = a_{c, \phi=0.01}$ έτσι ώστε να συνεκτιμηθεί η σπαταλούμενη ενέργεια λόγω καύσης πλούσιου μίγματος. Εν γένει μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την έκφραση (Ferguson, 1986):

$$\eta = \frac{W}{m_f * \alpha_c}$$

ή την ισοδύναμη

$$\eta = \frac{W}{m_f * \alpha_o} = \frac{W(1 + \Phi * F_s)}{\Phi * F_s(1 - f)\alpha_o} \quad (4.2)$$

Ο πίνακας 4.1 δίνει τις διάφορες θερμότητες και ενέργειες καύσης για μια σειρά από σύγχρονα καύσιμα.

4.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του μίγματος καυσίμου αέρα εξαρτώνται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: σύνθεση μίγματος, λόγος καυσίμου αέρα, περιεκτικότητα υδρατμών, περιεκτικότητα σε υπόλοιπο αέριο. Διάφοροι ορισμοί παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς κύκλων καυσίμου αέρα δίνονται παρακάτω:

F : λόγος καυσίμου ξηρού αέρα

F_s : στοιχειομετρικός λόγος καυσίμου αέρα

$\Phi = F/F_s$: σχετικός λόγος καυσίμου αέρα ή λόγος ισοδυναμίας

f : κλάσμα υπολοίπων αερίων, που όπως προαναφέρθηκε ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υπολοίπων αερίων κατά το τέλος του χρόνου εξαγωγής, προς την μάζα του αέρα συν του καυσίμου συν των υπολοίπων αερίων κατά το τέλος του χρόνου εισαγωγής.

h_v : λόγος μάζας υδρατμού προς μάζα ξηρού αέρα

Έχουμε λοιπόν τις σχέσεις για την μάζα m και τα moles N :

$$m = m_a + m_f + m_r + m_v$$

$$N = \frac{m_a}{29} + \frac{m_f}{M_f} + \frac{m_r}{M_r} + \frac{m_v}{18}$$

όπου a : αέρας

r : υπόλοιπο

f : fuel

v : υδρατμοί

Επίσης έχουμε τις σχέσεις (4.3) :

$$\frac{m_a}{m} = \frac{1-f}{1+F+Y_v(1-f)}$$

$$\frac{m_f}{m} = \frac{F(1-f)}{1+F+Y_v(1-f)}$$

$$\frac{m_r}{m} = \frac{f(1+F)}{1+F+Y_v(1-f)}$$

$$\frac{m_v}{m} = \frac{h(1-f)}{1+F+Y_v(1-f)}$$

4.3 ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗ ΕΝΘΑΛΠΙΑ ΜΙΓΜΑΤΟΣ

Όταν τα καύσιμα χρησιμοποιούνται σε μίγμα με τον αέρα μπορούν να απελευθερώσουν θερμότητα (ή ενέργεια) κατά την χημική αντίδραση της καύσης. Η ενέργεια αυτή θεωρείται συνήθως ότι ανήκει στο καύσιμο και εκφράζεται σαν χημική ενθαλπία ή ενέργεια, ορίζεται δε σαν την ενθαλπία της ουσίας σε θερμοκρασία αναφοράς (ή αλλιώς θερμότητας-ενέργεια-ενθαλπία αντίδρασης όπως την έχουμε γνωρίσει στο προηγούμενο κεφάλαιο 2). Συνήθως ως θερμοκρασία αναφοράς λαμβάνεται η $T_0=298\text{K}$. Στις διαδικασίες ανάμιξης καυσίμου αέρα και συμπίεσης-εκτόνωσης ή άλλων

θερμοδυναμικών διεργασιών διευκολύνει η αποφυγή αντιμετώπισης της χημικής αντίδρασης αυτής καθ' αυτής και απλώς βασιζόμαστε στις θερμοδυναμικές ιδιότητες της σύνθεσης του καυσίμου πριν και μετά τη καύση. Έτσι εισάγουμε τις αισθητές ιδιότητες sensible energy/enthalpy (π.χ. αισθητή ενθαλπία) για να τις ξεχωρίσουμε από τις ιδιότητες που έχουν υπολογιστεί με θερμοκρασία αναφοράς που λαμβάνει υπ' όψιν της τις χημικές αντιδράσεις. Η αισθητή ενθαλπία είναι

$$h_s(T) = h(T) - h(298) = \int_{298}^T c_p^* dT \quad (4.4)$$

όπου s: sensible, c: chemical, h: συνολική ενθαλπία μίγματος.

Επειδή η συγκέντρωση του καυσίμου είναι μικρό ποσοστό του μίγματος, το καύσιμο συνεισφέρει λίγο στον υπολογισμό της ειδικής θερμότητας του μίγματος. Η σημαντικότερη ουσία είναι το άζωτο και στο μίγμα καυσίμου αέρα και στα προϊόντα της καύσης από τα οποία αποτελείται το κλάσμα του υπολοίπου αερίου (f). Η ειδική θερμότητα λοιπόν είναι ασθενής συναρτήση του f και του Φ. Στην ουσία η αισθητή ενθαλπία h_s του μίγματος εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία και μπορεί να υπολογισθεί από έναν πίνακα ιδιοτήτων του αέρα (πίνακας 4.2), ο οποίος είναι η ειδική περίπτωση $\Phi=f=0$. Αυτή η προσέγγιση θα υπερεκτιμήσει την θερμοκρασία στο τέλος μιας διεργασίας (π.χ. συμπίεσης) κατά περίπου 50K. Πιο ακριβείς υπολογισμοί μπορούν να γίνουν μέσω χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών και λεπτομερούς εφαρμογής των αρχών της θερμοδυναμικής της καύσης, όπως συζητήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτοιμα προγράμματα, φιλικά προς τον χρήστη, είναι τώρα διαθέσιμα σε προπτυχιακό επίπεδο μέσω των διεθνών εκδόσεων, (πχ Ferguson, 1986), και συνιστώνται ανεπιφύλακτα για σύγχρονους υπολογισμούς, όχι μόνο M.E.K. αλλά και μιας σειράς άλλων προβλημάτων στην θερμοδυναμική. Στο παρόν κεφάλαιο όμως δίνεται η μεθοδολογία υπολογισμού μέσω διαγραμμάτων και πινάκων σαν μια εναλλακτική μέθοδος.

Η χημική ενθαλπία h_c είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας (εφ' όσον ορίζεται ως η ενθαλπία στους 298 K) και εξαρτάται από τον σχετικό λόγο αέρα καυσίμου (Φ) και την σύνθεση η κλάσμα

υπολοίπου (f). Η χημική ενθαλπία ενός μίγματος N ουσιών δίνεται από την

$$h_c(298) = \sum_i^N x_i \cdot h_{f,i,298}^o \quad (4.5)$$

όπου $h_{f,i,298}^o$ είναι η ενθαλπία σχηματισμού της κάθε ουσίας i .

Ο πίνακας 4.3 δίδει τις ενθαλπίες σχηματισμού για τα σημαντικότερα συστατικά στην ανάλυση διεργασιών Μ.Ε.Κ. Επειδή $h_{f,N_2} = h_{f,O_2} = 0$, ο αέρας δεν συνεισφέρει στην χημική ενθαλπία του μίγματος καυσίμου-αέρα-υπολοίπου (fuel-air-residual), αναφερόμενου ως "far" στα παρακάτω, η h_c εκτιμάται από το καύσιμο και από παραγόμενες ουσίες της καύσης, όπως το H_2O και CO_2 στο υπόλοιπο. Με δεδομένο λοιπόν το f , το h_c για ένα μίγμα far μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση:

$$h_c = (1-f)h_{c,fa} + f \cdot h_{c,r} \quad (4.6)$$

όπου $h_{c,fa}$: η χημική ενθαλπία μόνο του μίγματος καυσίμου-αέρα

$h_{c,r}$: η χημική ενθαλπία του υπολοίπου καυσαερίων

Επειδή δε το κλάσμα μάζας του υπολοίπου είναι σχεδόν ίσο με το κλάσμα moles του υπολοίπου, μια καλή προσεγγιστική σχέση για το μοριακό βάρος ενός μίγματος far είναι :

$$M \approx (1-f)M_{fa} + f \cdot M_r \quad (4.7)$$

όπου M_{fa} : μοριακό βάρος του μίγματος καυσίμου-αέρα

M_r : μοριακό βάρος του υπολοίπου καυσαερίων

και ο πίνακας 4.4 δίνει τις χημικές ενθαλπίες και τα μοριακά βάρη για μίγματα far ισοοκτανίου C_8H_{18} .

Οι σχέσεις 4.4, 4.6 και 4.7 είναι απλές πρακτικές εκφράσεις γενικότερων σχέσεων που λαμβάνουν υπ' όψιν τους τις γενικές εξισώσεις 4.3.

Η αισθητή ενθαλπία του συνολικού μίγματος εν γένει δίνεται από την εξίσωση

$$h_s = \frac{(h_{sa} + F \cdot h_{sf} + Y_v \cdot h_v)(1-f) + f \cdot h_{sr}(1+F)}{1+F+Y_v(1-f)} \quad (4.4)^*$$

καί από τον ίδιο τύπο αν θέσουμε h_c όπου h_s θα λάβουμε την χημική ενθαλπία του μίγματος. Παρομοίως, το μοριακό βάρος του μίγματος δίδεται από την έκφραση

$$M = \frac{m}{N} = \frac{1+F+Y_v(1-f)}{\left(\frac{1}{29} + \frac{F}{M_f} + \frac{Y_v}{18}\right)(1-f) + \frac{f(1+F)}{M_r}} \quad (4.7)^*$$

Σύμφωνα όμως με τις συζητήσεις των προηγούμενων παραγράφων οι γενικότερες αυτές σχέσεις απλουστεύονται στις σχέσεις 4.4, 4.6 και 4.7. Έχει επίσης δειχθεί, από τους Edson και Taylor, (Taylor, 1968), ότι μεταβολές στους υδρατμούς ή στο υπόλοιπο καυσάεριο (f) προκαλούν μικρές μεταβολές στην υπολογιζόμενη απόδοση των κύκλων καυσίμου αέρα και συνεπώς για θερμοδυναμικούς σκοπούς ο υδρατμός (διδόμενος συνήθως σε εκατοστιαία αναλογία, μεταβαλλόμενη με την θερμοκρασία και τον βαθμό κορεσμού) μπορεί να αντικατασταθεί στους υπολογισμούς με ίση μάζα υπολοίπων αέριων. Όταν υπάρχει υδρατμός αντι για f μπορούμε να χρησιμοποιούμε το f' , όπου

$$f' = \frac{m_r + m_v}{m_a + m_f + m_r + m_v} = \frac{f(1+F) + Y_v(1-f)}{1+F+Y_v(1-f)} \quad (4.8)$$

Επίσης στην γενική περίπτωση όπου έχουμε ένα οποιοδήποτε καύσιμο, η χημική και αισθητή ενθαλπία του μίγματος καυσίμου αέρα μετά την μίξη (υπό μηδενική μεταφορά θερμότητας και έργου), δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις και αναφέρεται στην συνολική μάζα (Taylor, 1968):

$$h_{s,fa} = \frac{(h_{sa} + F \cdot h_{s,f})}{1+F} \quad (4.9a)$$

$$h_{c,fa} = \frac{(h_{c,a} + F \cdot h_{c,f})}{1 + F} \quad (4.9b)$$

(Προσοχή: ο πίνακας 4.4 δίδει την χημική ενθαλπία $h_{c,fa}$ του μίγματος f-a έτοιμη προς χρήση για $C_8H_{18}(g)$).

Στον υπολογισμό κύκλων καυσίμου-αέρα γίνονται επιπλέον οι ακόλουθες υποθέσεις: μετά την καύση το λειτουργούν αέριο είναι σε χημική ισορροπία, όλες οι διαδικασίες είναι αδιαβατικές, οι ταχύτητες ροής και οι απώλειες πίεσης στο θάλαμο και στην εισαγωγή η στην εξαγωγή είναι αμελητέες και το έμβολο είναι ακίνητο.

4.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΥΚΛΩΝ

Μερικά παραδείγματα υπολογισμού των επιμέρους διεργασιών δίδονται παρακάτω.

Παράδειγμα 1.

Εύρετε την ενθαλπία (cal/g) και τον ειδικό όγκο (cm^3/g) ενός μίγματος καυσίμου (C_7H_{17})-αέρα-υπολοίπου (far) σε $T=500K$, $P=10 \text{ bar}$, $\Phi=1.0$, και με $f=0.10$.

Εργαζόμαστε ως ακολούθως:

Η χημική ενθαλπία του μίγματος far δίνεται από την 4.6:

$$h_{c, far} = (1-0.10)(h_{c, fa}) + f(h_{c, r})$$

και τα $h_{c, fa}$ και $h_{c, r}$, δηλαδή την χημική ενθαλπία καυσίμου αέρα (fa) και υπολοίπου (r), τις παίρνουμε από τον πίνακα 4.4. Άρα:

$$h_{c, far} = (1-0.10)(-29.25) + 0.10(-695) = -95.80 \text{ cal/g.}$$

Από τον πίνακα 4.2 μπορεί να ληφθεί η αισθητή ενθαλπία του μίγματος far για τον αέρα και σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση είναι

$$h_{s, far} = 204.89 \text{ J/g} = 48.97 \text{ cal/g.}$$

Συνεπώς η ενθαλπία είναι

$$h_{far}(500) = h_{s, far} + h_{c, far} = -46.83 \text{ cal/g.}$$

Ο ειδικός όγκος υπολογίζεται από τον νόμο των αερίων $PV = (R_n/M)T$. Το μοριακό βάρος δίνεται από την 4.7 και τον πίνακα

4.4 ως $M=(1-0.10) \cdot 30.26 + 0.10 \cdot (28.60) = 39.09 \text{ g/mole}$. Άρα θα είναι :

$$V = \frac{8.314 \frac{\text{J}}{\text{mole K}} 500 \text{ K} \left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{J}} \right) \left(\frac{10^6 \text{ cm}^3}{\text{m}^3} \right)}{30.09 \frac{\text{g}}{\text{mole}} (10 \text{ bar}) \left(\frac{10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\text{bar}} \right)} = 138.2 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

Παράδειγμα 2.

Μίγμα far αρχικά σε $T=300\text{K}$, $P=1 \text{ bar}$, συμπιέζεται ισοεντροπικά με λόγο όγκων $V_1/V_2=0.125$. Εύρετε την τελική θερμοκρασία και το έργο αν $\Phi=0.8$ και με $f=0.05$.

Για τις δεδομένες συνθήκες, από πίνακα 4.2 έχουμε $V_{r1}=0.9916$ και βέβαια όπως γνωρίζουμε από την θερμοδυναμική για τις ισοεντροπικές διαδικασίες κάνουμε χρήση και των παραμέτρων σχετικής πίεσης P_r και σχετικού όγκου V_r , που για ισοεντροπικές διεργασίες ορίζονται ως: $V_{r2}/V_{r1} = V_2/V_1$ και $P_{r2}/P_{r1}=P_2/P_1$ όπου

$$P_r = \exp\left(\int_{298}^T \frac{c_p}{R} \cdot \frac{dT}{T}\right) \text{ και } V_r = \frac{T}{298} \cdot \frac{1}{P_r}$$

και επειδή το c_p είναι ασθενής συνάρτηση των ϕ και f , μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας 4.2. Επομένως είναι $V_{r2}=(0.9916)(0.125)=0.1239$ και πάλι από τον πίνακα 4.2 με παρεμβολή βρίσκουμε $T_2=668 \text{ K}$. Το έργο που παράγεται δίδεται από $W_{1-2}=U_2-U_1$ όπου U η εσωτερική ενέργεια, και όπως για την ενθαλπία ισχύει $U=U_s+U_c$. Αλλά η U_c είναι σταθερά στους 298 K και για την 1 και για την 2 κατάσταση και έτσι $W_{1-2}=U_{s2}-U_{s1}$ όπου U_s η αισθητή εσωτερική ενέργεια του μίγματος far και η οποία μπορεί να ληφθεί από τον πίνακα 4.2. Άρα

$$W_{1-2} = 190.27 - (-84.139) = 274.40 \text{ J/g} = 65.58 \text{ cal/g}.$$

4.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ-ΑΕΡΑ ΟΤΤΟ

Ο κύκλος αυτός μοντελοποιεί μηχανές όπου η καύση συμβαίνει τόσο γρήγορα ώστε να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα κοντά στο TDC.

Εν γένει είναι εφαρμόσιμος σε μηχανές με έναυση δια σπινθηριστού και με ομοιογενές μίγμα. Οι βασικές διεργασίες σε διαγράμματα P-V είναι όμοιες με αυτές των διαγραμμάτων 2.1 (κεφάλαιο 2.1) και είναι:

1-2 Ισοεντροπική συμπίεση μίγματος far,

2-3 Αδιαβατική ισόχωρη καύση

3-4 Ισοεντροπική εκτόνωση των προϊόντων της καύσης, τα οποία θεωρούνται ότι βρίσκονται σε χημική ισορροπία.

Θα εφαρμοσθούν οι μεθοδολογίες των προηγούμενων παραγράφων και τα διαγράμματα E.1, E.2 και E.3, θα μας δώσουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των προϊόντων καύσης σε χημική ισορροπία και για οποιοδήποτε καύσιμο έχει λόγο ατόμων H προς C 2.25. Τα διαγράμματα είναι για καύση με αέρα και για τρεις περιπτώσεις: πτωχού μίγματος ($\Phi=0.8$), στοιχειομετρικού μίγματος ($\Phi=1.0$) και πλούσιου μίγματος ($\Phi=1.2$). Διαγράμματα για διαφορετικά καύσιμα και σχετικούς λόγους καυσίμου αέρα μπορεί να αναζητηθούν στους Taylor (1977) και Newhall and Starkman (1964).

Παράδειγμα 3.

Υπολογίσατε την *impr* και ενδεικνυμένη απόδοση ενός κύκλου Otto καυσίμου-αέρα με τα ακόλουθα δεδομένα : $r=10$, $P_1=1$ bar, $T_1=350^\circ K$, $f=0.10$, $\Phi=1.0$ και για καύσιμο ισοοκτάνιο C_8H_{18} .

Υποθέτουμε ότι το καύσιμο είναι πλήρως εξατμισμένο-σε αέρια φάση.

Από το 1 στο 2 το μίγμα καυσίμου-αέρα-υπολοίπου (far) συμπιέζεται ισοεντροπικά. Όπως και στο παράδειγμα 2 είναι $V_{r1}=0.6727$ και από εδώ βρίσκουμε τα ακόλουθα :

$$V_{r2}=(0.6727)/10 =0.06727, T_2=831^\circ K \text{ και}$$

$$W_{1-2}=320.88-(-48.58)=369.46 \text{ J/g} = 88.30 \text{ cal/g.}$$

Η καύση λαμβάνει χώρα υπο σταθερό όγκο και εσωτερική ενέργεια, δηλαδή $V_{3far}=V_{2far}$ και $U_{3far}=U_{2far}$. Άρα χρειαζόμαστε τα V_2 και U_2 . Από το παράδειγμα 1, το μοριακό βάρος και η χημική ενθαλπία του far, για την κατάσταση 1, είναι $M_{far}=30.09$ g/mole και $h_{c, far}=-95.80$ cal/g. Άρα είναι

$$V_1 = \frac{P_1 * R_n * T}{M} \quad \text{και} \quad V_1 = \frac{8.314 * 350 * 10^6}{30.09 * 1 * 10^5} = 967 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

και $V_2 = V_1/10 = 96.7 \text{ cm}^3/\text{g} = V_3$.

Με γνωστή θερμοκρασία $T_2=831\text{K}$ και παρεμβολή στον πίνακα 4.2 βρίσκουμε $U_2=320.88 \text{ J/g} = 76.69 \text{ cal/g}$. Συνεπώς είναι $U_{2\text{far}}=U_{2\text{s, far}}+U_{2\text{c, far}}$ η $U_{2\text{far}}=(76.69)+(-95.80)=-19.11 \text{ cal/g} = U_{3\text{far}}$. Η κατάσταση 3 βρίσκεται από το διάγραμμα Ε.3. Σε $U_3=-19.11\text{cal/g}$ και $V_3=96.7 \text{ cm}^3/\text{g}$ διαβάζουμε $T_3=2790\text{K}$ και $P_3=85 \text{ atm}$ και $S_3=2.068 \text{ cal/g}^\circ\text{K}$. Τα προϊόντα τότε εκτονώνονται ισεντροπικά σε $V_4=10*V_3=967 \text{ cm}^3/\text{g}$. Με δεδομένα τα V_4 και $S_4=S_3$ διαβάζουμε από τον χάρτη Ε.3 τις τιμές : $T_4=1740^\circ\text{K}$, $P_4=54 \text{ atm}$, $U_4=-380 \text{ cal/g}$. Το παραγόμενο έργο από την εκτόνωση των καυσαερίων είναι $W_{3-4}=U_3-U_4=(-19.11)-(-380)=360.9 \text{ cal/g}$. Το έργο του κύκλου είναι $W=W_{3-4}-W_{1-2}=(360.9)-(88.3)=272.6 \text{ cal/g} = 1140 \text{ J/g}$. Συνεπώς είναι

$$\text{imep} = \frac{W}{V_1 - V_2} = \frac{1140 * 10}{967 - 96.7} = 13.1 \text{ bar}$$

Τελικώς ο βαθμός απόδοσης, σύμφωνα με τον γενικότερο ορισμό που δόθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, είναι

$$\eta = \frac{W(1 + \Phi * F_s)}{\Phi * F_s(1 - f)\alpha_o} = \frac{1140(1 + 0.0665)}{0.0665 * 0.9 * 47670} = 0.426$$

Στην πρακτική εφαρμογή εκείνο που μας ενδιαφέρει κυρίως στην προσομοίωση (μοντελλοποίηση) του κύκλου λειτουργίας μιας μηχανής που περιγράφεται θεωρητικά από τον παραπάνω κύκλο-μοντέλλο, είναι το πως μεταβάλλεται η ενδεικνυμένη απόδοση και η μέση ενεργός πίεση συναρτήσει παραμέτρων, όπως ο σχετικός λόγος καυσίμου-αέρα (ϕ) και ο λόγος συμπίεσης (r). Είναι εμφανές ότι θα πρέπει να επαναλάβουμε τους υπολογισμούς του παραδείγματος 3 για π.χ. διαφορετικές τιμές του Φ και r . Είναι λοιπόν προτιμότερο να χρησιμοποιούμε κώδικες υπολογισμού (πχ Ferguson, 1986) για την ακριβέστερη και βέλτιστη εκτίμηση των διαγραμμάτων. Εάν λοιπόν σχηματίσουμε τα διαγράμματα η_i και $\text{imep}=f(\Phi)$ η $f(r)$ για ένα καύσιμο διαφορετικό, π.χ.

gasoline (C_7H_{17}), με αρχικές $P_1=1.0$ bar, $T_1=350^\circ K$ και $f=0.10$ λαμβάνουμε τα διαγράμματα στα σχήματα 4.1 και 4.2 (Ferguson, 1986).

Μπορούμε να συνάγουμε μια σειρά από συμπεράσματα:

1. Η ενδεικνυμένη απόδοση (η_i) αυξάνει με το r , μεγιστοποιείται για καύση πτωχού μίγματος και είναι πρακτικώς ανεξάρτητη της αρχικής θερμοκρασίας και πίεσης.
2. Η ενδεικνυμένη μέση ενεργός πίεση αυξάνει με το r , μεγιστοποιείται με καύση ελαφρώς πλούσιου μίγματος και μειώνεται γραμμικά με την αρχική πυκνότητα, δηλαδή

$$imep \sim P_1 \text{ και } imep \sim \frac{1}{T_1}$$

3. Για δεδομένο λόγο συμπίεσης, η μέγιστη πίεση του κύκλου είναι ανάλογη της $imep$.
4. Η μέγιστη πίεση στους κύκλους μεγιστοποιείται για καύση ελαφρώς πλούσιου μίγματος.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι χαρακτηριστικά για τα περισσότερα καύσιμα υδρογονανθράκων. Ας εξετάσουμε την επίδραση των ιδιοτήτων του καυσίμου επί του κύκλου σε σχέση με τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Ο πίνακας 4.5 (Ferguson, 1986) παρουσιάζει αποτελέσματα που παράχθηκαν για δυο διαφορετικούς λόγους συμπίεσης και πέντε διαφορετικά καύσιμα. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μόνο μικρή διαφορά μεταξύ των υδρογονανθράκων. Σύμφωνα με αυτή την ανάλυση το πετρέλαιο (diesel) θα ήταν όσο καλό και η βενζίνη (gasoline) για ομοιογενούς πλήρωσης μηχανή S.I. Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχει το πρόβλημα της κρουστικής καύσης. Το νιτρομεθάνιο πχ. είναι καύσιμο για αγώνες ταχύτητας μια και δίνει μέγιστη $imep$. Για περισσότερα διαγράμματα και μια σειρά από σχετικούς υπολογισμούς και αποτελέσματα ο αναγνώστης αναφέρεται στην βιβλιογραφία (πχ. Taylor (1968,1977), Ferguson (1986), Obert (1973), Newhall and Starkman (1964) κλπ).

Πίνακας 4.1 Μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια καύσης και θερμογόνος δύναμη διαφόρων καυσίμων, Ferguson (1986)

FUEL		h_{298} (kJ/mole)	s_{298}° (J/mole/K)	q_c (kJ/g)	a_o (kJ/g)
C_2N_2 (g)	Cyanogen	309.1	241.5	21.06	21.29
H_2 (g)	Hydrogen	0.0	130.6	119.95	119.52
NH_3 (g)	Ammonia	-45.7	192.6	18.61	20.29
CH_4 (g)	Methane	-74.9	186.2	50.01	52.42
C_3H_8 (g)	Propane	-103.9	269.9	46.36	49.16
C_7H_{17} (l)	Gasoline ^b	-305.6	345.8	44.51	47.87
C_8H_{18} (l)	Octane	-249.5	360.8	44.43	47.67
C_8H_{18} (l)	Isooctane	-259.3	328.0	44.35	47.67
$C_{14.4}H_{24.9}$ (l)	T-T diesel ^b	-174.0	525.9	42.94	45.73
$C_{15}H_{32}$ (l)	Pentadecane	-428.9	587.5	43.99	47.22
C_2H_2 (g)	Acetylene	226.7	200.8	48.22	48.58
C_6H_6 (l)	Benzene	48.91	173.0	40.14	42.14
$C_{10}H_8$ (s)	Naphthalene	78.1	166.9	38.86	40.84
CH_4O (l)	Methanol	-239.1	126.8	19.91	22.68
C_2H_6O (l)	Ethanol	-277.2	160.7	26.82	29.71
CH_3NO_2 (l)	Nitromethane	-113.1	171.8	10.54	12.43
C (s)	Graphite	0.0	5.7	32.76	33.70
$C_{176}H_{144}O_8N_3$ (s)	Good coal ^b	-10000.0	3000.0	31.57	33.57

^aBased on equilibrium water quality, lean combustion at $\phi = 0.01$ and unmixed reactants.

^bEstimated for typical fuel.

Πίνακας 4.2 Ιδιότητες του αέρα

298	1.400	0.00	-85.54	1.000 + 00	1.000 + 00	15.71	26.1
300	1.400	1.98	-84.13	1.012 + 00	9.916 - 01	15.89	26.3
350	1.397	51.89	-48.58	1.740 + 00	6.727 - 01	20.92	30.0
400	1.394	102.34	-12.47	2.795 + 00	4.784 - 01	26.41	33.8
450	1.390	153.34	24.18	4.262 + 00	3.530 - 01	32.39	37.3
500	1.386	204.89	61.37	6.239 + 00	2.678 - 01	38.79	40.7
550	1.381	256.97	99.10	8.836 + 00	2.082 - 01	45.57	43.9
600	1.376	309.58	137.36	1.217 + 01	1.649 - 01	52.69	46.9
650	1.370	362.73	176.15	1.638 + 01	1.327 - 01	60.21	49.7
700	1.365	416.39	215.47	2.162 + 01	1.082 - 01	68.10	52.4
750	1.360	470.58	235.30	2.804 + 01	8.942 - 02	76.37	54.9
800	1.355	525.29	295.66	3.587 + 01	7.454 - 02	84.93	57.3
850	1.350	580.51	336.52	4.528 + 01	6.276 - 02	93.80	59.6
900	1.345	636.23	377.90	5.648 + 01	5.327 - 02	102.9	62.0
950	1.340	692.46	419.78	6.981 + 01	4.553 - 02	112.2	64.3
1000	1.336	749.17	462.15	8.544 + 01	3.915 - 02	121.9	66.7
1100	1.328	864.17	548.39	1.248 + 02	2.947 - 02	141.8	71.5
1200	1.321	981.07	636.58	1.777 + 02	2.259 - 02	162.9	76.3
1300	1.314	1099.9	726.67	2.469 + 02	1.761 - 02	185.1	82
1400	1.309	1220.5	818.67	3.366 + 02	1.391 - 02	213	91
1500	1.303	1343.1	912.47	4.512 + 02	1.112 - 02	240	100
1600	1.298	1467.4	1008.1	5.957 + 02	8.983 - 03	268	106
1700	1.293	1593.5	1105.6	7.765 + 02	7.326 - 03	298	113
1800	1.288	1721.4	1204.7	1.000 + 03	6.016 - 03	329	120
1900	1.281	1851.0	1305.6	1.276 + 03	4.980 - 03	362	128
2000	1.273	1982.2	1408.1	1.613 + 03	4.147 - 03	396	137

Other Properties at Atmospheric Conditions ($T = 298$ K, $P = 1$ atm)

$R = 0.28704$ J/g-K	$\mu = 1.836 \times 10^{-5}$ N · s/m ²	$\mathcal{D}^c = 5.68 \times 10^{-6}$ m ² /s
$\rho = 1.1707$ kg/m ³	$\alpha = 2.22 \times 10^{-5}$ m ² /s	$Pr^b = 0.707$
$c_p = 1.007$ J/g-K	$c = 345.94$ m/s	$S_c^c = 2.77$
$M = 28.966$ g/mole	$\nu = 0.8542$ m ³ /kg	$L_c^c = 3.91$

^aRelative pressure for isentropic process.

^bPrandtl number.

^cBinary diffusion with octane.

Source: R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, Wiley, New York, 1960; F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, Wiley, New York, 1981; T. F. Irvine, Jr. and P. E. Liley, *Tables and Computer Equations for Steam and Gases*, Academic,

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 Ενθαλπίες σχηματισμού και μοριακά βάρη μερικών ουσιών

<u>Ουσία</u>	<u>Σύμβολο</u> <u>(κατάσταση)</u>	<u>$h_{f,298}^{\circ}$</u> <u>(kca/mol)</u>	<u>MW (g/mole)</u>
Carbon	C (s)	0	12.01
Carbone monoxide	CO (g)	-26.417	28.01
Carbon dioxide	CO ₂ (g)	-94.054	44.01
Hydrogen	H ₂ (g)	0	2.018
Water	H ₂ O (g)	-57.798	18.02
Nitrogen	N ₂ (g)	0	28.008
Methane	CH ₄ (g)	-17.89	16.04
Propane	C ₃ H ₈ (g)	-24.82	44.09
Isooctane	C ₈ H ₁₈ (l)	-61.97	114.22
	C ₈ H ₁₈ (g)	-53.57	
Cetane	C ₁₆ H ₃₄ (l)	-108.62	226.47

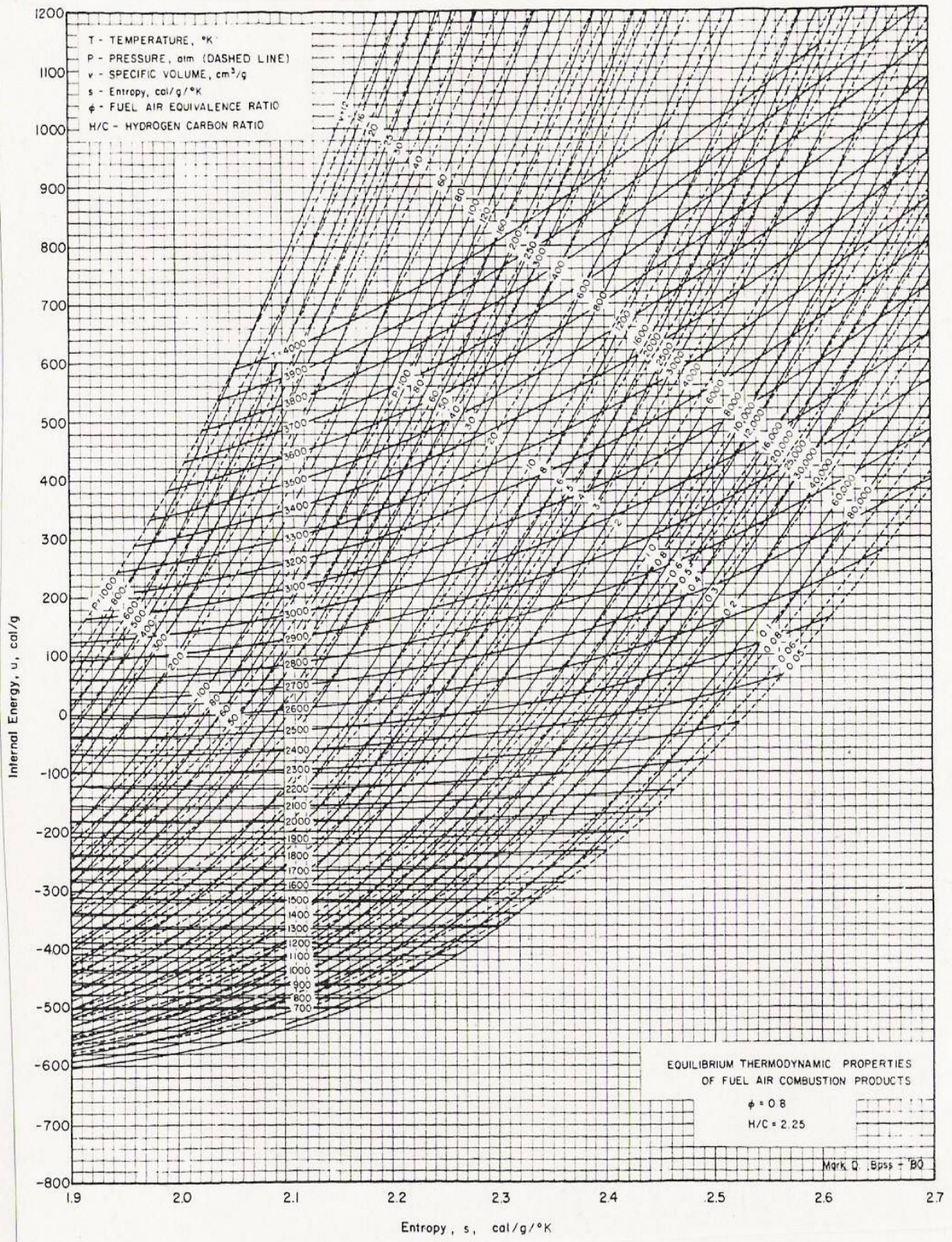
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 Χημική ενθαλπία και μοριακό βάρος ισοοκτανίου C₈H₁₈ (g)-αέρα μίγματος (fa) και προϊόντων με υπόλοιπο (r), F_s=0.0665

$\phi = F/F_s$	0.8	1.0	1.2
h_{fa} (cal/g)	-23.70	-29.25	-34.66
h_r (cal/g)	-563.0	-695.1	-649.5
M_{fa} (g/mole)	29.98	30.26	30.54
M_r (g/mole)	28.65	28.60	27.50

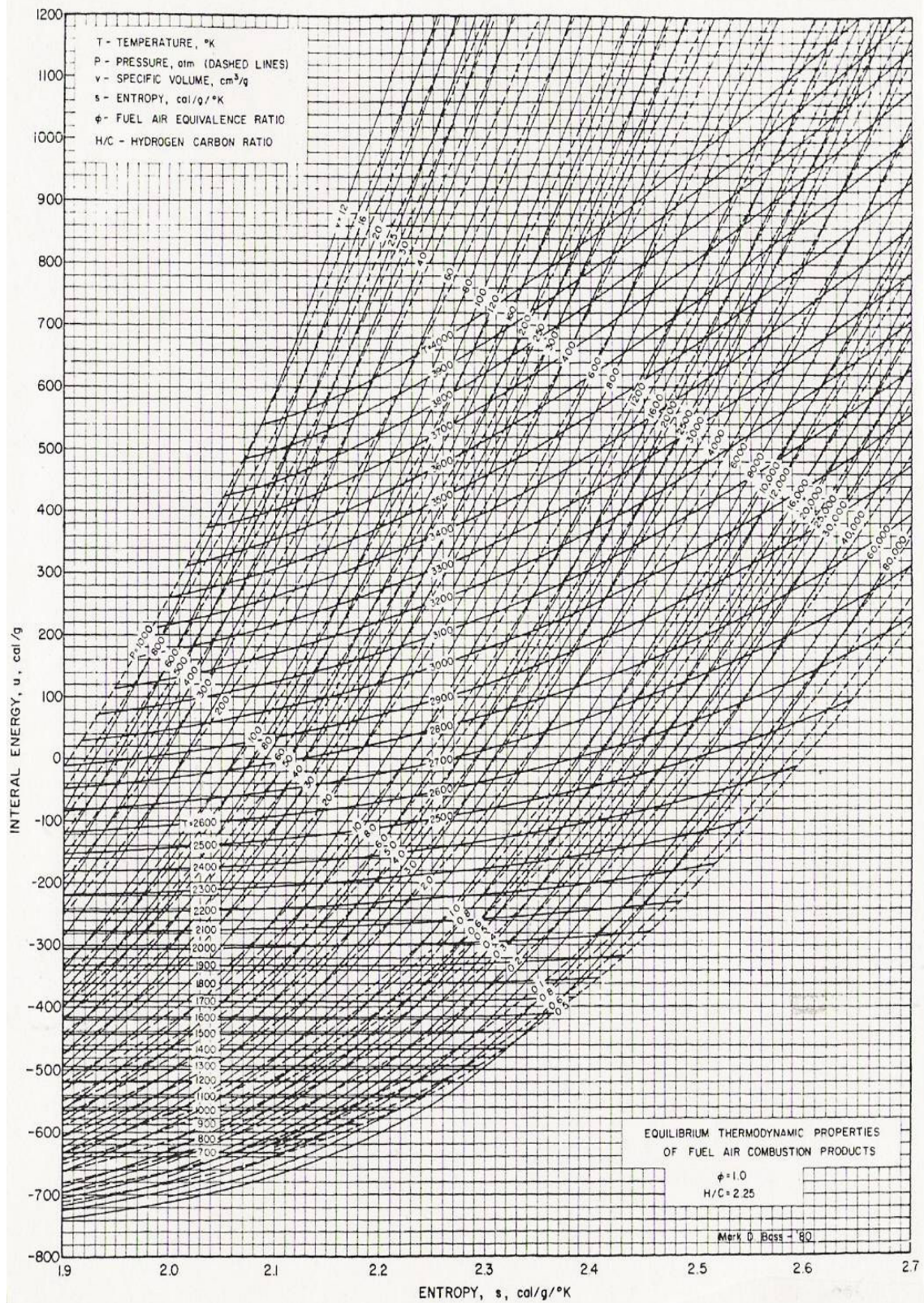
Πίνακας 4.5 Επίδραση του τύπου καυσίμου επί των χαρακτηριστικών του κύκλου καυσίμου-αέρα Otto, (Ferguson, 1986)

FUEL		r	η_i	imep (BAR)
Benzene	C_6H_6	10	0.438	13.5
		15	0.492	14.6
Diesel	$C_{14.4}H_{24.9}$	10	0.439	13.7
		15	0.495	14.9
Gasoline	C_7H_{17}	10	0.440	13.3
		15	0.495	14.4
Methane	CH_4	10	0.443	12.2
		15	0.496	13.1
Methanol	CH_3OH	10	0.430	13.1
		15	0.483	14.2
Nitromethane	CH_3NO_2	10	0.388	21.0
		15	0.433	23.1

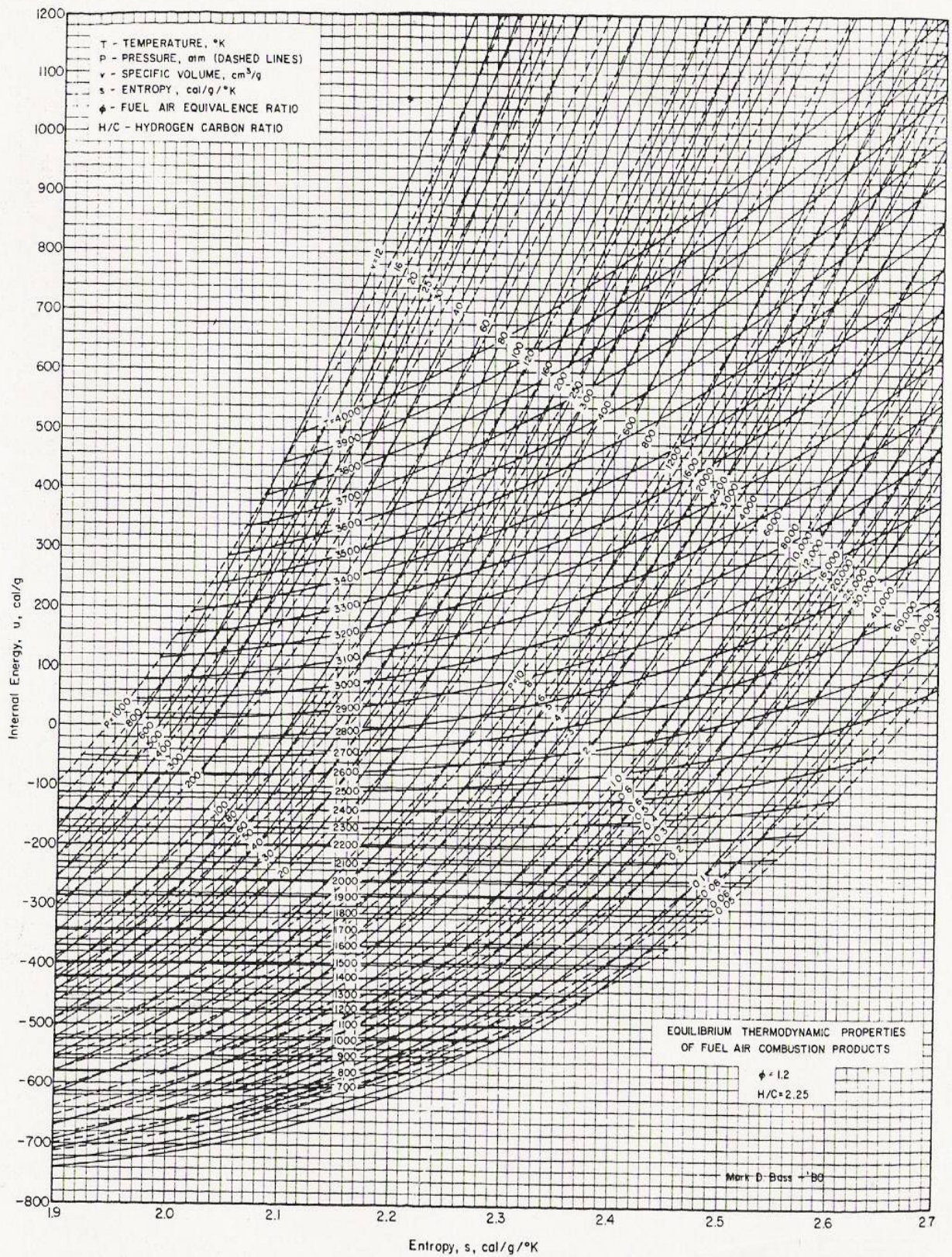
^aAll calculations use $\phi = 1.0$, $f = 0.10$, $P_1 = 1.0$ bar, $T_1 = 350$ K



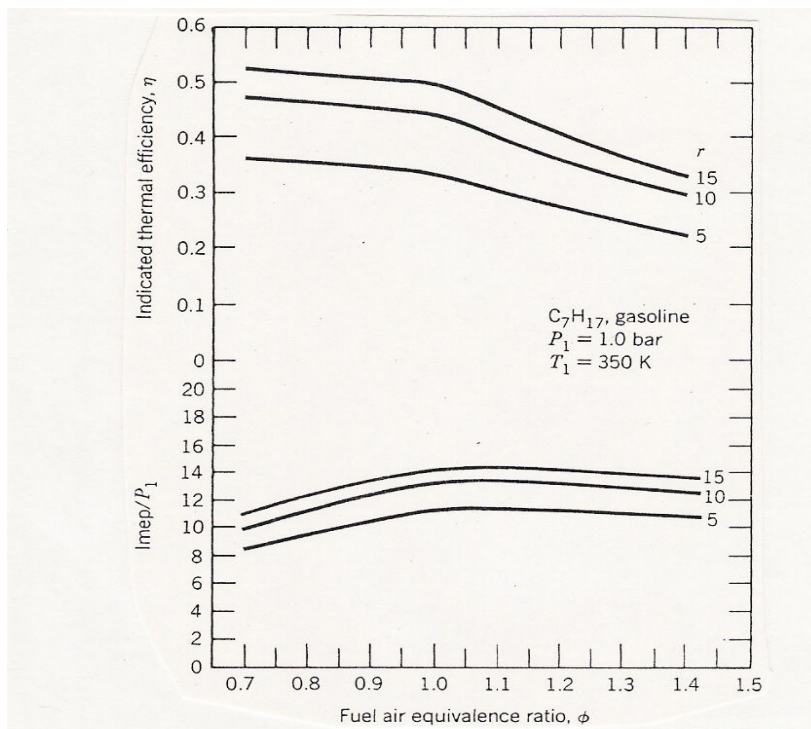
Διαγραμμα Ε.1 Θερμοδυναμικές ιδιοτητες προϊόντων καύσης ισοζυγίου $\Phi=0.8$ Ferguson (1986)



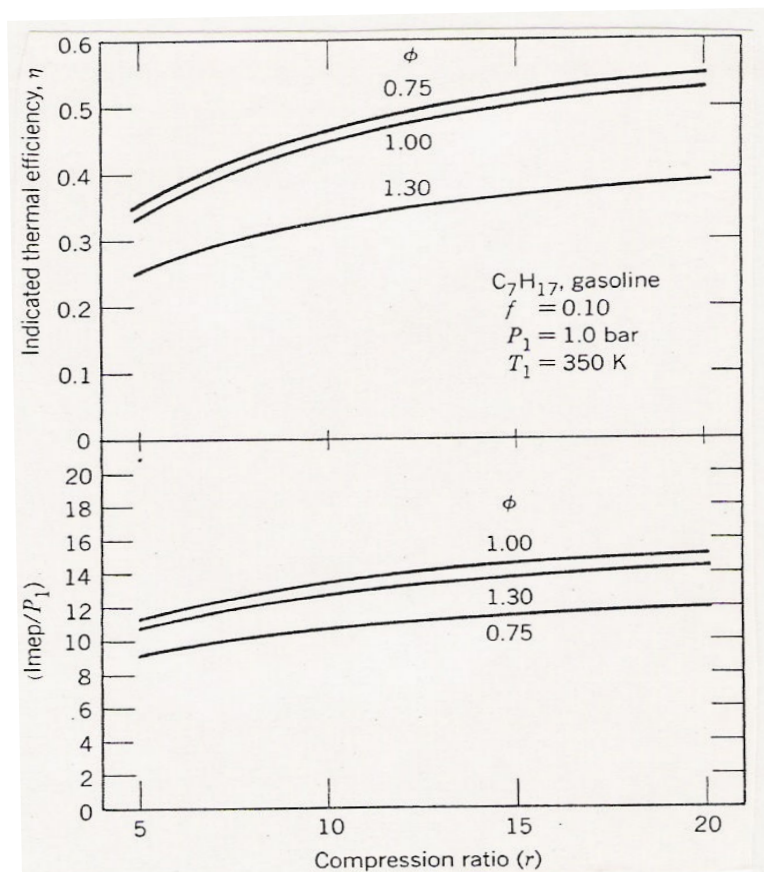
Διαγραμμα Ε.2 Θερμοδυναμικές ιδιοτητες προϊόντων καύσης
 ισοζυγίου $\Phi=1.0$ Ferguson (1986)



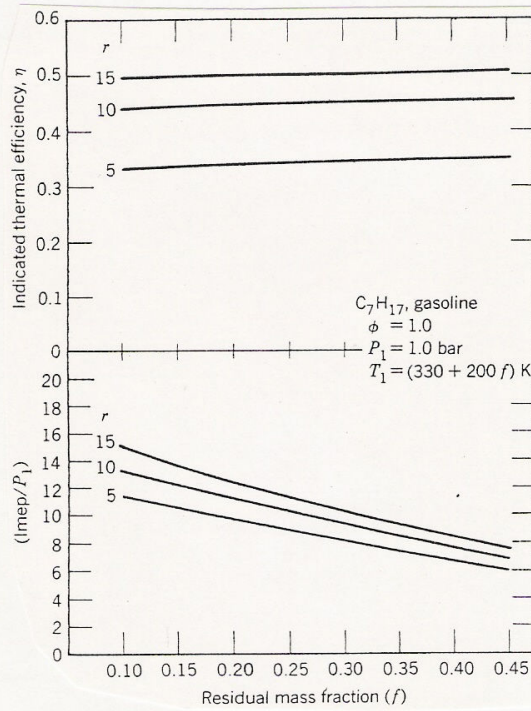
Διαγραμμα Ε.3 Θερμοδυναμικές ιδιοτητες προϊόντων καύσης
 ισοζυγίου $\Phi=1.2$ Ferguson (1986)



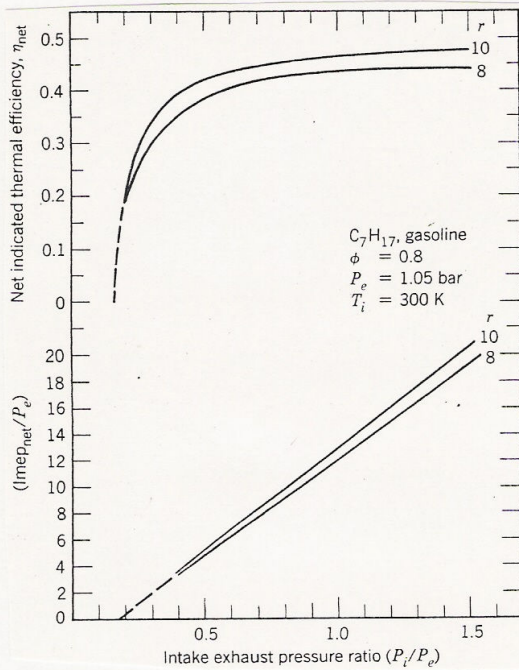
Σχημα 4.1 Χαρακτηριστικά κυκλου καυσιμου-αερα Otto



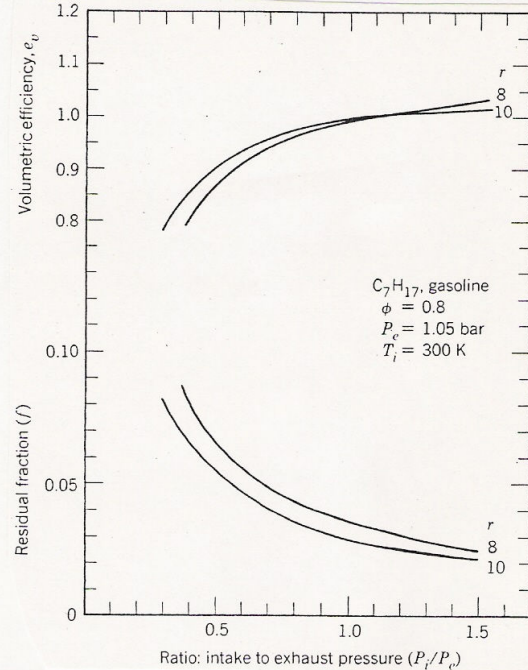
Σχημα 4.2 Χαρακτηριστικά κυκλου καυσιμου-αερα Otto



Σχημα 4.3 Χαρακτηριστικά κυκλου καυσιμου-αερα Otto

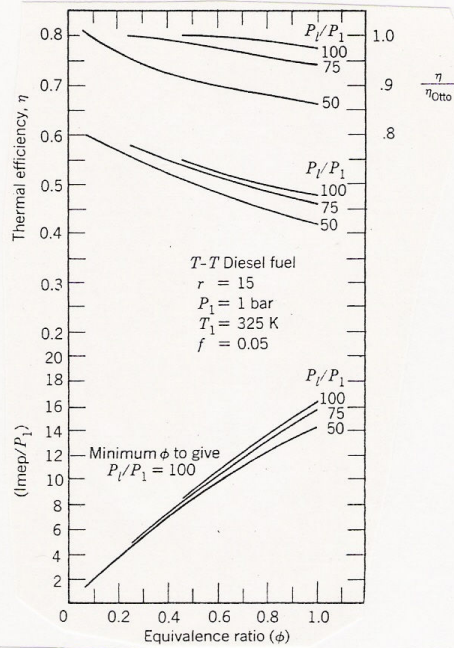


Σχημα 4.4 Χαρακτηριστικά κυκλου καυσιμου-αερα Otto σε συνδυασμο με τις διαδικασίες εισαγωγής-εξαγωγής

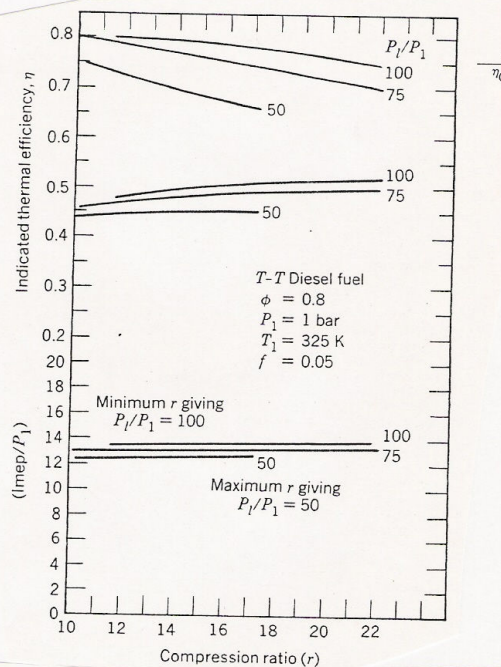


Σχημα 4.5 Χαρακτηριστικά κυκλου καυσιμου-αερα Otto σε συνδυασμο με τις διαδικασίες εισαγωγής-εξαγωγής

Ferguson (1986)



Σχημα 4.6 Χαρακτηριστικά κυκλώ καυσίμου-αέρα περιορισμένης πίεσης με εγχύση καυσίμου



Σχημα 4.7 Χαρακτηριστικά κυκλώ καυσίμου-αέρα περιορισμένης πίεσης με εγχύση καυσίμου