

## Ενότητα 9

# Σχηματισμός ρύπων στο καυσαέριο των ΜΕΚ Τεχνολογίες Αντιρρύπανσης ΜΕΚ

### 9.1. ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι βενζινοκινητήρες και οι κινητήρες Diesel είναι πηγές ρύπων που προξενούν ατμοσφαιρική ρύπανση στις αστικές περιοχές. Τα καυσαέρια του βενζινοκινητήρα περιέχουν, εκτός από διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμό τις παρακάτω κατηγορίες βλαβερών για τον άνθρωπο και το περιβάλλον ουσιών :

- + Μονοξείδιο του αζώτου μαζί με μικρές ποσότητες διοξειδίου του αζώτου. Τα δύο αυτά συμβολίζονται ως NO<sub>x</sub>.
- + Μονοξείδιο του άνθρακα και
- + Οργανικές ενώσεις που αποτελούνται κυρίως από άκαυστους ή μερικά οξειδωμένους υδρογονάνθρακες.

Ενδεικτικές ποσότητες εκπεμπόμενων ρύπων από έναν βενζινοκινητήρα χωρίς καταλυτικό μετατροπέα είναι οι παρακάτω :

NO<sub>x</sub> 500-1000ppm ή 20 gr/kg καυσίμου  
CO 1-2% (10000-20000ppm ή 200gr/kg καυσίμου) και  
HC 3000ppm (ως C1) ή 25gr/kg καυσίμου.

Ο βενζινοκινητήρας εκπέμπει επίσης υδρογονάνθρακες μέσω εξάτμισης από το ρεζερβουάρ και το καρμπυρατέρ μετά το σβήσιμο της μηχανής (τα αέρια εξαερισμού του στροφαλοθαλάμου που παλαιότερα αποτελούσαν επιπλέον πηγή ρύπων διοχετεύονται πλέον στη εισαγωγή). Στα σύγχρονα αυτοκίνητα υπάρχουν διατάξεις κατακράτησης των ατμών βενζίνης που εκπέμπονται από το ρεζερβουάρ και τον θάλαμο πλωτήρα του εξαερωτή, τα λεγόμενα φίλτρα ή κάνιστρα ενεργού άνθρακα, από τα οποία στη συνέχεια οι ατμοί διοχετεύονται μαζί με τον αέρα εξαγωγής.

Ο κινητήρας Diesel εκπέμπει αντίστοιχες συγκεντρώσεις NO<sub>x</sub> με τον βενζινοκινητήρα. Αντίθετα εκπέμπει περίπου 5 φορές λιγότερο άκαυστους υδρογονάνθρακες, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οξυγονομένα παράγωγα που είναι υπεύθυνα για τη χαρακτηριστική μυρωδιά του καυσαερίου Diesel. Ακόμη χαμηλότερες είναι οι εκπομπές CO του κινητήρα Diesel (10-30 φορές χαμηλότερες από του βενζινοκινητήρα).

Όμως ο κινητήρας Diesel εκπέμπει σωματίδια αιθάλης (διαμέτρου τάξης 0.1 μm) με προσροφημένους σε αυτά υδρογονάνθρακες σε σημαντικές ποσότητες (1-5gr/kg πετρελαίου).

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μίγματα με αλκοόλες σαν καύσιμα στους δύο προαναφερθέντες τύπους κινητήρα, παρατηρείται αυξημένη εκπομπή αλδευδών.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα περιέχουν επίσης μικρά ποσοστά θείου (μικρότερο του 500 ppm για τη βενζίνη, μικρότερο του 5000 ppm για το πετρέλαιο). Το θείο καίγεται στη μηχανή και παράγει διοξείδιο του θείου SO<sub>2</sub>, μέρος του οποίου μπορεί να οξειδωθεί σε τριοξείδιο του θείου SO<sub>3</sub> το οποίο μόλις έρθει σε επαφή με νερό σχηματίζει αιώρημα θειικού οξέος.

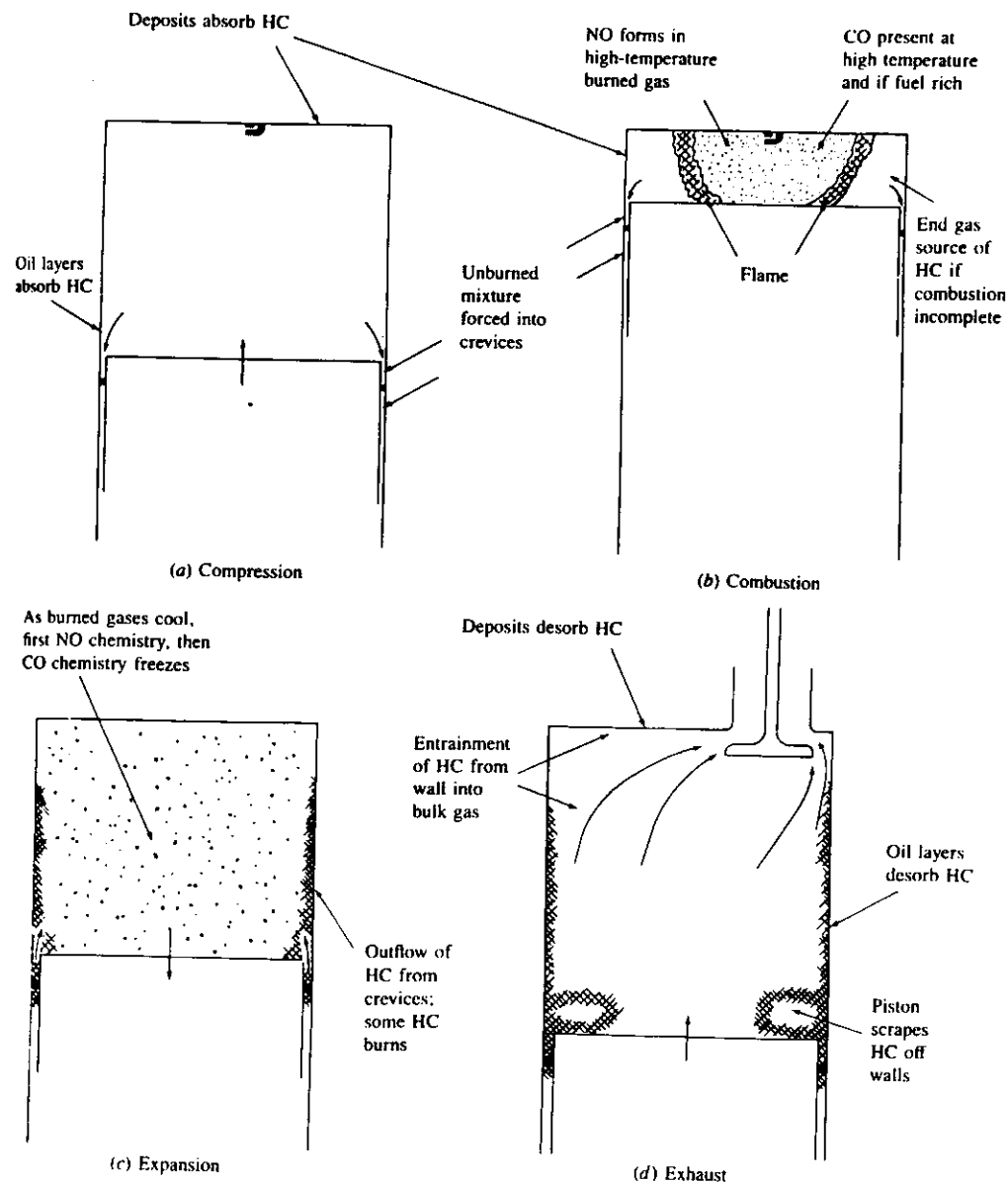
Γενικά οι παραπάνω συγκεντρώσεις των ρύπων στο καυσαέριο των ΜΕΚ διαφέρουν

σημαντικά από τις τιμές που υπολογίζονται με βάση την χημική ισοροπία. Για αυτό είναι πολύ σημαντική η γνώση των λεπτομερών μηχανισμών με βάση των οποίων σχηματίζονται οι ρύποι, καθώς και της χημικής κινητικής των αντιδράσεων που συμμετέχουν στους μηχανισμούς αυτούς.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι μηχανισμοί σχηματισμού των ρύπων στο κύλινδρο μιας μηχανής εσωτερικής καύσης.

## 9.2 ΚΥΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΥΤΩΝ

Οι διεργασίες με βάση τις οποίες σχηματίζονται οι ρύποι του βενζινοκινητήρα παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχ.9.1



Summary of HC, CO, and NO pollutant formation mechanisms in a spark-ignition engine.

Σχ 9.1 . Σχηματική παράσταση των μηχανισμών δημιουργίας των ρύπων CO, HC, NO στον κύλινδρο του βενζινοκινητήρα.

Στο σχήμα αυτό φαίνεται ο θάλαμος κάυσης στη διάρκεια 4 διαφορετικών φάσεων του 4χρονου κύκλου (συμπίεση, καύση, εκτόνωση και εξαγωγή).

Το οξειδίο του αζώτου σχηματίζεται μέσα στα υψηλής θερμοκρασίας προϊόντα της καύσης πίσω από το μέτωπο της φλόγας, μέσω χημικών αντιδράσεων μεταξύ ατόμων και μορίων αζώτου και οξυγόνου, που δεν φτάνουν ποτέ σε χημική ισορροπία. Ο ρυθμός σχηματισμού NO αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας των προϊόντων της καύσης. Καθώς τα προϊόντα αυτά κρυώνουν στη διάρκεια του εμβολισμού εκτόνωσης, παγώνουν οι αντιδράσεις σχηματισμού NO, αφήνοντας έτσι τη συγκέντρωση του ρύπου αυτού σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από αυτά που αντιστοιχούν σε χημική ισορροπία στις θερμοδυναμικές συνθήκες του καυσαερίου.

Το μονοξειδίο του άνθρακα σχηματίζεται επίσης στη διάρκεια της καύσης όταν το μίγμα είναι πλούσιο ( $\lambda < 1$ ) δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο ώστε να μετατραπεί όλος ο άνθρακας του καυσίμου σε CO<sub>2</sub>. Επιπλέον στα υψηλής θερμοκρασίας προϊόντα της καύσης δημιουργείται μονοξειδίο με διάσπαση του CO<sub>2</sub>, ακόμα και με φτωχά μίγματα. Αργότερα στη διάρκεια του εμβολισμού εκτόνωσης, παγώνει και η αντίδραση οξειδωσης του CO καθώς πέφτει η θερμοκρασία των προϊόντων της καύσης.

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες προκαλούνται από διάφορους μηχανισμούς. Στη διάρκεια της συμπίεσης και της καύσης, η αυξημένη πίεση στον κύλινδρο εξωθεί ένα μέρος της γομώσεως του κυλίνδρου σε εσωχές του θαλάμου καύσης, όπως π.χ. τους νεκρούς όγκους μεταξύ του εμβόλου των ελατηρίων και του χιτωνίου. Το μεγαλύτερο μέρος του μίγματος και των ενδιαμέσων προϊόντων που παγιδεύεται σε αυτές τις εσοχές παραμένει άκαυστο επειδή η φλόγα δεν μπορεί να διεισδύσει εκεί. Το αέριο που θα εγκαταλείψει τις εσοχές αυτές στη διάρκεια της εκτόνωσης και της εξαγωγής είναι μιά σημαντική πηγή ακαύστων υδρογονανθράκων.

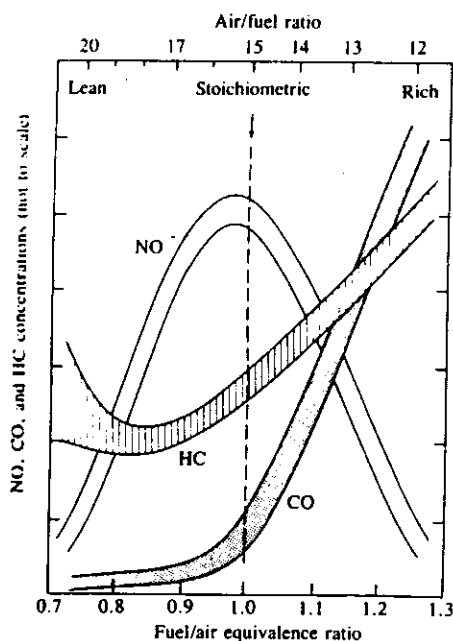
Μια άλλη πηγή ακαύστων υδρογονανθράκων είναι η στιβάδα αερίων, πάχους της τάξης 0.1mm που περιβάλλει τα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου καύσης (η φλόγα σβήνει μόλις έρθει σε επαφή με ψυχρά τοιχώματα). Έχει αποδειχθεί ότι ενώ τα αέρια της στιβάδας αυτής καίγονται γρήγορα στη συνέχεια όταν τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης είναι καθαρά, παραμένουν άκαυστα σε μεγάλο ποσοστό όταν η μηχανή έχει πορώδεις επικαθίσεις λόγω παλαιότητας.

Μια τρίτη πηγή σχηματισμού ακαύστων υδρογονανθράκων είναι το πολύ λεπτό στρώμα λαδιού που παραμένει στα τοιχώματα του κυλίνδρου μετά το πέρασμα του ελατηρίου λαδιού κατά τη φάση της εκτόνωσης. Το στρώμα αυτό του λαδιού μπορεί να προσροφά και να εκροφά υδρογονάνθρακες, επιτρέποντας τους έτσι να διαφεύγουν την κύρια διεργασία της καύσης.

Μια επιπλέον πηγή HC στους βενζινοκινητήρες είναι η ατελής καύση που συμβαίνει σε ορισμένους κύκλους με πολύ χαμηλή ταχύτητα καύσης (ισχυρώς μεταβατική λειτουργία της μηχανής χωρίς την απαιτούμενη δυναμική προσαρμογή του λόγου αέρα και της προπορείας έναυσης, ή ακόμη και του EGR).

Οι άκαυστοι HC εξέρχονται από τον κύλινδρο κατά τον εμβολισμό εξαγωγής, ενώ εξακολουθούν να οξειδώνονται στο μέτρο που η θερμοκρασία των καυσαερίων παραμένει υψηλή και υπάρχει το απαιτούμενο οξυγόνο.

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που καθορίζουν τις εκπομπές του βενζινοκινητήρα είναι ο λόγος αέρα λ (το πηλίκο του λόγου αέρα καυσίμου προς τον στοιχειομετρικό λόγο αέρα καυσίμου). Στο Σχήμα 9.2 παρουσιάζεται σχηματικά η εξάρτηση των εκπομπών CO, HC και NO από το λόγο αέρα λ.



Variation of HC, CO, and NO concentration in the exhaust of a conventional spark-ignition engine with fuel/air equivalence ratio.

Σχήμα 9.2 Μεταβολή των συγκεντρώσεων CO, HC και NO στο καυσαέριο ενός συμβατικού βενζινοκινητήρα σαν συνάρτηση του λόγου αέρα λ.

Ο βενζινοκινητήρας λειτουργεί με τιμές λ κοντά στο 1, ενώ στο παρελθόν αρκετοί βενζινοκινητήρες λειτουργούσαν με πλούσιο μίγμα που εξασφάλιζε ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία.

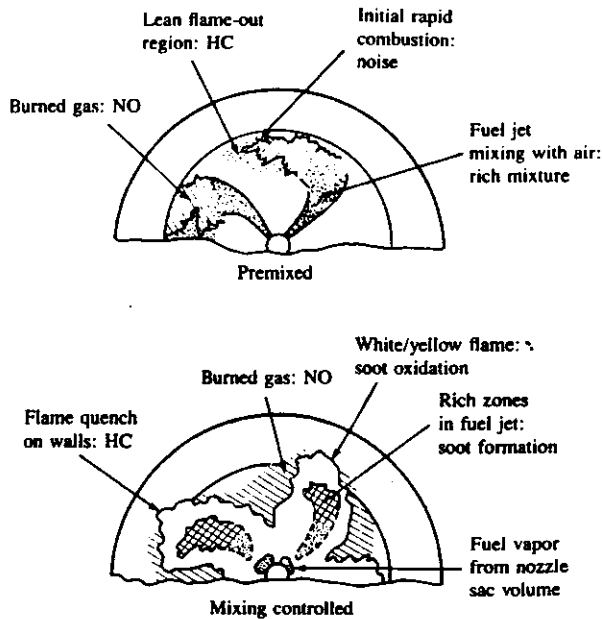
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.2 η καύση με φτωχότερο μίγμα οδηγεί αρχικά σε μείωση των εκπομπών, μέχρις ότου να αρχίσουν να εμφανίζονται αρυθμίες στην καύση (και αστοχίες έναυσης στη συνέχεια, οπότε αυξάνουν απότομα οι εκπομπές HC. Η μορφή των καμπυλών του σχήματος 9.2 δίνει μία ιδέα για τις δυσκολίες της αντιρύπανσης του βενζινοκινητήρα.

Σε έναν κρύο κινητήρα όπου το καύσιμο εξατμίζεται αργά, αυξάνουμε την παροχή καυσίμου για να εξασφαλίσουμε την ομαλή καύση. Έτσι κατά την ψυχρή εκκίνηση έχουμε αυξημένες εκπομπές CO και HC μέχρι να έρθει ο εμπλουτισμός. Σε συνθήκες μερικού φορτίου με ζεστό κινητήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν φτωχότερα μίγματα οπότε παρατηρούνται χαμηλές εκπομπές CO και HC και μέτριες εκπομπές NO.

Η χρήση ανακύκλωσης καυσαερίου για την μείωση των εκπομπών NO (EGR) χειροτερεύει κάπως την ποιότητα της καύσης σημειώστε ότι η μέγιστη ισχύς του κινητήρα λαμβάνεται με πλούσια μίγματα και χωρίς καθόλου EGR.

Όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια ο ταυτόχρονος περιορισμός και των τριών ρύπων σε όλες τις περιοχές λειτουργίας του βενζινοκινητήρα απαιτεί τη συνδυασμένη χρήση διαφόρων τεχνολογιών αντιρύπανσης.

Στο κινητήρα Diesel από την άλλη μεριά, το καύσιμο ψεκάζεται στον κύλινδρο λίγο πριν την έναρξη της καύσης, με συνέπεια την ανομοιογενή κατανομή του καυσίμου στο θάλαμο καύσης σε ένα σημαντικό τμήμα του κύκλου. Οι διεργασίες σχηματισμού ρύπων εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την κατανομή του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, καθώς και από τον ρυθμό μεταβολής του στο χρόνο, εξαιτίας της ανάμιξης με τον αέρα. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται σχηματικά οι μηχανισμοί σχηματισμού NO, ακαύστων HC και σωματιδίων στη διάρκεια της καύσης προανάμιξης και της φάσης καύσης με διάχυση, στο θάλαμο καύσης ενός κινητήρα Diesel απευθείας έγχυσης με στροβιλισμό.



Summary of pollutant formation mechanisms in a direct-injection compression-ignition engine during "premixed" and "mixing-controlled" combustion phases.

Σχήμα 9.3. Συνοπτική παρουσίαση των μηχανισμών σχηματισμού ρύπων σε κινητήρα Diesel απ'ευθείας εγχύσεως στη διάρκεια των φάσεων καύσης προανάμιξης και καύσης διάχυσης.

Το NO σχηματίζεται από τα αέρια καύσης υψηλής θερμοκρασίας όπως πριν, αλλά η κατανομή της θερμοκρασίας και του λόγου αέρα/καυσίμου των προϊόντων της καύσης είναι τώρα ανομοιογενής και ο ρυθμός σχηματισμού NO μεγιστοποιείται στις περιοχές με  $\lambda$  κοντά στην μονάδα.

Αντίθετα, η αιθάλη σχηματίζεται στον πυρήνα της δέσμης ψεκαζόμενων σταγονιδίων όπου το  $\lambda$  είναι μικρότερο της μονάδας, στην περιοχή της φλόγας, όπου ο ατμός του καυσίμου θερμαίνεται με ανάμιξη με τα θερμά προϊόντα της καύσης. Η αιθάλη στη συνέχεια οξειδώνεται στη ζώνη της φλόγας όταν έρχεται σε επαφή με άκαυστο οξυγόνο. Στο φαινόμενο αυτό οφείλεται και το κίτρινο χρώμα της φλόγας του Diesel.

Οι HC και οι αλδεύδες δημιουργούνται σε περιοχές όπου η φλόγα σβήνει είτε με πρόσκρουση στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης είτε λόγω υπερβολικής αραιώσης με αέρα. Μία επιπλέον πηγή HC είναι το καύσιμο που εξατμίζεται από τον νεκρό όγκο του εγχυτήρα στο τέλος του ψεκασμού.

Ο θόρυβος της καύσης του Diesel προκαλείται κυρίως από την πρώτη φάση της διεργασίας καύσης, δηλ. την ταχεία έκλυση θερμότητας που ακολουθεί την περίοδο καθυστέρησης έναυσης.