

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Η ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ, ΟΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

9.1 ΚΑΥΣΗ

Οι πρώτες μελέτες του φαινομένου της καύσης σε κυλίνδρους ΜΕΚ έγιναν το 1940 περίπου, και ήταν φωτογραφικές απεικονίσεις των διεργασιών της καύσης (Taylor, 1968, 1977). Μια τέτοια φωτογραφική απεικόνιση, που επιδεικνύει τη διαδρομή της φλόγας σε μηχανή SI ομοιογενούς μίγματος, δίδεται στο σχήμα 9.1. Η έναυση δια σπινθηριστού εμφανίζεται σε $\theta_s = -25^\circ$, και η φλόγα γίνεται ορατή σε $\theta = -16^\circ$. Αυτή η περίοδος των 9° λέγεται καθυστέρηση έναυσης (ignition delay), $\Delta\theta_{id}$. Μετά το σχηματισμό της η φλόγα διαδίδεται ως σφαιρικό κύμα μέσα στα άκαυστα αέρια. Το τέλος της καύσης διακρίνεται από ταυτόχρονες μετρήσεις της πίεσης, μια και τα προϊόντα συνεχίζουν να ακτινοβολούν (luminous gases) και μετά το τέλος της καύσης. Η διάρκεια της καύσης, $\Delta\theta_c$, είναι 37° , σ' αυτή τη μηχανή (Ferguson, 1986).

Η διεργασία της καύσης έχει επίσης φωτογραφηθεί και σε μηχανές Diesel, όπως δείχνεται στο σχήμα 9.2. Και εδώ, η περίοδος μεταξύ αρχής έγχυσης και αρχής καύσης λέγεται καθυστέρηση έναυσης. Κατά την περίοδο αυτή το καύσιμο εξατμίζεται, αναμιγνύεται με αέρα και αποσυντίθεται σε νέα χημικά στοιχεία, που λέγονται πρόσημα καύσης (precursors), τα οποία σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλούν αυτανάφλεξη. Κατόπιν η φλόγα διαδίδεται γοργά σε όλο το μίγμα καυσίμου-αέρα, μέσω των ιδίων μηχανισμών, όπως στις μηχανές SI, δηλαδή με (κυρίως) τυρβώδη και στρωτή διάδοση της φλόγας. Αυτή η φάση της καύσης λέγεται φάση πρόμιξης ή γοργής καύσης. Ακολουθεί κατόπιν καύση με ρυθμό που ελέγχεται κυρίως από το ρυθμό ανάμιξης του καυσίμου με τον αέρα. Το ποσοστό του καυσίμου που καίγεται σε κάθε μια από τις τρεις φάσεις, εξαρτάται έντονα από το σχεδιασμό του

κυλίνδρου, του εγχυτήρα και από το καύσιμο. Επί παραδείγματι, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες έχουν χημικούς δεσμούς που διασπώνται δύσκολα, και έτσι έχουμε μακρά καθυστέρηση έναυσης. Εάν λοιπόν το καύσιμο αυτό εγχυθεί γρήγορα, και αναμιχθεί πλήρως με τον αέρα, πριν εμφανιστεί αυτανάφλεξη, είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου θα καεί κατά τη φάση της πρόμιξης, προκαλώντας μεγάλη αύξηση της πίεσης. Από την άλλη πλευρά υπάρχουν καύσιμα των οποίων οι χημικοί δεσμοί διασπώνται εύκολα. Η καθυστέρηση έναυσης είναι τότε μικρή και, εάν έχουμε αργή έγχυση, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου να εγχυθεί μετά την αυτανάφλεξη, και να καεί κατά την τρίτη φάση της καύσης. Έτσι, ο λόγος της περιόδου της καθυστέρησης της έναυσης προς την περίοδο έγχυσης, είναι σημαντικός παράμετρος ελέγχου του ρυθμού αύξησης της πίεσης και της πληρότητας της καύσης.

9.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ

Οι ιδανικοί κύκλοι καυσίμου-αέρα υποθέτουν πολύ γρήγορη-στιγμιαία καύση. Στις πραγματικές μηχανές η καύση λαμβάνει χώρα σε μια πεπερασμένη περίοδο χρόνου. Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο των πραγματικών κύκλων, η έναυση εμφανίζεται πριν το ANΣ (TDC), και η καύση πληρούται σε κάποιο σημείο μετά το ANΣ (TDC) με αποτέλεσμα το ελαττωμένο έργο του κύκλου. Μια πρώτη, αλλά καθ' όλα αντιπροσωπευτική της πράξης, προσπάθεια να συμπεριβάλουμε το φαινόμενο της προοδευτικής καύσης (μέσω του μοντέλου της προοδευτικής (πεπερασμένου ρυθμού) πρόσδοσης θερμότητας) έγινε στο κεφάλαιο 2.6. Εκεί χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $x(\theta)$ η οποία ορίστηκε ως η μάζα των καμμένων αερίων προς την συνολική μάζα των αερίων και δόθηκαν δύο ημιεμπειρικές εκφράσεις του $x(\theta)$ συναρτήσει της γωνίας του στροφάλου (εξ. 2.1 και 2.2). Ο υπολογισμός του $x(\theta)$ είναι αντικείμενο συνεχιζόμενης έρευνας και έξω από τα πλαίσια του παρόντος συγγράμματος. Μερικές ποιοτικές πληροφορίες δίδονται παρακάτω, ενώ μια προσέγγιση στο πρόβλημα αλλά όχι και τόσο θεμελιώδης (σχεδόν παρόμοια με αυτή του κεφαλαίου 2.6) δίδεται στους π.χ. Ferguson (1986), Cambell A.S. (1979). Εν γένει τα λιγότερο θεμελιώδη μοντέλα

αντιμετωπίζουν το θέμα καθαρά θερμοδυναμικά ενώ μονοδιάστατα θεμελιώδη μοντέλα συνδέουν το $x(\theta)$ με την ταχύτητα διάδοσης της στρωτής φλόγας και την ένταση της τύρβης ($x=x(S_L, u')$). Πολυδιάστατα μοντέλα φυσικά επιλύουν τις εξισώσεις Navier-Stokes με την βοήθεια μοντέλων τύρβης και καύσης και μοντέλων περιγραφής του spray (μηχανές με έγχυση). Το σχήμα 9.3α παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης της φλόγας με δύο περιοχές, 1) το διάστημα $\Delta\theta_a$ που αναπτύσσεται η φλόγα μετά τον σπινθήρα και 2) το διάστημα $\Delta\theta_b$ της γοργής καύσης που καίγεται το περισσότερο (90%) καύσιμο. Ο χρόνος για να περατωθεί η καύση είναι:

$$t_{90\%} = \frac{\Delta\theta_{90\%}}{N \cdot \left(\frac{\text{min}}{60s}\right) \cdot \left(\frac{360^\circ}{\text{rev}}\right)}$$

με τυπικές τιμές από 0.5 μέχρι 15 msec για λειτουργία στο ρελαντί και για λειτουργία σε υψηλές στροφές και μέγιστη ισχύ. Το σχήμα 9.3β δείχνει τυπική πειραματική και θεωρητική καμπύλη $x=x(\theta)$. Η καθυστέρηση έναυσης $\Delta\theta_a$ αυξάνει με τον χρονισμό του σπινθήρα (spark advance, θ_s) λόγω χαμηλότερης ταχύτητας διάδοσης της τυρβώδους φλόγας εξαιτίας χαμηλότερων θερμοκρασιών. Επίσης αυξάνει όσο πτωχότερο είναι το μίγμα. Η διάρκεια καύσης $\Delta\theta_b$ ελαττώνεται με αύξηση του Φ και αυξάνεται με αύξηση του κλάσματος υπολοίπου, f . Για την ελαχιστοποίηση της διάρκειας της καύσης απαιτείται υψηλή τύρβη (η τύρβη μέσα στον κύλινδρο έχει εκτιμηθεί πειραματικά ως $u' \sim 1/2U_p$, ιδέ συζήτηση στον Ferguson (1986), κεφ. 9), επιφάνεια φλόγας που αυξάνεται με την απόσταση από τον σπινθηριστή και κεντρικά τοποθετημένος σπινθηριστής για να ελαττωθεί η απόσταση μετατόπισης της φλόγας. Αποτελέσματα κατανομών $P=P(\theta)$ με χρήση του μοντέλου πεπερασμένου ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας δείχνονται στο σχήμα 9.3γ αναφέρονται στους Ferguson (1986), Taylor (1968,77), και σε πολλές αναφορές της SAE.

Στις μηχανές με έγχυση καυσίμου, και στις Diesel, το μίγμα δεν είναι ομοιογενές, αλλά σε αέρια και υγρή (σταγονίδια) φάση, σχήμα 9.4α. Σε μια πρώτη αντιμετώπιση, χωρίς χρήση μοντέλων υπολογισμού της διφασικής ροής του spray, είναι σύνηθες να

αγνοούνται οι λεπτομέρειες της διφασικής ροής και γίνεται εμπειρική εκτίμηση, ενός εκτιμούμενου ρυθμού έγχυσης από μετρηθέντα δυναμοδεικτικά διαγράμματα P-V. Οι παράμετροι των νοητών αυτών διεργασιών συσχετίζονται και βαθμονομούνται επί τη βάση των πραγματικών διεργασιών. Οι συσχετισμοί αυτοί χρησιμοποιούνται και σε νέες περιπτώσεις μηχανών και έτσι έχουμε ένα ημιεμπειρικό εργαλείο για τις διεργασίες καύσης. Τα διαγράμματα των σχημάτων 9.4β, γ δείχνουν μετρηθείσες καμπύλες για το ρυθμό έγχυσης, απελευθέρωσης θερμότητας και αύξησης της πίεσης στον κύλινδρο για μηχανη Diesel άμμεσης έγχυσης.

9.3 ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗ ΚΑΙ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΚΑΥΣΗ (KNOCK)

Η κρουστική καύση (Stone (1985), Obert (1973)) σε μηχανές SI με ομοιογενές μίγμα, προκαλείται λόγω αυτανάφλεξης του άκαυστου μίγματος μπροστά από τη φλόγα. Η διάδοση του μετώπου της φλόγας μετά την κρουστική καύση, είναι πολύ γρηγορότερη από το κανονικό. Αυτό συμβαίνει διότι το άκαυστο μίγμα μπροστά από το μέτωπο της φλόγας ευρίσκεται σε υψηλότερες από το κανονικό θερμοκρασίες και η ταχύτητα της στρωτής φλόγας είναι αυξημένη. Ένας άλλος λόγος είναι επίσης η εμφάνιση πολλών σημείων αυτανάφλεξης συγχρόνως και/η κάποια ανεξάρτητη ανάφλεξη του μίγματος από κάποια υπέρθερμη επιφάνεια του κυλίνδρου πριν η μετά από τον σπινθήρα. Εάν ένα σημαντικό τμήμα του μίγματος καίγεται με αυτανάφλεξη υπάρχει γοργότατη αύξηση της πίεσης, που μπορεί να προκαλέσει σοβαρά μηχανικά προβλήματα στο θάλαμο καύσης, και που ξεπερνά κατά πολύ τους ρυθμούς αύξησης της πίεσης που υπολογίζονται από μοντέλα προοδευτικής καύσης.

Εν γένει, το εάν σε μια μηχανή SI θα εμφανιστεί κρουστική καύση, εξαρτάται από το σχεδιασμό της μηχανής και το καύσιμο. Οι κυριότερες συνθήκες που συμβάλλουν στην εμφάνιση του knock είναι υψηλή παροχή μίγματος (γκάζι) και χαμηλές στροφές της μηχανής. Η φυσικοχημεία της αυτανάφλεξης στους κυλίνδρους μηχανών δεν έχει πλήρως κατανοηθεί και αποτελεί πεδίο εντατικής έρευνας. Για να υπάρχει μια βάση σύγκρισης των χαρακτηριστικών κρουστικής καύσης ενός καυσίμου, χρησιμοποιείται η κλίμακα οκτανίων του καυσίμου, και διαφορετικές μηχανές SI συγκρίνονται επί τη βάση των απαιτήσεων τους σε οκτάνια, Πίνακας 9.1.

Η μέτρηση του αριθμού οκτανίων (ON) ενός καυσίμου, γίνεται σε μια τυποποιημένη πειραματική μηχανή (CFR) (Stone (1985), Obert (1973), Taylor (1968, 1977)), που εργάζεται κάτω από τυποποιημένες συνθήκες. Χρησιμοποιούνται δύο ομάδες συνθηκών λειτουργίας, και αναφέρονται ως μέθοδοι του κινητήρα (Motor) και της έρευνας (Research), με αντίστοιχες συνθήκες: $T_i=422, 325K$, $T_{coolant}=373, 373K$, $RPM=900, 600$ και υγρασία (κλάσμα μάζας)= $0.0036\div 0.0072$. Ο αριθμός οκτανίων που αναφέρεται στα πρατήρια είναι $(R+M)/2$ και καλείται και δείκτης antiknock.

Η διαδικασία μέτρησης του αριθμού οκτανίων σε ένα καύσιμο (K) είναι η ακόλουθη:

- Η μηχανή CFR (4-χρονη με $b=3.25in$, $s=4.5in$, $r=3\div 30$) λειτουργεί με το καύσιμο K στις συνθήκες M ή R.
- Βαθμιαία αυξάνεται ο λόγος συμπίεσης, έως ότου εμφανισθεί ένα τυποποιημένο ποσοστό knock.
- Σε αυτό το λόγο συμπίεσης, η μηχανή εργάζεται με μίγμα καυσίμων αναφοράς: ισοοκτανίου, C_8H_{18} , που αυθαιρέτως έχει καθοριστεί να έχει $ON=100$ και n-επτανίου, $n-C_7H_{16}$, με $ON=0$.
- Ο αριθμός οκτανίων του (K) είναι το ποσοστό του ισοοκτανίου στο μίγμα των καυσίμων αναφοράς που παράγει το τυποποιημένο ποσοστό knock, στο συγκεκριμένο λόγο συμπίεσης. Το τυποποιημένο ποσοστό knock αντιστοιχεί σε ένα τυποποιημένο ρυθμό αύξησης της πίεσης του κυλίνδρου.

Η αποφυγή του knock επίσης γίνεται και με πρόσθεση ουσιών στο καύσιμο, που θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια. Η αυτανάφλεξη στις μηχανές Diesel συζητήθηκε κατ' αρχήν στα πρώτα κεφάλαια, και είναι εν γένει πολυπλοκότερη από ότι στις μηχανές ομοιογενούς μίγματος. Αυτό συμβαίνει επειδή τώρα, η θερμοκρασία, η πίεση και ο σχετικός λόγος καυσίμου-αέρα εξαρτώνται από το χρόνο. Σύμφωνα με τις συζητήσεις των αρχικών κεφαλαίων 1.1 και 1.2, η καθυστέρηση έναυσης παίζει σημαντικό ρόλο. Συνηθίζεται να διασπάται αυτή η καθυστέρηση σε δύο μέρη: 1) *φυσική καθυστέρηση* - ο χρόνος που απαιτείται για το εγχυόμενο καύσιμο να εξατμισθεί και αναμιχθεί επαρκώς με τον αέρα ώστε να γίνει το μίγμα αναφλέξιμο και 2) *χημική καθυστέρηση* - ο χρόνος που απαιτείται για τα πρόσημα (η προπομπούς) καύσης (precursors) να σχηματισθούν στο εύφλεκτο μίγμα. Επομένως, απαιτείται επί μέρους

μελέτη των φαινομένων, δηλαδή της τύρβης-ανάμιξης και της χημείας-χημικής κινητικής.

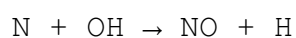
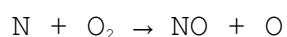
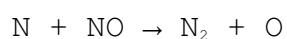
Τα χαρακτηριστικά knock διαφορετικών καυσίμων Diesel συγκρίνονται με τον αριθμό δεκαεξανίων (cetane number, CN). Ο αριθμός δεκαεξανίων μετρείται σε τυποποιημένη πειραματική μηχανή (CFR) με προθάλαμο, που χρησιμοποιεί μεταβλητό λόγο συμπίεσης, και εργάζεται κάτω από τυποποιημένες συνθήκες (Ferguson, 1986): $T_i=339K$, $T_{coolant}=373K$, $rpm=900$, χρονισμός έγχυσης: 13° BTDC. Ο λόγος συμπίεσης μεταβάλλεται, έως ότου η καθυστέρηση έναυσης είναι 13° για το καύσιμο (K) που μετρείται. Σε αυτό το λόγο συμπίεσης, καθορισμένα καύσιμα αναφοράς αναμιγνύονται έτσι ώστε να παράγουν μια καθυστέρηση έναυσης 13° . Τότε αριθμός δεκαεξανίων = (ποσοστό δεκαεξανίου, n-C₁₆H₃₄ με CN=100) + 0.15 (ποσοστό α-μεθυλικού ναφθαλενίου, C₁₁H₁₀ με CN=0).

9.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Οι εκπομπές ρύπων από τις εμβολοφόρες μηχανές είναι ένα από τα κρίσιμότερα θέματα προς διερεύνηση τα τελευταία χρόνια (Obert (1973), Ferguson (1986), Springer and Patterson (1973), Taylor (1977), Ρακόπουλος και Χουντάλας (2000)).

ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO_x)

Το NO_x περιλαμβάνει τα συστατικά NO (ως επί το πλείστον) και N₂O. Οι κατωτέρω αντιδράσεις αποτελούν τον κυριότερο μηχανισμό παραγωγής μονοξειδίου NO.



Ο σχηματισμός NO_x εξαρτάται δραστικά από τη θερμοκρασία. Το χημικό αυτό σύστημα επιλύεται είτε μέσω χημικής κινητικής είτε μέσω υπόθεσης χημικού ισοζυγίου. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί εύκολα να συνδυασθεί με ένα μοντέλο προοδευτικής καύσης για την ανάλυση του πλήρους κύκλου μιας μηχανής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση βέβαια του NO είναι γνωστή η χημική κινητική και οι απαιτούμενες σταθερές και αυτό διευκολύνει την ρητή έκφραση των εξισώσεων. Υπάρχουν βέβαια άλλοι ρύποι των οποίων η χημική

κινητική και οι σταθερές δεν είναι απολύτως γνωστά.

Εν γένει πειραματικές μετρήσεις και υπολογισμοί έχουν δείξει ότι:

- η εξάρτηση της εκπομπής NO_x από τον χρονισμό του σπινθήρα και την πίεση εισαγωγής είναι έντονη για πτωχά μίγματα και ασθενής για πλούσια μίγματα.
- οι συγκεντρώσεις NO_x είναι μέγιστες για ελαφρώς πλούσια μίγματα, σχήμα 9.5a.
- αύξηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού ή η παρουσία επικαθίσεων επάνω στα τοιχώματα ελαττώνουν την απώλεια θερμότητας και συνεπώς αυξάνουν τα NO_x .
- αραίωση του μίγματος με υπόλοιπα καυσαέρια ή με υγρασία στον αέρα εισαγωγής ελαττώνει τα NO_x , π.χ EGR.
Οι τελευταίες παρατηρήσεις ισχύουν και για μηχανές Diesel. Επιπλέον μπορούμε να παρατηρήσουμε για τις μηχανές Diesel:
- τα οξειδία του αζώτου εξαρτώνται έντονα από τον χρονισμό έγχυσης.
- οι μηχανές με άμεση έγχυση διπλάσια NO_x από τις μηχανές με έμμεση έγχυση.
- σε όλες τις περιπτώσεις η ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR), σχήμα 9.5β, μειώνει αποτελεσματικά τα NO_x

ΕΚΠΟΜΠΗ CO

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σύστημα C-O-H είναι σε χημική ισορροπία κατά την καύση και την εκτόνωση, και συνεπώς ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων CO είναι δυνατός με την επίλυση του συστήματος, σύμφωνα με τους νόμους της θερμοχημείας, συμπεριλαμβανομένων και των δευτερευουσών διασπάσεων (ίδε και κεφάλαιο 3). Το πρόβλημα εκπομπής CO συναντάται κυρίως σε μηχανές που εργάζονται με πλούσιο μίγμα, εφ' όσον υπάρχει ανεπαρκής αέρας για τη μετατροπή του C στο καύσιμο σε CO_2 . Στις μηχανές με πτωχό μίγμα, το CO προκύπτει από την αλληλεπίδραση και ψύξη της φλόγας με τα τοιχώματα (quenching), με το στρώμα λαδιού και τις επικαθίσεις, αλλά σ' αυτή την περίπτωση οι συγκεντρώσεις CO είναι αρκετά μικρές, ώστε να μη δημιουργούν πρακτικό πρόβλημα. Εν γένει, η πιο σπουδαία παράμετρος που επηρεάζει την εκπομπή CO είναι ο σχετικός λόγος καυσίμου-αέρα Φ ,

σχήμα 9.6. Για να ελαχιστοποιηθεί η εκπομπή CO, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που η μηχανή εργάζεται με πλούσιο μίγμα.

Οι ντιζελομηχανές εργάζονται εν γένει με πτωχό μίγμα και οι εκπομπές CO σε αυτές δεν αποτελεί κύριο πρόβλημα. Από πειραματικά στοιχεία πάντως φαίνεται ότι οι μηχανές με άμεση έγχυση εκπέμπουν περισσότερο CO από ότι οι μηχανές με έμμεση έγχυση.

ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΚΑΥΣΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ (UHC)

Ένα ποσοστό αυτών των υδρογονανθράκων UHC οφείλεται σε άκαυστο καύσιμο, και ένα άλλο ποσοστό οφείλεται σε νέους τύπους υδρογονανθράκων, που δημιουργήθηκαν από το αρχικό καύσιμο μέσω διασπάσεων και αντιδράσεων. Το αρχικό καύσιμο, αποτελείται συνήθως από πολλά κύρια συστατικά και πολλές μικρότερης σημασίας και ποσότητας ουσίες.

Τρεις είναι οι κύριοι μηχανισμοί που θεωρούνται υπεύθυνοι για τους άκαυστους υδρογονάνθρακες που εμφανίζονται στην εξάτμιση (Ferguson, 1986):

1) Κακή ποιότητα καύσης, όπου π.χ σε κάποιον από τους κυλίνδρους είτε δε γίνεται καύση καθόλου, είτε γίνεται ελλιπής καύση. Η κακή ποιότητα καύσης μπορεί να οφείλεται σε ηλεκτρικό πρόβλημα ή σε πολύ χαμηλό Φ . 2) Αποθήκευση και απελευθέρωση καυσίμου από εσοχές (π.χ σχισμή εμβόλου) ή στρώμα λαδιού επάνω στο τοίχωμα, (σχήμα 9.7). Η αποθήκευση δεν επιτρέπει την κατανάλωση αυτού του ποσοστού του καυσίμου κατά το χρόνο της καύσης, και κατόπιν κατά το χρόνο της συμπίεσης τα λαδιά π.χ. απορρίπτουν τους υδρογονάνθρακες οι οποίοι διαφεύγουν από την εξαγωγή. 3) Ψύξη της φλόγας (quenching) στα τοιχώματα του κυλίνδρου και στη σχισμή μεταξύ του τοιχώματος του εμβόλου και του πρώτου ελατηρίου. Στο σχήμα 9.8 δείχνεται μια τυπική σύνθεση καυσαερίων στην εξαγωγή.

Οι UHC από μηχανές Diesel προέρχονται από καύσιμο που παγιδεύεται στον εγχυτήρα στο τέλος της έγχυσης και κατόπιν διαχέεται έξω, από σταγονίδια καυσίμου που λόγω υπερβολικής ανάμιξης με τον αέρα δεν ανεφλέγησαν και από καύσιμο που παγιδεύτηκε σε σχισμές, επικαθήσεις ή στο στρώμα λαδιού όπως και

προηγούμενως.

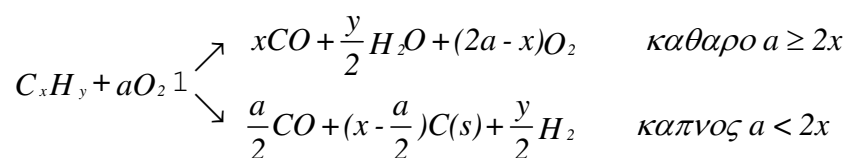
Ένας τρόπος μερικής αντιμετώπισης του προβλήματος εκπομπής UHC είναι μέσω της ανακυκλοφορίας καυσαερίων, EGR. Ουσιαστικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος, στην πηγή του βέβαια, είναι η διερεύνηση των φαινομένων της καύσης και ο ανάλογος σχεδιασμός του κυλίνδρου.

ΕΚΠΟΜΠΗ ΚΑΠΝΟΥ (ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ - SOOT)

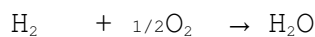
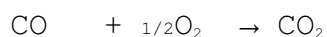
Η εκπομπή καπνού είναι πρόβλημα κυρίως με τις μηχανές Diesel, οι οποίες περιορίζονται από το όριο καπνού (smoke limit), δηλαδή το ποσό του καυσίμου που μπορεί να καεί ανά μονάδα μάζας αέρα, προτού αρχίζουν να εκπέμπονται σημαντικές ποσότητες καπνού. Τα σωματίδια (άνθρακα κυρίως άλλα και μερικών οργανικών υδρογονανθράκων) που αποτελούν τον καπνό είναι ανεπιθύμητα για λόγους ρύπανσης, αλλά και γιατί μολύνουν το λαδί της μηχανής και ακτινοβολούν θερμότητα προς το τοίχωμα κατά το χρόνο της καύσης και της εκτόνωσης, επιπλέον δε απορροφούν τοξικές ουσίες επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία.

Ο καπνός σχηματίζεται λόγω της διφασικής η πλούσιας καύσης. Ας θεωρήσουμε το κατωτέρω μοντέλο καύσης ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα, (Ferguson, 1986):

Πρώτο στάδιο:



Δεύτερο στάδιο:



Στο μοντέλο αυτό η καύση γίνεται σε δύο στάδια. Όταν υπάρχει αρκετό οξυγόνο, δηλαδή $a \geq 2x$, τότε η φλόγα είναι καθαρή χωρίς άνθρακα C(s) και κατά το δεύτερο στάδιο πληρούται η καύση. Όταν όμως στο πρώτο στάδιο δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για τη μετατροπή του άνθρακα του καυσίμου σε διοξείδιο, δηλαδή $a < 2x$, τότε σχηματίζεται C(s). Αυτό συμβαίνει και εντός του εγχυόμενου νέφους σταγονιδίων (spray), επειδή παρέρχεται κάποιος χρόνος για

την ανάμιξη του καυσίμου spray με τον αέρα. Η ανάμιξη είναι μια συνεχής διεργασία εντός του κυλίνδρου. Εάν εγχυθεί πολύ καύσιμο, ακόμη και εάν το συνολικό μίγμα είναι πτωχό (συνολικό Φ μικρό), θα σχηματισθούν μεμονωμένες περιοχές πλουσίου μίγματος και σ' αυτές η καύση θα προχωρήσει σύμφωνα με το πρώτο στάδιο. Αν δεν προλάβει να συμπληρωθεί το δεύτερο στάδιο σ' αυτές τις περιοχές, τότε κατά την εκτόνωση του εμβόλου ελλατώνεται η θερμοκρασία και εμποδίζεται η συμπλήρωση του δεύτερου σταδίου.

Οι μηχανές SI δεν έχουν πρόβλημα καπνού, ακόμη και όταν εργάζονται με πλούσιο μίγμα, επειδή το καύσιμο και ο αέρας είναι προαναμιγμένα.

Λόγω του προβλήματος του καπνού οι φυσικής αναπνοής μηχανές Diesel έχουν αναγκαστικά μικρότερη μέγιστη b_{max} από ότι οι αντίστοιχες μηχανές SI. Αυτός είναι ο λόγος που οι ντιζελομηχανές έχουν μικρότερη ισχύ από βενζινομηχανές του ίδιου μεγέθους και όγκου εκτόπισης. Αυτό το μειονέκτημα των Diesel μπορεί να ξεπερασθεί μέσω της στροβιλοπλήρωσης. Οι Diesel βέβαια μπορούν να εργασθούν με μεγαλύτερες υπέρπιέσεις (boost) από τις μηχανές SI.

9.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΡΥΠΩΝ

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι, μέσω των οποίων μπορούν να ελεγχθούν οι εκπομπές ρύπων των κινητήρων MEK (Ρακόπουλος και Χουντάλας (2000)): μέσω κατάλληλου σχεδιασμού της διαδικασίας της καύσης, μέσω βελτιστοποίησης της επιλογής των παραμέτρων λειτουργίας και μέσω κατάλληλης μετατροπής των καυσαερίων. Ότι μέτρα ληφθούν βεβαίως, πρέπει ταυτόχρονα να μεγιστοποιούν και την οικονομία καυσίμου. Οι δύο πρώτοι τρόποι μπορούν να επιδιωχθούν μέσω των αναλύσεων των προηγούμενων κεφαλαίων. Επιπλέον οι κινητήρες που λειτουργούν με διαστρωματωμένο μίγμα (όπου δηλαδή επιτυγχάνονται έντονες μεταβολές του Φ από θέση σε θέση εντός του κυλίνδρου, π.χ. FSI), είναι ένας ακόμη τρόπος, στο στάδιο της έρευνας και της εξέλιξης, που μπορεί να προσφέρει σ' αυτό το σημείο.

Σήμερα, ο πιο σημαντικός τρόπος μετατροπής των καυσαερίων είναι ο τριοδικός καταλύτης, σχήμα 9.9α. Το όνομα του προέρχεται

από το γεγονός ότι επιδρά και επί των τριών προαναφερθέντων ρύπων, οξειδία του αζώτου, μονοξείδιο του άνθρακα και άκαυστους υδρογονάνθρακες. Όλοι οι καταλυτικοί μετατροπείς κατασκευάζονται έτσι, ώστε να εκθέτουν τα καυσαέρια σε μια μεγάλη επιφάνεια από ευγενή μέταλλα. Στο σχήμα 9.9α δείχνεται ένας τυπικός καταλύτης κατασκευασμένος από φύλλα ευγενών μετάλλων διατεταγμένα σε επιμηκές πλέγμα (honeycomb). Ο τριοδικός καταλύτης λειτουργεί σωστά μόνο εάν η σύνθεση των καυσαερίων αντιστοιχεί σε σχεδόν στοιχειομετρική καύση. Εάν τα καυσαέρια είναι πτωχά ($\Phi \ll 1$) τα NO_x δεν καταστρέφονται, και εάν είναι πολύ πλούσια ($\Phi \gg 1$) τα CO και UHC δεν καταστρέφονται, όπως δείχνεται στο σχήμα 9.9β. Έτσι η μηχανή πρέπει να εργάζεται σε ένα στενό φάσμα λόγων καυσίμου-αέρα. Αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα για τις μηχανές SI, αλλά επειδή οι μηχανές Diesel εργάζονται με πτωχό μίγμα δεν μπορούν εν γένει, να χρησιμοποιήσουν καταλύτες. Η ανάλυση των κύκλων καυσίμου-αέρα έδειξε ότι η λειτουργία με πτωχό καύσιμο ήταν θετική για τη θερμική απόδοση της μηχανής. Αυτό όμως δεν αποτελεί περιορισμό, διότι εφ' όσον ο αέρας περισσεύει στην πτωχή καύση δρά απλώς ως αραιωτικό, ως τέτοιο μπορεί να χρησιμοποιηθούν και ανακυκλοφορούντα καυσαέρια, EGR. Εν γένει, όταν στις μηχανές SI απαιτείται μέγιστη $\eta_{\text{μερ}}$ και απαιτείται να εργάζονται με ελαφρώς πλούσιο μίγμα, τα μη ανεκτά επιπλέον CO και UHC μπορεί να αντιμετωπιστούν με αραιώση των καυσαερίων δια παροχής δευτερευόντος αέρος πριν την είσοδο τους στον καταλύτη. Η εκπομπή NO_x για ελαφρώς πλούσια μίγματα όπως φαίνεται και στο σχήμα 9.9b δε μεταβάλλεται τόσο δραματικά όσο η εκπομπή των CO και UHC. Στις μηχανές Diesel καταλυτική μετατροπή των NO_x δεν είναι δυνατή, λόγω λειτουργίας με πτωχό μίγμα. Έτσι, εδώ χρειάζεται προσεκτικός σχεδιασμός της διαδικασίας της καύσης, και καλή επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας της μηχανής. Προσπάθειες και πειράματα πάντως έχουν δείξει ότι ελάττωση των NO_x σημαίνει συνήθως αύξηση του καπνού.

9.6 ΚΑΥΣΙΜΑ

Οι προηγούμενοι υπολογισμοί και τα παραδείγματα βασίστηκαν σε καύσιμα που αποτελούνται από ένα χημικό στοιχείο. Μια τυπική βενζίνη (gasoline), ή καύσιμο Diesel μπορεί να αποτελούνται π.χ.

από 100 υδρογονάνθρακες και από αλλά 100 έως 200 ίχνη ουσιών.

Το αργό πετρέλαιο (crude oil) προέρχεται από τέσσερις σημαντικές πηγές: 1) ορυκτό πετρέλαιο (petroleum), 2) ρευστοποιημένος άνθρακας (coal liquefied), 3) σχιστολιθικό πετρέλαιο (shale oil) και 4) αμμόπισσες (tar sands). Σήμερα χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον η πρώτη πηγή, μια και το ορυκτό πετρέλαιο της φύσης απαιτεί μικρή επεξεργασία πριν την παράδοση του στο διυλιστήριο. Το ορυκτό υλικό των άλλων τριών πηγών απαιτεί επεξεργασία πριν τη διύλιση για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων ουσιών (N_2 , S, As, Hg, Ca, Ph, κλπ.), και για τον εμπλουτισμό του σε υδρογόνο (υδρογόνωση). Η εξόρυξη των δύο τελευταίων προαναφερθέντων ορυκτών είναι επίσης αρκετά δύσκολη. Από όπου κι' αν προέρχεται, το αργό πετρέλαιο περιέχει ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών υδρογονανθράκων και άλλων ουσιών, όπως αέρια, ιξώδη ρευστά ή κηρώδεις ουσίες. Στο διυλιστήριο το αργό πετρέλαιο, μέσω απόσταξης, διαχωρίζεται σε διάφορα κλάσματα τα οποία, κατόπιν χημικής επεξεργασίας, μετατρέπονται σε καύσιμα και αλλά προϊόντα. Η απόσταξη επιτυγχάνεται μέσω επιλεκτικού βρασμού, και τα διάφορα προϊόντα διαχωρίζονται ανάλογα με την πτητικότητα τους.

Ας δούμε τώρα τους κυριότερους υδρογονάνθρακες του πετρελαίου. Οι παραφίνες (paraffins-alkanes) είναι μόρια, όπου τα άτομα C είναι συνδεδεμένα με μονούς δεσμούς. Οι υπόλοιποι δεσμοί είναι με υδρογόνα. Λέγονται και κορεσμένοι υδρογονάνθρακες επειδή δεν έχουν διπλούς ή τριπλούς δεσμούς. Ο αριθμός των ατόμων άνθρακα καθορίζεται με ένα πρόθεμα: 1-meth, 2-eth, 3-prop, 4-but, 5-pent, 6-hex, 7-hept, 8-oct, 9-non, 10-dec, 11-undec, 12-dodec. Οι παραφίνες υδρογονάνθρακες επίσης ονομάζονται γενικώς alkanes και εδώ προσθέτουμε τη συλλαβή -ane π.χ. meth-ane. Ο γενικός χημικός τύπος είναι C_nH_{2n+2} . Παραδείγματα

H
|
 $H-C-H$
|
 H

παραφινών ευθείας αλυσίδας είναι το methane, CH_4 $H-C-H$ και το

HHHHHHHH

|||||||

octane C_8H_{18} **H-C-C-C-C-C-C-C-H**. Το ισοοκτάνιο είναι ένα

|||||||

HHHHHHHH

παράδειγμα ενός ισομερούς του οκτανίου, δηλαδή έχει τον ίδιο αριθμό ατόμων με το οκτάνιο αλλά όχι σε ευθεία αλυσίδα. Γι' αυτόν τον λόγο, το οκτάνιο λέγεται και normal-octane ή n-octane. Η δομή του ισοοκτανίου είναι: isooctane C_8H_{18} ή 2,2,4

CH₃ CH₃

| |

trimethylpentane **CH₃-C-CH₂-CH-CH₃**. Η ομάδα CH₃ λέγεται methyl

|

CH₃

ριζικό, meth- γιατί έχει ένα άτομο C και -yl γιατί ανήκει στην οικογένεια των ριζικών alkyl, C_nH_{2n+1} . Ο αριθμός οκτανίων μερικών καθαρών καυσίμων δίδεται στον πίνακα 9.1. Εν γένει, έχει ευρεθεί ότι ο αριθμός οκτανίων αυξάνεται με την ελάττωση του μήκους της ευθείας αλυσίδας ατόμων άνθρακα.

Οι ολεφίνες (olefines-alkenes) είναι μόρια με ένα ή περισσότερους διπλούς δεσμούς άνθρακα. Οι μονολεφίνες έχουν ένα διπλό δεσμό, το γενικό τύπο C_nH_{2n} και τα ονόματά τους τελειώνουν με -ene. Για παράδειγμα το 1-οκτένιο C_8H_{16} είναι

HHHHHH

|||||

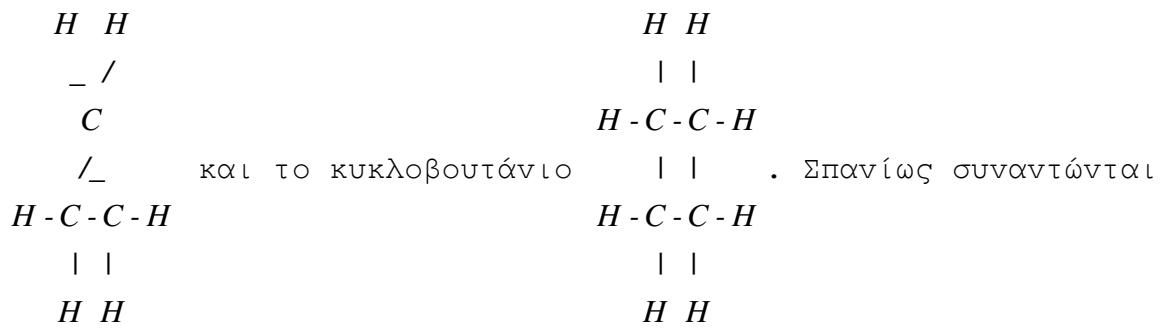
H-C=C-C-C-C-C-C-H. Εδώ, ισομερή επιτυγχάνονται είτε με

|||||||

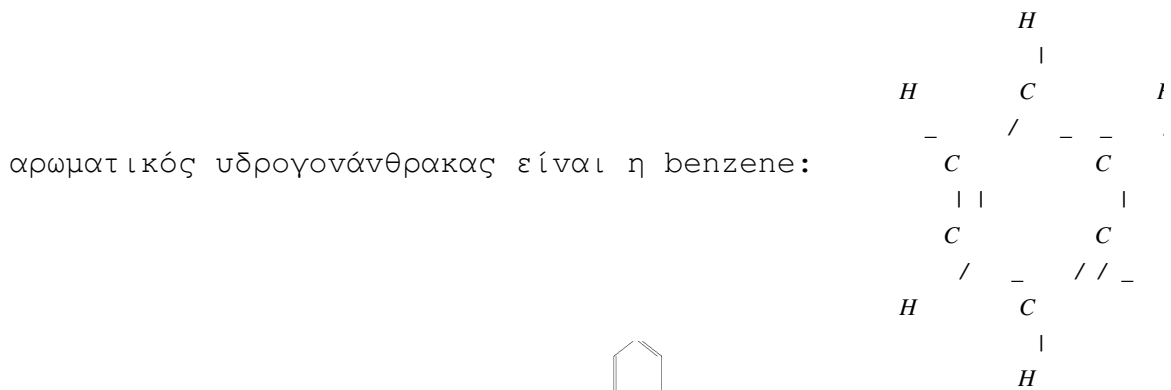
HHHHHHHH

πρόσθεση ενός ριζικού methyl είτε μετακινώντας τη θέση του διπλού δεσμού, χωρίς μεταβολή του κορμού των ατόμων άνθρακα. Ολεφίνες με παραπάνω από δύο διπλούς δεσμούς είναι ανεπιθύμητα συστατικά των καυσίμων λόγω προβλημάτων στην αποθήκευση. Κατά συνέπεια αποδιυλίζονται εξ' αρχής και δε συναντώνται στις βενζίνες ή στα καύσιμα Diesel.

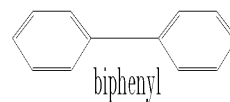
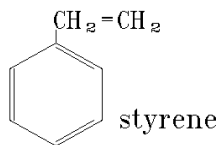
Οι ναφθένες (naphthenes-cycloalkanes) έχουν τον ίδιο γενικό τύπο όπως οι ολεφίνες C_nH_{2n} , αλλά δεν έχουν διπλούς δεσμούς. Ονομάζονται κυκλο- λόγω της δομής τους. Π.χ. το κυκλοπροπάνιο



δακτύλιοι με περισσότερα των έξη ατόμων C. Αρωματικοί υδρογονάνθρακες, γενικού χημικού τύπου C_nH_{2n-6} , είναι εκείνοι που έχουν διπλούς δεσμούς ατόμων C στους δακτυλίους. Ο πιο κοινός



με ισοδύναμη αναπαράσταση . Σε ορισμένους κοινούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες τα άτομα υδρογόνου αντικαθίστανται από ομάδες (CH_3 , CH_2 κλπ.)



ή από άλλους δακτυλίους. Υπάρχουν και αρωματικοί υδρογονάνθρακες με δύο άτομα C μοιραζόμενα μεταξύ περισσοτέρων του ενός δακτυλίων, π.χ. το C_nH_{2n-12} .

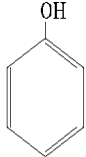


Επειδή υπάρχουν διπλοί δεσμοί, σε κάθε δεύτερο δεσμό,

μεταξύ των ατόμων C, τα μόρια των αρωματικών υδρογονανθράκων διασπώνται δύσκολα και γι' αυτό είναι επιθυμητοί στις βενζινομηχανές (gasoline engines), επειδή αυξάνουν τον αριθμό οκτανίων. Είναι ανεπιθύμητοι φυσικά στα καύσιμα

Οι αλκοόλες προέρχονται από τους υδρογονάνθρακες αντικαθιστώντας ένα άτομο υδρογόνου με ριζικό υδροξυλίου OH. Οι φαινόλες προέρχονται από αντικατάσταση ενός ατόμου υδρογόνου στο δακτύλιο ενός αρωματικού υδρογονάνθρακα, με ριζικό υδροξυλίου OH. Οι αιθέρες είναι ισομερή των αλκοολών με τον ίδιο αριθμό

ατόμων C. Μερικά παραδείγματα είναι:
$$\begin{array}{c} H \\ | \\ H-C-OH \\ | \\ H \end{array}$$
, methanol,

$$\begin{array}{c} H H \\ || \\ H-C-C-OH, \text{ ethanol,} \\ || \\ H H \end{array}$$
,  phenol,
$$\begin{array}{c} H H H \\ ||| \\ H-C-O-C-H, \text{ methylether.} \\ ||| \\ H H H \end{array}$$
 Οι

αλκοόλες, και ιδιαίτερα η μεθανόλη, έχουν αρκετό ενδιαφέρον, διότι είναι καύσιμο υψηλών οκτανίων και μπορούν να παραχθούν από εξαέριωση άνθρακα (gasification).

Όπως προαναφέρθηκε τα κλάσματα της απόσταξης του αργού πετρελαίου μέσω χημικής επεξεργασίας μετατρέπονται σε άλλα ή αναβαθμίζονται. Μερικές χημικές επεξεργασίες είναι:

-Η αλκυλίωση (alkylation) χρησιμοποιείται για την αύξηση του αριθμού οκτανίων της βενζίνης (gasoline) μέσω πρόσθεσης ριζικών αλκυλίων, π.χ. πρόσθεση CH₃ στο βασικό μόριο. Για τον ίδιο σκοπό ελαφρές αέριες ολεφίνες π.χ. αντιδρούν isobutane παρουσία καταλύτη. Το ισοοκτανίο προκύπτει από αντίδραση butene και isobutane και η διαδικασία είναι αρκετά οικονομική, λόγω χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης (275 K και 3atm).

-Η καταλυτική διάσπαση (catalytic cracking) διασπά τα μόρια, και συντελεί στη μετατροπή αποσταγμάτων σε ναφθές (naphthas), για χρήση στη βενζίνη. Τα παράγωγα νάφθας εκ της καταλυτικής διάσπασης είναι βενζίνες υψηλών οκτανίων. Η διαδικασία όμως

είναι αρκετά ακριβή λόγω υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης (700–800K και 2–8atm).

Ενώ τα καύσιμα των βενζινομηχανών δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις από ένα μέσο, τα καύσιμα Diesel έχουν πολύ μεγαλύτερες μεταβολές, ανάλογα με το χρόνο, τη γεωγραφική θέση και τη χρήση. Ένας τρόπος κατάταξης των καυσίμων Diesel είναι ανάλογα με τη χρήση τους π.χ. τύπος C-B (λεωφορεία πόλης), T-T (tractors, φορτηγά), R-R (μηχανές σιδηροδρόμων), S-M (στάσιμες και ναυτικές μηχανές). Δύο αριθμοί που συνήθως χρησιμοποιούνται εδώ είναι: το ειδικό βάρος -API, που είναι ένα μέτρο της πυκνότητας του καυσίμου και δίδεται από τον τύπο: ειδικό βάρος ή

$$API = \frac{141.5}{(\text{ειδικό βάρος})} - 131.52 \text{ και ο δείκτης δεκαεξανίων -CI, που είναι}$$

μια προσέγγιση του αριθμού δεκαεξανίων και δίδεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$Cetane Index = -420.34 + 0.016 G^2 + 0.192 G \log M + 65.01 (\log M)^2 - 0.0001809 M^2$$

όπου: G=API και M=θερμοκρασία μέσου βρασμού (°F).

Για τις βενζίνες (gasolines) ένας μεγάλος αριθμός ουσιών έχει ελεγχθεί ως αντικρουστικά προσθετικά που αυξάνουν τον αριθμό οκτανίων. Άλλα προσθετικά χρησιμοποιούνται για λίπανση, αντιψυκτικά ή αντισκωριακά, για καταπολέμηση των επικαθήσεων, και για το χρωματισμό της βενζίνης. Το πιο σύνηθες αντικρουστικό προσθετικό είναι ο τετραεθυλικός μόλυβδος $(C_2H_5)_4Pb$, που σημειώνεται ως TEL, και μικρή ποσότητα του στο καύσιμο παράγει δραστικά αποτελέσματα, π.χ. για ίδια αύξηση του ON πρέπει να χρησιμοποιήσουμε 332 φορές περισσότερο, κατά βάρος, βενζόλιο C_6H_6 από ότι TEL. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι για καύσιμα που ο ON είναι μεγαλύτερος του 100 τότε αυτός καθορίζεται δια συγκρίσεως με μίγμα ισοοκτανίου και TEL από τη σχέση:

$$ON = 100 + \frac{28.28 \cdot T}{1 + 0.736 \cdot T + \sqrt{1 + 1.472 \cdot T - 0.035 \cdot T^2}} \text{ όπου } T = \frac{mlTEL}{gal}$$

Γενικώς τα κύρια χαρακτηριστικά των βενζινών (μηχανές SI) που ενδιαφέρουν άμεσα στη λειτουργία των μηχανών είναι: πτητικότητα (η τάση ενός υγρού να εξατμίζεται), χαρακτηριστικά κρουστικής καύσης (ON), θερμογόνος δύναμη, θερμότητα εξάτμισης

και χημική ευστάθεια. Για τις μηχανές CI τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά είναι: θερμοκρασία ανάφλεξης, πυκνότητα, θερμογόνος δύναμη, πτητικότητα, άκαπνη καύση και ελάχιστη διάβρωση (λόγω παρουσίας S).

9.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Ο όρος εναλλακτικά βέβαια, μπορεί να αναφέρεται και σε υδρογονάνθρακες, προερχόμενους από πηγές εκτός του ορυκτού πετρελαίου. Εδώ όμως θα θεωρήσουμε ως τέτοια καύσιμα τα διαφορετικά από τους υγρούς υδρογονάνθρακες, π.χ. υδρογόνο, μεθάνιο ή φυσικό αέριο, προπάνιο και αλκοόλες. Εφικτά καύσιμα, άλλα με μικρή εμβέλεια για τις ΜΕΚ, είναι και η αμμωνία, η ασετυλίνη, η υδραζίνη και τα slurries (κονιορτοποιημένος άνθρακας αναμιγμένος με νερό, αλκοόλ ή υγρό υδρογονάνθρακα). Σύνθετες ουσίες, από Boron π.χ, χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, και οι νιτροπαραφίνες χρησιμοποιούνται σε μηχανές αυτοκινήτων ταχύτητας.

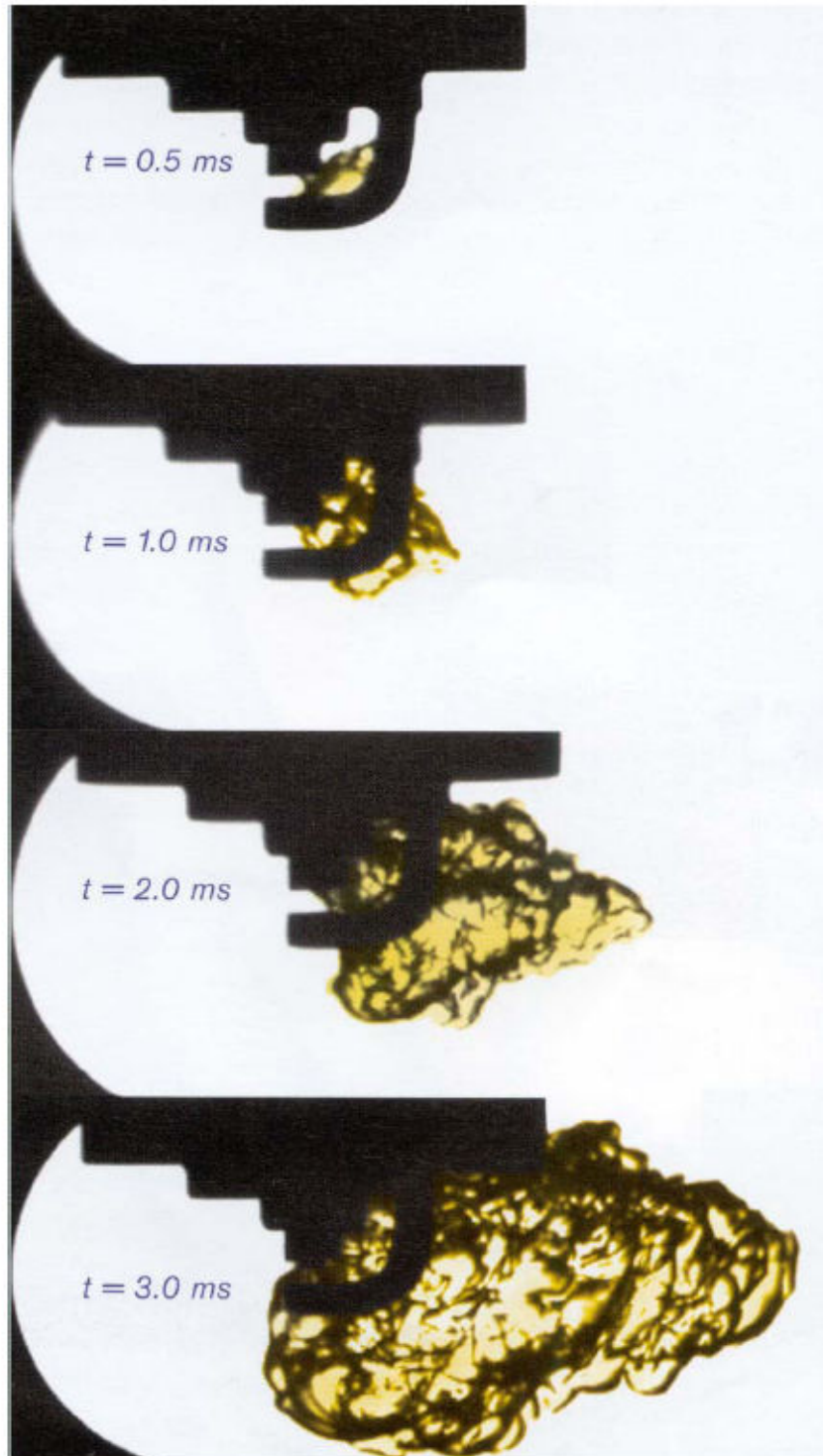
Ένα σοβαρό τεχνικό πρόβλημα με τα εναλλακτικά καύσιμα είναι η αποθήκευση και η διανομή. Το υδρογόνο, μεθάνιο, προπάνιο και η αλκοόλη είναι κατάλληλα κυρίως για μηχανές SI, και, με εξαίρεση το υδρογόνο, όλα έχουν κάποια εφαρμογή σε μηχανές σήμερα. Το υδρογόνο είναι κυρίως μελλοντικού ενδιαφέροντος, διότι μπορεί να παραχθεί από την ηλιακή ενέργεια, και καιγόμενο δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα. Στη Βραζιλία π.χ. χρησιμοποιείται αιθανόλη (ethanol), που παράγεται εύκολα από την παραγωγή ζαχαροκάλαμου αυτής της χώρας. Στις ΗΠΑ όμως μελέτες έδειξαν ότι η παραγωγή αιθανόλης απαιτεί περισσότερη ενέργεια από την ενέργεια της παραγόμενης αιθανόλης. Ένα άλλο καύσιμο ενδιαφέροντος είναι η μεθανόλη, η οποία παράγεται και από τον ορυκτό άνθρακα, και έχει υψηλό αριθμό οκτανίων, εξυπηρετώντας την κατασκευή μηχανής υψηλού λόγου συμπίεσης.

Πίνακας 9.1 Χαρακτηριστικά τάσης για
κρουστική καύση διαφόρων καυσίμων

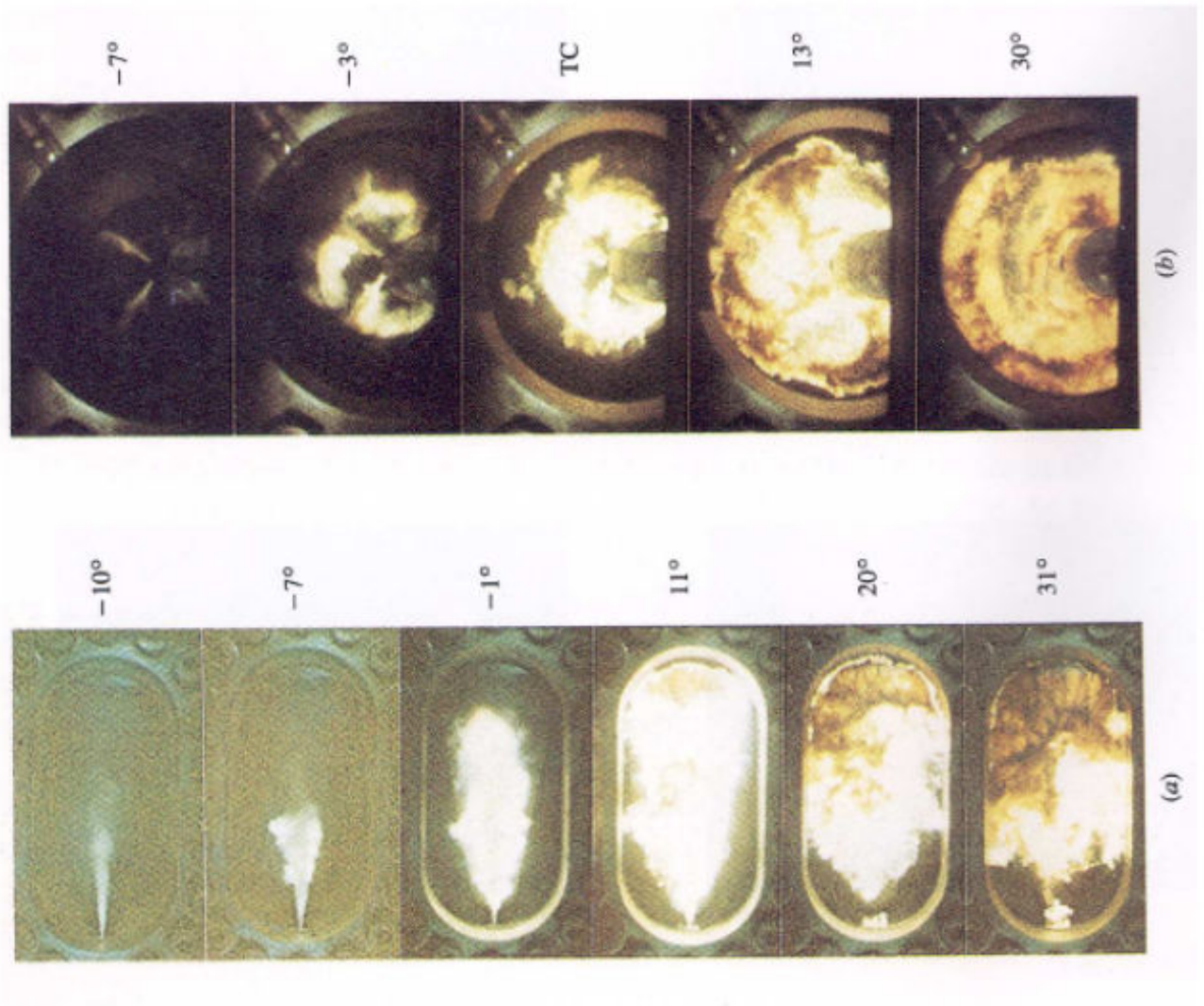
Formula	Name	Critical r	RON	MON
CH ₄	Methane	12.6	120	120
C ₃ H ₈	Propane	12.2	112	97
CH ₄ O	Methanol	-	106	92
C ₂ H ₆ O	Ethanol	-	107	89
C ₈ H ₁₈	Isooctane	7.3	100	100
Blend of HCs	Regular gasoline		91	83
n-C ₇ H ₁₆	n-heptane		0	0

Πίνακας 9.2 ιδιότητες καυσίμων

Substance	Density [kg/l]	Main Constituents [% by mass]	Boiling Points [°C]	Latent Heat of Vaporization [kJ/kg]	Specific Calorific Value [MJ/kg]	Ignition Temperature [°C]	Theoretical Air/Fuel Ratio [kg/kg]	Ignition Limits [% by volume of gas in air]
Regular Gasoline	0.715 to 0.765	86 C 14 H	25 to 215	380 to 500	42.7	300	14.8	0.6 to 8.0
Premium Gasoline	0.730 to 0.780	86 C 14 H	25 to 215	-	43.5	400	14.7	-
Aviation Gasoline	0.720	85 C 15 H	40 to 180	-	43.5	500	-	0.7 to 8.0
Kerosene	0.770 to 0.830	87 C 13 H	170 to 260	-	43.0	250	14.5	0.6 to 7.5
Diesel Fuel	0.815 to 0.855	86 C 13 H	180 to 360	250	42.5	250	14.5	0.6 to 7.5
Crude Oil	0.700 to 1.000	80 to 83 C 10 to 14 H	25 to 360	222 to 352	39.8 to 46.1	220	-	0.6 to 6.5
Lignite Tar Oil	0.850 to 0.900	84 C 11 H	200 to 360	-	40.2 to 41.9	-	13.5	-
Bituminous Coal Oil	1.000 to 1.100	89 C 7 H	170 to 330	-	36.4 to 38.5	-	-	-
Pentane [C ₅ H ₁₂]	0.63	83 C 17 H	36	352	45.4	285	15.4	1.4 to 7.8
Hexane [C ₆ H ₁₄]	0.66	84 C 16 H	69	331	44.7	240	15.2	1.2 to 7.4
n-Heptane [C ₇ H ₁₆]	0.68	84 C 16 H	98	310	44.4	220	15.2	1.1 to 6.7
Isooctane [C ₈ H ₁₈]	0.69	84 C 16 H	99	297	44.6	410	15.2	1.0 to 6.0
Benzene [C ₆ H ₆]	0.88	92 C 8 H	80	394	40.2	550	13.3	1.2 to 8.0
Toluene [C ₇ H ₈]	0.87	91 C 9 H	110	364	40.6	530	13.4	1.2 to 7.0
Xylene [C ₈ H ₁₀]	0.88	91 C 9 H	144	339	40.6	460	13.7	1.0 to 7.6
Ether [(C ₂ H ₅) ₂ O]	0.72	64 C 14 H 22 O	35	377	34.3	170	7.7	1.7 to 36.0
Acetone (CH ₃) ₂ CO	0.79	62 C 14 H 22 O	56	523	28.5	540	9.4	2.5 to 13.0
Ethanol [C ₂ H ₅ OH]	0.79	52 C 13 H 35 O	78	904	26.8	420	9.0	3.5 to 15.0
Methanol [CH ₃ OH]	0.79	38 C 12 H 50 O	65	1110	19.7	450	6.4	5.5 to 26.0

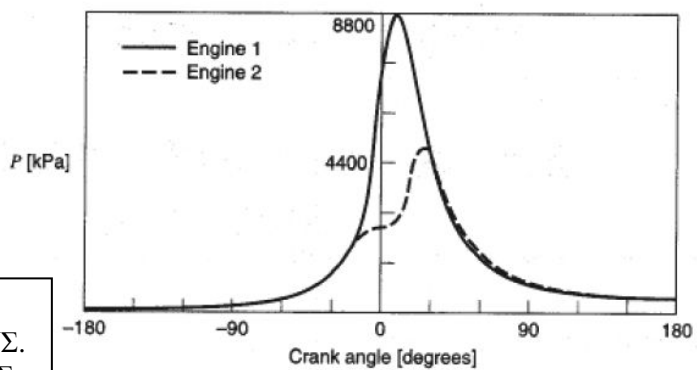
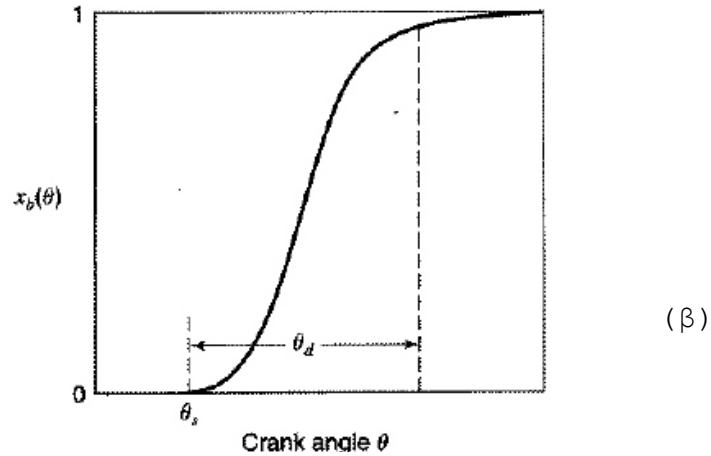
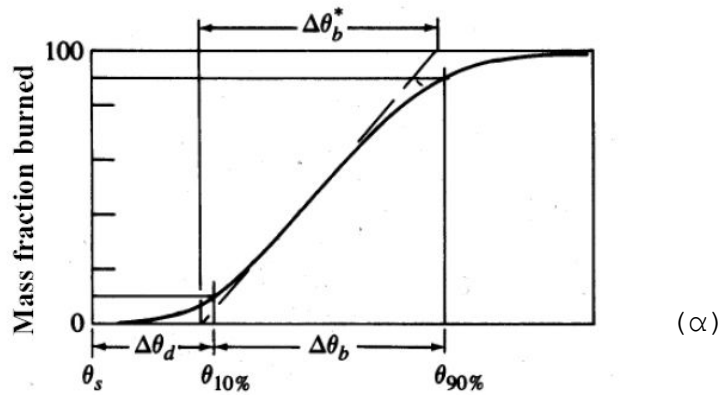


Σχήμα 9.1 Φωτογραφική μελέτη της αρχικής διάδοσης της φλόγας σε μηχανή SI

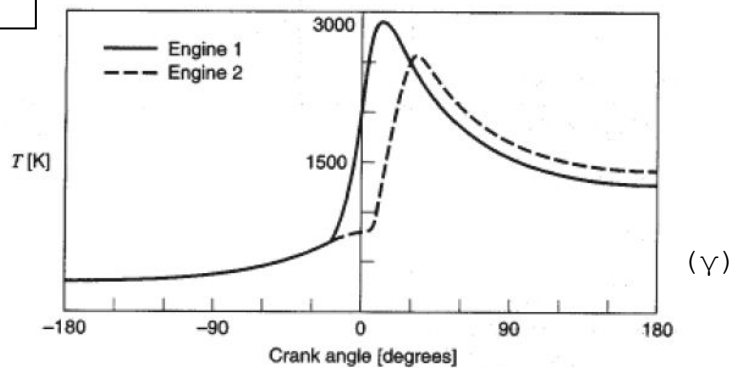


Conditions: $T=1000\text{K}$, $p=100\text{ bar}$

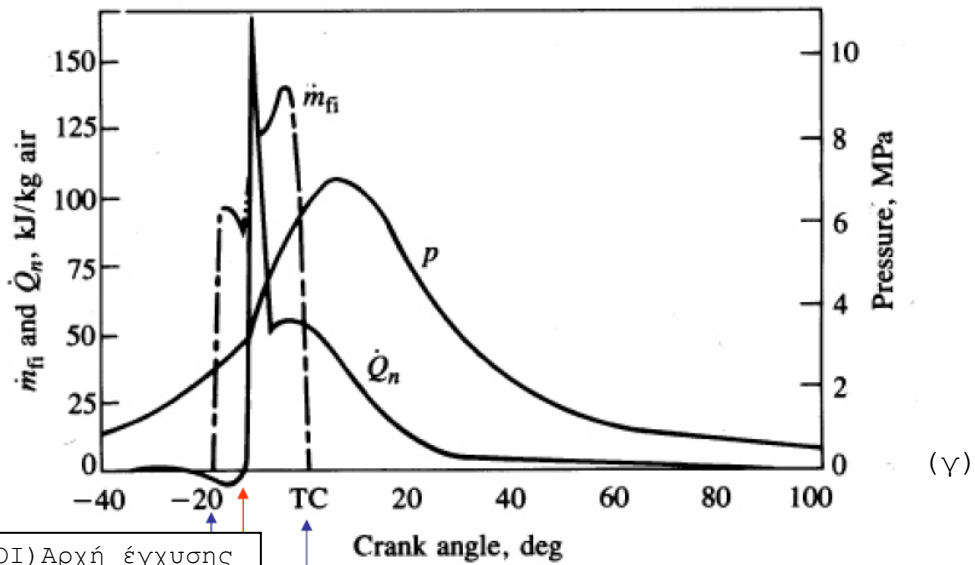
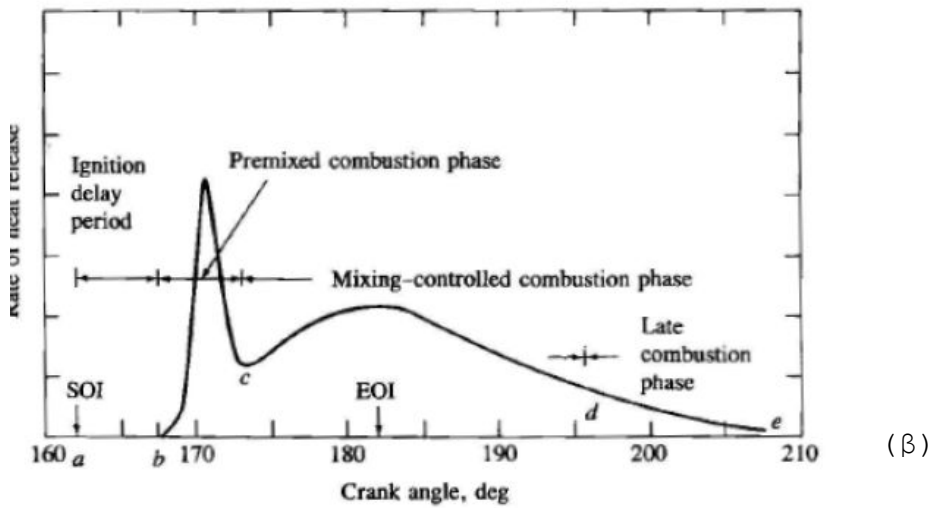
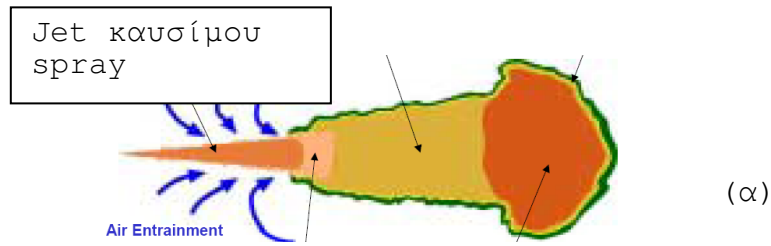
Σχήμα 9.2 Φωτογραφική μελέτη του φαινομένου του spray και της διάδοσης της φλόγας σε μηχανές Diesel, University of Wisconsin, Engine research center



Χρονισμός Σπινθήρα,
 Κινητήρας 1 σε 20° από ΑΝΣ.
 Κινητήρας 2 σε 0° από ΑΝΣ.
 Διαρκεια καύσης 40°

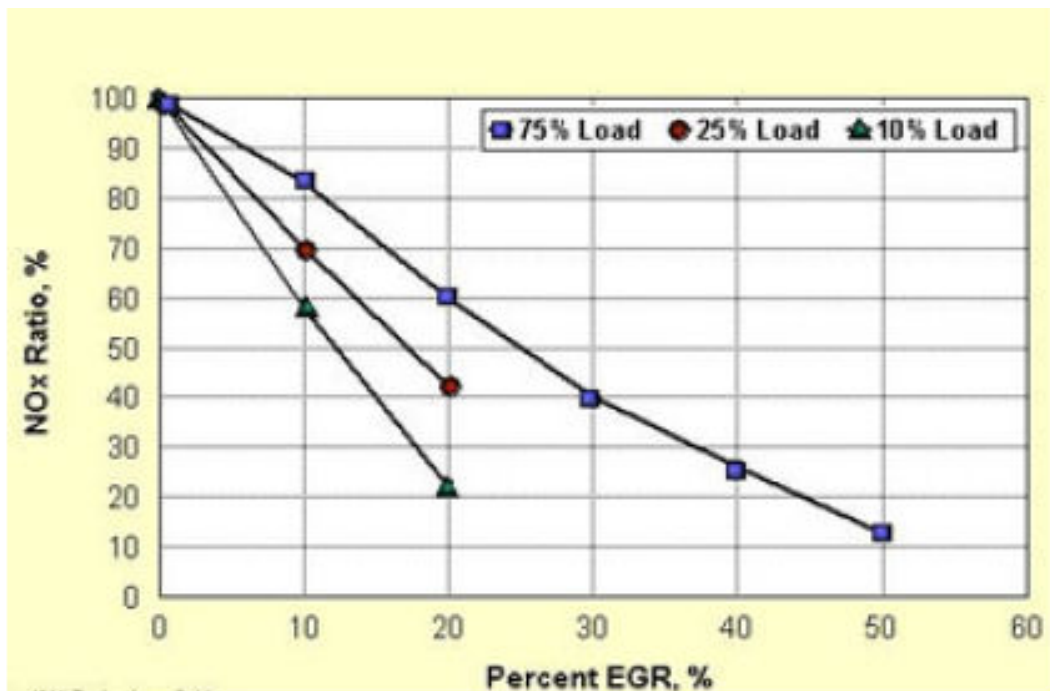
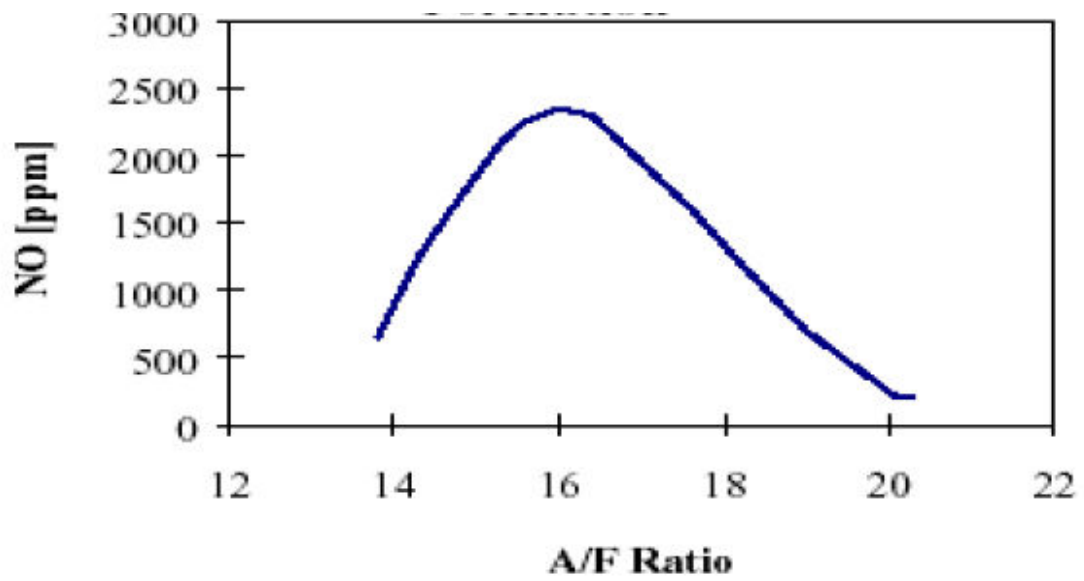


Σχήμα 9.3 α) Καμπύλη ανάπτυξης της φλόγας σε μηχανή SI β) Τυπική καμπύλη ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας και γ) Διαγράμματα $P=P(\theta)$ με χρήση του μοντέλου πεπερασμένου ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας

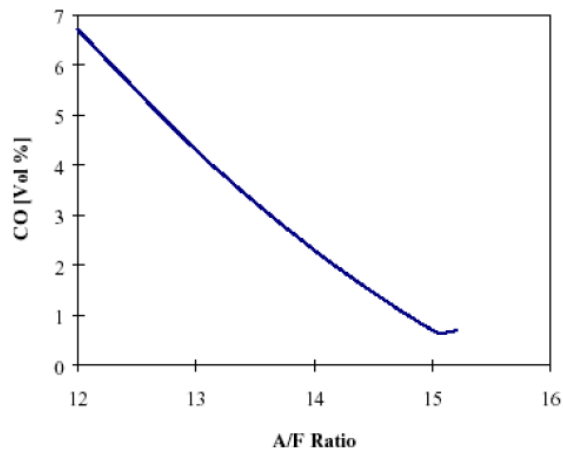


(SOI) Αρχή έγχυσης
(SOC) Αρχή καύσης
(EOI) Τέλος έγχυσης

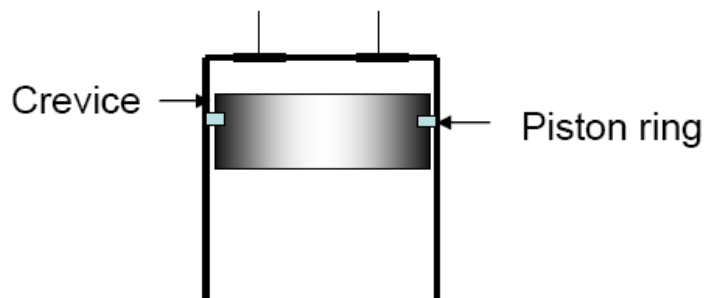
Σχήμα 9.4 α) Δομή φλογας spray σε μηχανή Diesel, β) Διάγραμμα απελευθέρωσης θερμότητας σε μηχανή Diesel, γ) Διάγραμμα απελευθέρωσης θερμότητας, ρυθμού έγχυσης και αύξησης της πίεσης σε μηχανή Diesel, University of Wisconsin, Engine Research Center



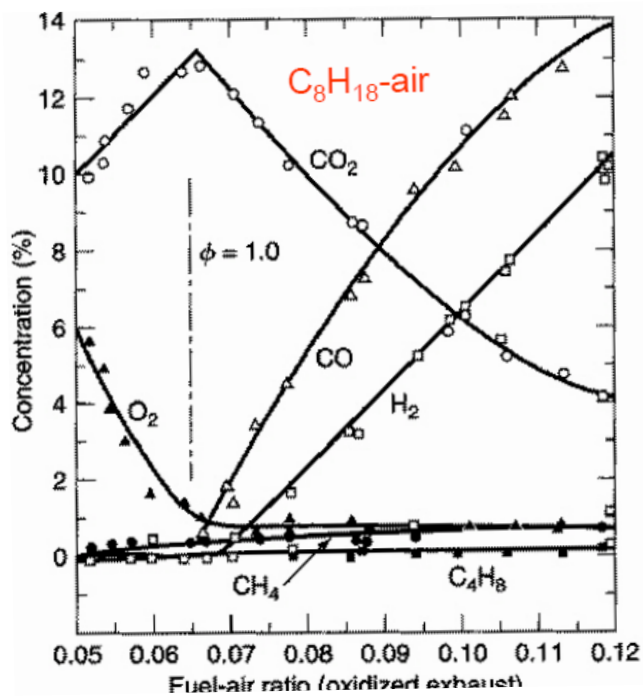
Σχήμα 9.5 α) Επίδραση του λόγου καυσίμου-αέρα, (FAR) στα NOx
 β) επίδραση της ανακυκλοφορίας καυσαερίων, EGR, στα NOx



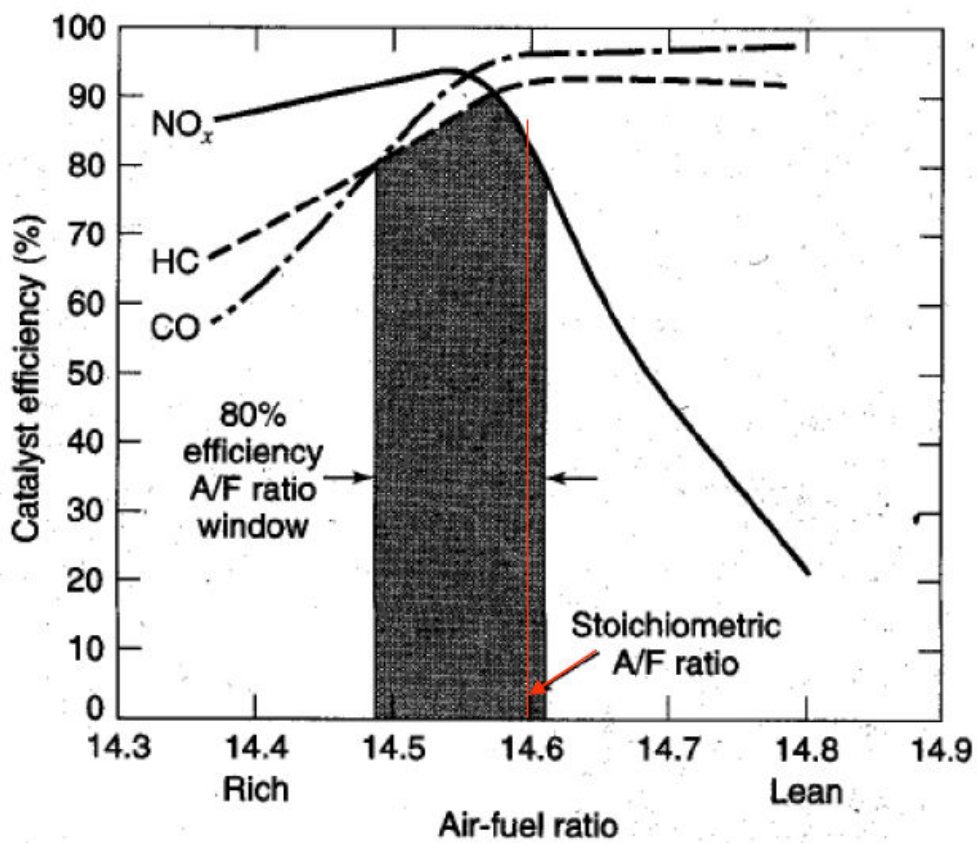
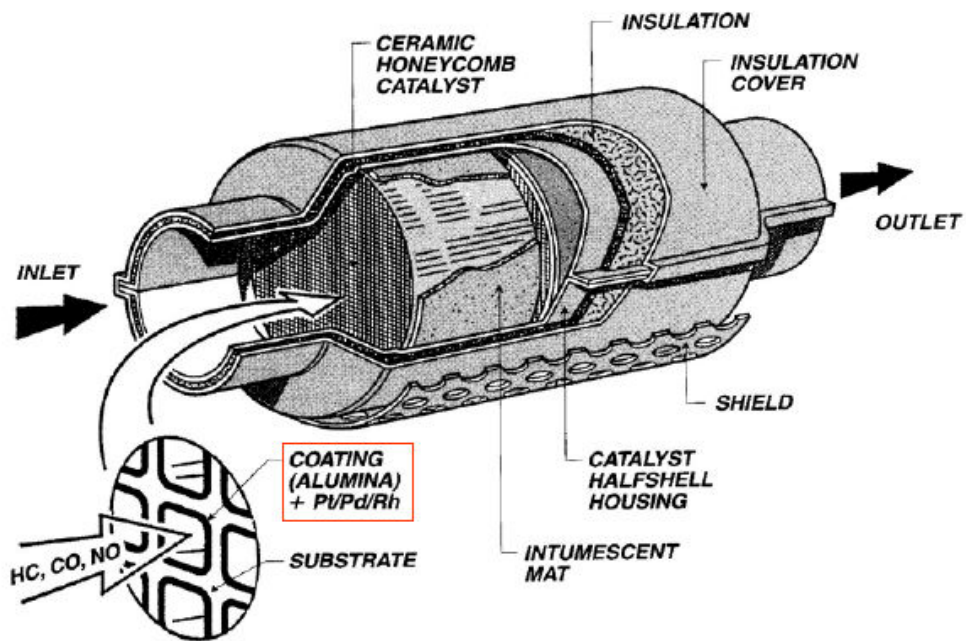
Σχήμα 9.6 Επίδραση του λόγου καυσίμου-αέρα στην εκπομπή CO



Σχήμα 9.7 Εκπομπές ρύπων λόγω επικαθήσεων λαδιού και μίγματος στις εσοχές της μηχανής



Σχήμα 9.8 Τυπική σύνθεση καυσαερίων στη εξατμίση, C₈H₁₈



Σχήμα 9.9 α) Τομή τριοδικού καταλύτη, β) Απόδοση καταλύτη συναρτήσει του λόγου καυσίμου-αέρα