



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελευθερία Σύφαντου

**Υπολογιστική μελέτη τμηματικής έγχυσης καυσίμου
σε δίχρονους ναυτικούς κινητήρες Diesel**

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Α. Καϊκτσίης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη: Γ. Δημόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. Παπαδόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2023

Ευχαριστίες

Με την παρούσα εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Θα ήθελα να ευχαριστήσω γι' αυτό την οικογένειά μου για τη στήριξη και την υπομονή της, και όλους του καθηγητές για τις γνώσεις και τη βοήθεια που παρείχαν. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Α. Καϊκτσή, τους Υποψήφιους Διδάκτορες κ. Ξ. Βούβακο και κ. Δ. Καζαγκά για τη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχαν στην εκπόνηση και της παρούσας εργασίας, καθώς και τους κ. Παπαδόπουλο και κ. Δημόπουλο, μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Περίληψη

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συνολική αποτίμηση της πολλαπλής έγχυσης καυσίμου σε κινητήρες Diesel, με έμφαση στους μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες, η οποία αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx) και σωματιδίων αιθάλης, με ταυτόχρονη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Σε προγενέστερες ερευνητικές εργασίες στον Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, έχει γίνει βελτιστοποίηση, με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, του προφίλ έγχυσης καυσίμου, στο πλαίσιο της χρήσης διπλού ή τριπλού παλμού. Στην παρούσα εργασία, διερευνάται η περαιτέρω βελτίωση της λειτουργίας δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, στην περιοχή του πλήρους φορτίου, με χρήση πενταπλού παλμού έγχυσης. Συγκεκριμένα, διερευνάται η χρήση αριθμού πιλοτικών εγχύσεων από μία έως τρεις (που αντιστοιχούν σε μέγιστο αριθμό μετεγχύσεων ίσο με τρεις και ελάχιστο ίσο με μία). Εδώ, το συνολικό προφίλ διαμορφώνεται συναρτήσει εννέα (9) ανεξάρτητων παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν τον χρονισμό των επιμέρους παλμών έγχυσης, και το αντίστοιχο ποσοστό εγχυόμενης μάζας καυσίμου. Επιπλέον, μπορεί να θεωρηθεί μείωση της συνολικά εγχυόμενης μάζας (σε σχέση με μια περίπτωση αναφοράς χαρακτηριζόμενη από συνεχή έγχυση), με χρήση μίας επιπλέον ανεξάρτητης μεταβλητής.

Τα παρόντα αποτελέσματα δείχνουν ότι, σε σύγκριση με τις προγενέστερες μελέτες (χρήση διπλού ή τριπλού παλμού), μπορεί να προκύψει μικρή μόνο περαιτέρω μείωση των εκπομπών NOx, με συγκρίσιμη μείωση στις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης, και παρόμοια επίπεδα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, η παρούσα μείωση στις εκπομπές NOx είναι τάξης 35%.

Στη συνέχεια, γίνεται μια παραμετρική μελέτη διαφορετικών προφίλ έγχυσης τριπλού παλμού. Εδώ, τα προφίλ έγχυσης διαμορφώνονται με βάση βέλτιστες λύσεις των προβλημάτων βελτιστοποίησης προφίλ έγχυσης με πιλοτική και κύρια έγχυση (Andreadis et al., 2010), και με κύρια έγχυση και μετέγχυση (Stratsianis et al., 2016). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση τριπλού παλμού δεν μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα αποτελέσματα της χρήσης διπλού παλμού, ιδίως δε αυτά που αφορούν στη χρήση μετέγχυσης.

Τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα αναλύονται και χαρακτηρίζονται με χρήση οπτικοποίησης του ροϊκού πεδίου και χαρτών θερμοκρασίας – λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (χάρτες T-φ), σε αντιπροσωπευτικές τιμές της γωνίας στροφάλου.

Abstract

The main objective of the present thesis is an overall assessment of multiple fuel injection in Diesel engines, with an emphasis on large two-stroke marine Diesel engines, which aims to reduce nitric oxides (NO_x) and soot emissions, possibly also reducing specific fuel oil consumption.

In previous research works at the Division of Marine Engineering of the School of Naval Architecture and Marine Engineering of NTUA, optimization of the fuel injection profile was performed, using double or triple pulse. In the present work, the further improvement of the operation of a two-stroke marine Diesel engine, in the region of full load, is investigated, using a five-pulse injection. Different solutions are evaluated using Computational Fluid Dynamics (CFD). In particular, the use of a number of pilot injections from one to three (corresponding to a maximum number of post-injections equal to three and a minimum equal to one) is investigated. Here, the overall injection profile is shaped as a function of nine (9) independent parameters, which determine the timing of the individual injection pulses, and the corresponding percentage of fuel mass injected. In addition, a reduction in total injected mass (with respect to a reference case characterized by continuous injection) can be considered, using an additional independent variable.

The present results show that, in comparison to the previous studies (dual or triple pulse), only a small further reduction in NO_x emissions can be achieved, with a comparable reduction in soot emissions, and similar levels of specific fuel consumption. Compared to the reference case, the present reduction in NO_x emissions is of the order of 35%.

Further, a parametric study of different triple pulse injection profiles is performed. Here, injection profiles are formed based on optimal solutions of optimization of injection profile with pilot and main injection (Andreadis et al., 2010), and with main injection and post-injection (Stratsianis et al., 2016). The present results show that the use of a triple pulse cannot significantly improve the ones of double pulse, especially those corresponding to post-injection.

The present computational results are analyzed and characterized using visualization of computed flow fields and temperature – equivalence ratio maps (T - ϕ maps), at representative values of engine crank angle.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη..... | 2 |
| Abstract | 3 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 6 |
| 1.1. Κίνητρο της εργασίας | 6 |
| 1.2. Αέριοι ρύποι και ανθρωπότητα | 6 |
| 1.2.1. Βασικοί αέριοι ρύποι και επιπτώσεις στον άνθρωπο | 7 |
| 1.2.2. Εξέλιξη παραγωγής ρύπων..... | 10 |
| 1.2.3. Ισχύουσες νομοθεσίες και παγκόσμια κατανομή ρύπων..... | 12 |
| 1.2.4. Η συμβολή της ναυτιλίας στην παγκόσμια αέρια ρύπανση | 18 |
| 1.3. Ναυτικά καύσιμα..... | 23 |
| 1.3.1. HFO (Heavy Fuel Oil) | 26 |
| 1.3.2. Ναυτικά αποστάγματα/MDO (Marine Diesel Oil) | 27 |
| 1.3.3. Ταξινόμηση καυσίμων σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε θείο | 28 |
| 2. Δίχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel | 31 |
| 2.1. Εξέλιξη μηχανισμών πρόωσης..... | 31 |
| 2.2. Εμβολοφόρες MEK..... | 32 |
| 2.3. Δίχρονος κινητήρας Diesel | 34 |
| 2.3.1. Κύκλος λειτουργίας | 34 |
| 2.3.2. Ρύθμιση ισχύος..... | 35 |
| 2.3.3. Συστήματα έγχυσης καυσίμου..... | 36 |
| 2.3.4. Θερμοδυναμικός κύκλος κινητήρων..... | 43 |
| 2.4. Καύση στους κινητήρες Diesel | 49 |
| 2.4.1. Φάσεις της καύσεως..... | 50 |
| 2.4.2. Ρευστομηχανική της καύσης..... | 50 |
| 2.4.3. Χημική κινητική της καύσης..... | 58 |
| 2.5. Τρόποι μείωσης NO _x | 64 |
| 2.5.1. Εισαγωγή νερού στο θάλαμο καύσης | 64 |
| 2.5.2. Τροποποιήσεις στο εσωτερικό της μηχανής/Internal Engine Modifications(IEM) | 67 |
| 2.5.3. Ανακυκλοφορία καυσαερίων/ Exhaust Gas Recirculation (EGR)..... | 72 |
| 2.5.4. Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή NO _x / Selective Catalytic Reduction (SCR)..... | 74 |
| 3. Έγχυση καυσίμου πολλαπλού παλμού | 77 |
| 3.1. Προέγχυση καυσίμου/pilot injection | 77 |
| 3.1.1. Καύση προανάμειξης σε ελαφρούς κινητήρες Diesel (PCCI/HCCI)-Μέθοδοι που βασίζονται στην ανάμειξη του καυσίμου | 78 |
| 3.1.2. Προέγχυση καυσίμου σε 4-X DI κινητήρες-Μέθοδοι που βασίζονται στη φλόγα διάχυσης...82 | |
| 3.1.3. Προέγχυση καυσίμου σε ναυτικούς κινητήρες Diesel | 82 |
| 3.2. Μετέγχυση καυσίμου/ Post Injection | 87 |
| 3.2.1. Μετέγχυση σε 4X κινητήρα | 88 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.2.2. | Μετέγχυση σε 2X κινητήρα | 90 |
| 3.3. | Συνδυασμός πιλοτικής έγχυσης με μετέγχυση-Πολλαπλός παλμός..... | 92 |
| 3.3.1. | Πολλαπλός παλμός έγχυσης σε 4X κινητήρες | 92 |
| 3.3.2. | Πολλαπλός παλμός σε 2X ναυτικό κινητήρα | 93 |
| 4. | Υπολογιστικά Εργαλεία | 96 |
| 4.1. | Κώδικας μοντελοποίησης KIVA-3[188]..... | 96 |
| 4.1.1. | Βασικές εξισώσεις ρευστών και χημική κινητική | 97 |
| 4.1.2. | Μοντελοποίηση του σπρέι και των σταγονιδίων καυσίμου | 99 |
| 4.1.3. | Οριακές συνθήκες και επίλυση..... | 101 |
| 4.1.4. | Μοντελοποίηση χημικής κινητικής | 103 |
| 4.1.5. | Αντικαταστάσεις μοντέλων | 103 |
| 4.1.6. | Αξιοπιστία προσομοίωσης και συνθήκες αναφοράς..... | 107 |
| 5. | Υπολογιστική Μελέτη και Αποτελέσματα | 112 |
| 5.1. | Μελέτη 5-πλού παλμού έγχυσης..... | 113 |
| 5.2. | Μελέτη ευαισθησίας παραμέτρων μετέγχυσης σε 3-πλό παλμό..... | 117 |
| 5.2.1. | Μελέτη ευαισθησίας ως προς GAP και PoMF | 118 |
| 5.2.2. | Μελέτη ευαισθησίας ως προς GAP | 120 |
| 5.2.3. | Μελέτη ευαισθησίας ως προς MR για σταθερή μετέγχυση (PoMF, GAP)=(24.636%, 3.7°) 121 | |
| 5.3. | Οπτικοποίηση και περαιτέρω διερεύνηση του τριπλού παλμού σε μειωμένο φορτίο | 124 |
| 5.3.1. | Οπτικοποίηση παλμού με πιλοτική έγχυση C | 124 |
| 5.3.2. | Οπτικοποίηση παλμού με πιλοτική έγχυση H..... | 146 |
| 5.3.3. | Σύγκριση περιπτώσεων πιλοτικής έγχυσης H & C..... | 158 |
| 6. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 163 |
| | Βιβλιογραφία:..... | 164 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Κίνητρο της εργασίας

Το περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι ένα φλέγον ζήτημα στη σύγχρονη κοινωνία, καθώς οι άκριτες καταχρήσεις των περασμένων γενεών έχουν δημιουργήσει ρύπους και καταστροφές που δεν αφήνουν πλέον περιθώρια επανάπαυσης της ανθρωπότητας. Παλαιότερα, εννοώντας κάποιες δεκαετίες μόνο παλιότερα, ο κυριότερος λόγος απειλής του περιβάλλοντος ήταν η άγνοια κινδύνου. Η τεχνολογία εξελισσόταν και στα πρώτα της βήματα είχε στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση του ανθρώπου, αδιαφορώντας για τις παράπλευρες απώλειες στο περιβάλλον. Και ήταν λογικό, καθώς τα τεχνολογικά επιτεύγματα δημιουργούνται απ' τον άνθρωπο για τον άνθρωπο. Πλήγματα όπως το Τσερνόμπιλ έκρουσαν τον κώδωνα του κινδύνου, και άρχισαν να θέτουν την κοινωνία, και κατ' επέκταση την επιστημονική κοινότητα, σε επαγρύπνηση σχετικά με την επίδραση της τεχνολογίας στο περιβάλλον. Προφανώς ελάχιστοι είναι αυτοί που νοιάζονται για τη χλωρίδα και την πανίδα και μόνο. Πίσω από την αναταραχή αυτή κρύβεται ο φόβος για τη μελλοντικά διαφαινόμενη απειλή του ανθρώπινου είδους. Σήμερα, που οι γνώσεις σχετικά με τον κίνδυνο στον οποίο βρίσκεται το περιβάλλον υπάρχουν, το ζήτημα βρίσκεται αντιμετώπιμο, όχι με την άγνοια, αλλά κυρίως με οικονομικά συμφέροντα. Το πρόβλημα δεν είναι ότι δεν υπάρχει πρόβλεψη για την επίδραση των διάφορων τεχνολογιών στο περιβάλλον, ούτε ότι δεν υπάρχουν τρόποι προστασίας του. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι τεχνικές για τη προστασία του περιβάλλοντος συνεπάγονται μεγάλη οικονομική επιβάρυνση για τις επιχειρήσεις. Διαχείριση της αντιμαχίας και συμβιβασμό μεταξύ των αντιπαρατιθέμενων πλευρών μπορούν να επιχειρήσουν μόνο κυβερνητικές δυνάμεις σε παγκόσμιο ή εθνικό επίπεδο, με θέσπιση κατάλληλων νομοθετικών ρυθμίσεων. Όπως και σε κάθε τομέα του πολιτικού γίγνεσθαι, δεν είναι εύκολο να διακρίνει κανείς αν οι διαιτητές-κράτη είναι αμερόληπτοι του περιβαλλοντο-οικονομικού ζητήματος. Δεν είναι ευκρινές αν τάσσονται υπέρ των οικονομικών κολοσσών εκδίδοντας χαλαρές νομοθεσίες προστασίας του περιβάλλοντος, προς καθησυχασμό των υπέρμαχων του περιβάλλοντος, όπου αυτοί υπάρχουν, αν χρησιμοποιούν το θέμα της προστασίας του περιβάλλοντος και τις αντίστοιχες νομοθεσίες σαν όπλο έναντι αντίπαλων κολοσσών ή εάν είναι απλά είναι αμερόληπτοι και δίκαιοι απέναντι και στις δύο πλευρές.

Η επιστημονική κοινότητα, παρότι το ζήτημα την αφορά άμεσα και βασίζεται σε αυτήν, δεν έχει ιδιαίτερο τρόπο επηρεασμού των αποφάσεων, και η θέση της δεν είναι συνήθως κυριαρχούσα. Συχνά προτείνει λύσεις υποστηρικτικές του περιβάλλοντος, και αντίστοιχες οικονομικές τεχνολογίες. Όμως, η δικαιοδοσία της είναι εξαιρετικά περιορισμένη, καθώς οι λύσεις που τελικά προκρίνονται είναι αποτέλεσμα συμβιβασμών, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τα οικονομικά και άλλα συμφέροντα. Από την πλευρά των χρηστών της τεχνολογίας, η προτεραιότητα είναι στις πλείστες των περιπτώσεων η απλή συμμόρφωση με τους υφιστάμενους κανονισμούς. Σε κάθε περίπτωση, η υποχρέωση της επιστημονικής κοινότητας είναι η αναζήτηση λύσεων καλύτερων από το κάθε φορά ισχύον επίπεδο των κανονισμών, ενώ υποχρέωση των θεσμικών φορέων είναι η ενίσχυση της σχετικής έρευνας, συμπεριλαμβανόμενης της βασικής έρευνας με μακροπρόθεσμους στόχους. Εν προκειμένω, τα δημόσια πανεπιστήμια είναι κύριοι φορείς που προάγουν τη γνώση, τόσο στο πλαίσιο βασικής όσο και περισσότερο εφαρμοσμένης έρευνας, με στόχο την προαγωγή της γνώσης και την εξυπηρέτηση στόχων της κοινωνίας. Σήμερα, σημαντικός στόχος είναι διεθνώς η προστασία του περιβάλλοντος.

Στο παραπάνω πλαίσιο, και σε συνέχεια προγενέστερης σχετικής έρευνας στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η υπολογιστική μελέτη της επίδρασης του προφίλ έγχυσης καυσίμου σε μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες στις εκπομπές ρύπων, συγκεκριμένα, οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων αιθάλης, με ταυτόχρονη διατήρηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε χαμηλό επίπεδο. Εδώ, διερευνάται η κατάλληλη διαμόρφωση προφίλ τμηματικής έγχυσης (split injection), με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

1.2. Αέριοι ρύποι και ανθρωπότητα

Για να εκτιμηθεί σωστά η αξία και η σημαντικότητα των ερευνών και των γενικότερων προσπαθειών που γίνονται για τον περιορισμό των αέριων ρύπων, πρέπει να αναφερθούν, αφενός οι επιπτώσεις που αυτοί

έχουν στην υγεία του ανθρώπου, και αφετέρου τα αποτελέσματα αντίστοιχων πρόσφατων προσπαθειών περιορισμού τους, η κατάσταση που αντιμετωπίζει αυτή τη στιγμή ο πλανήτης, αλλά και τα βήματα που πρέπει να γίνουν ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής πορεία του σε σχέση με την κατάσταση του περιβάλλοντος.

1.2.1. Βασικοί αέριοι ρύποι και επιπτώσεις στον άνθρωπο

Με τον όρο αέριοι ρύποι εννοούνται ουσίες που εκπέμπονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα ή το οικοσύστημα, και επιφέρουν άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις στην ευεξία και την υγεία του ανθρώπου και όλων των έμβιων οργανισμών, αλλά και στη διατήρηση της ισορροπίας και της ακεραιότητας του φυσικού ή τεχνητού περιβάλλοντος. Οι ρύποι μπορεί να είναι αέρια (gases), σωματίδια οργανικά ή ανόργανα (particulates) και βακτήρια. Ακολουθώς γίνεται αναφορά στους βασικότερους αέριους ρύπους. Σε σχέση με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ο κύριος ρύπος παραμένει το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).

- **Αμμωνία (NH₃):** Πρόκειται για άχρωμο αέριο με χαρακτηριστική αποπνικτική οσμή. Η ετήσια παραγωγή του το 2019, και με ελαφριά αύξηση έως το 2021, ήταν 150.000 t [1] καταναλώνοντας περίπου το 1% της παγκόσμιας ενέργειας, και με κυρίαρχη χώρα παραγωγής την Κίνα. Είναι εξαιρετικά καυστικό και βλαβερό σε μεγάλες ποσότητες, και μπορεί να καταστρέφει τα πνευμόνια κατά την εισπνοή, καθώς και το συκώτι. Παρά την τοξικότητά του, είναι χρήσιμο για διάφορες βασικές ανθρώπινες λειτουργίες, καθώς αποτελεί συστατικό για πολλά λιπάσματα, τροφές, φάρμακα, βαφές, εκρηκτικά και καθαριστικά, ενώ χρησιμοποιείται και σε ψυγεία για την παραγωγή πάγου. Βιομηχανίες παραγωγής ή χρήσης της αμμωνίας υπόκεινται σε αυστηρότατους κανονισμούς ασφαλείας, καθώς διάφοροι οργανισμοί θέτουν όρια στην έκθεση σε αυτή ή στη μεταφορά της. Διαλύματα αμμωνίας, στα οποία αυτή βρίσκεται σε μικρές ποσότητες, δεν θεωρούνται ιδιαίτερα τοξικά για τα θηλαστικά, καθώς διαθέτουν μηχανισμό μετασχηματισμού της σε ουρία και αμινοξέα, κάτι που δεν συμβαίνει με τους θαλάσσιους οργανισμούς, οι οποίοι την αποβάλλουν μόνο άμεσα. Αυτό την καθιστά, ακόμα και σε μορφή διαλύματος, εξαιρετικά επικίνδυνη για το περιβάλλον, και κυρίως για το υδάτινο. Αναφέρεται επίσης ότι αποτελεί παράγωγο της καύσης καπνού.
- **Μονοξείδιο του άνθρακα (CO):** Πρόκειται για άχρωμο, άγευστο και άοσμο αέριο το οποίο είναι εξαιρετικά τοξικό για τους έμβιους οργανισμούς. Παρότι είναι προϊόν του μεταβολισμού και συμμετέχει σε κάποιες βιολογικές λειτουργίες, προκαλεί, ακόμα και σε μικρές ποσότητες (35 ppm), δηλητηρίαση αχρηστεύοντας την αιμογλοβίνη του αίματος, που είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά του οξυγόνου. Είναι η βασικότερη αιτία θανάτου από αέρια δηλητηρίαση σε πολλές χώρες. Παγκοσμίως, η μεγαλύτερη παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα είναι φυσικής προέλευσης, στο πλαίσιο φωτοχημικών αντιδράσεων, και ανέρχεται στους 5.000.000.000 t ετησίως, καθώς και λόγω εκρήξεων ηφαιστειών ή δασικών πυρκαγιών. Το μονοξείδιο του άνθρακα δημιουργείται κατά την καύση οργανικών ενώσεων, όταν, λόγω απουσίας επαρκούς οξυγόνου, η καύση είναι ατελής και αντί για την παραγωγή CO₂ και μόνο, παράγεται και ποσοστό CO. Συνεπώς, βασική αιτία παραγωγής του με τεχνικά μέσα είναι η κακή λειτουργία καυστήρων ή μηχανών εσωτερικής καύσης, όπως είναι η λειτουργία τους σε κλειστό χώρο με χαμηλή τροφοδότηση σε οξυγόνο. Για ένα μεγάλο ποσοστό παραγωγής του ευθύνεται η μεταλλουργία σιδήρου. Η διάρκεια ζωής του στην ατμόσφαιρα είναι μικρή, αλλά αυξάνει τα επίπεδα ατμοσφαιρικού μεθανίου και τροποσφαιρικού όζοντος, που οξύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- **Διοξείδιο του θείου (SO₂):** Είναι τοξικό αέριο με οσμή καμένου σπύριου, και παράγεται φυσικά από τη δραστηριότητα ηφαιστειών ή την εξαγωγή χαλκού, καθώς και από την καύση καυσίμων που περιέχουν ποσοστά θείου. Σε εργαστήρια, η ελεγχόμενη παραγωγή αποσκοπεί στη μετέπειτα παραγωγή θειικού οξέος, ενώ χρησιμοποιείται σε μικρή ποσότητα ως συντηρητικό τροφίμων, καθώς και στην οινοποιία, ως συστατικό σε καθαριστικά, καθώς και σε ψυγεία. Στην ατμόσφαιρα υπάρχει σε εξαιρετικά μικρό ποσοστό, και κύρια αιτία παρουσίας του είναι οι εκρήξεις ηφαιστειών. Από ετήσια στατιστικά στις ΗΠΑ φαίνεται ότι η συγκέντρωσή του στον αέρα έχει ελαττωθεί τα τελευταία χρόνια σχεδόν κατά 1/3, αποδίδοντας την ελάττωση αυτή στη χρήση μη θειούχων καυσίμων. Το SO₂ είναι ο βασικός παράγοντας ύπαρξης της όξινης βροχής, υπεύθυνης για την αλλοίωση του τεχνητού και φυσικού περιβάλλοντος, ενώ η εισπνοή του (άνω των 75 ppb/hour) προκαλεί μεταξύ άλλων αναπνευστικά προβλήματα, πρόωρο θάνατο. Τέλος, θεωρείται ότι συσχετίζεται με τις πρόωρες γεννήσεις.
- **Οξείδια του αζώτου (NO_x):** Πρόκειται για αέρια με κυρίαρχο ρόλο στην ατμοσφαιρική ρύπανση, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία της όξινης βροχής, του νέφους και την παρουσία όζοντος

στην τροπόσφαιρα. Τα κύρια οξειδία του αζώτου που παράγονται κατά την καύση σε κινητήρες Diesel είναι το μονοξείδιο (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (N₂O). Τα οξειδία του αζώτου παράγονται κυρίως από τη συνένωση του ατμοσφαιρικού αζώτου με το οξυγόνο σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή σε περιπτώσεις καύσης με ατμοσφαιρικό αέρα, όπως συμβαίνει με τους κινητήρες αυτοκινήτων, κατά την καύση καυσίμων με περιεκτικότητα σε άζωτο, στη φύση κατά τα χτυπήματα κεραυνών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας είναι τοπικά μεγάλη, και σε μικρότερα ποσοστά από τη χρήση λιπασμάτων που περιέχουν άζωτο. Η παραγωγή οξειδίων αζώτου από κεραυνούς εκτιμάται σε 8.600.000 t ετησίως, έναντι 28.500.000 t που εκτιμώνται ότι παράγονται από καύση οργανικών ενώσεων και καυσίμων [3]. Τα οξειδία του αζώτου, αντιδρώντας με πτητικές οργανικές ενώσεις με τη βοήθεια ηλιακής ακτινοβολίας, παράγουν το φωτοχημικό νέφος, από το οποίο πάσχουν οι περισσότερες πόλεις. Το νέφος αυτό αποτελείται κυρίως από όζον και PANs (peroxyl nitrates), και προκαλεί προβλήματα όπως μείωση της λειτουργίας των πνευμόνων, απειλώντας ιδιαίτερα άτομα με άσθμα και εργαζόμενους σε εξωτερικούς χώρους. Τα οξειδία του αζώτου, κατά τη συνένωσή τους με την αμμωνία με παρουσία υγρασίας, σχηματίζουν αέριο νιτρικό, που είναι επίσης επικίνδυνο για τους πνεύμονες και την καρδιά, και μπορεί να προκαλέσει πρόωρο θάνατο, ενώ κατά την ένωσή τους με άλλες οργανικές ενώσεις σχηματίζουν τοξικά προϊόντα που προκαλούν καρκινογενέσεις και αλλοιώσεις του DNA. Τέλος, τα νιτρικά οξειδία επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς η φωτόλυση του διοξειδίου του αζώτου παράγει όζον και αυτό ελεύθερες ρίζες OH, που αντιδρούν με το μεθάνιο, ένα από τα βασικότερα αέρια του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα εν τέλει να συμβάλλει στην 'ψύξη' του πλανήτη. Απ' την άλλη, στην περίπτωση υγροποίησής του και επαφής του με το έδαφος, αντιδρά με το χλώμα παράγοντας υποξείδιο του αζώτου, N₂O, που είναι ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου.

- **Μεθάνιο (CH₄):** Είναι το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου, και χρησιμοποιείται ως καύσιμο, παρότι η αποθήκευσή του λόγω της αέριας κατάστασής του (σε κανονικές συνθήκες) είναι σχετικά δύσκολη. Η ύπαρξή του στην ατμόσφαιρα οφείλεται κυρίως σε διαρροές, είτε κατά τη μεταφορά του είτε απευθείας από το υπέδαφος. Τα τελευταία χρόνια η παρουσία του στον ατμοσφαιρικό αέρα αυξάνεται και, παρότι δεν είναι τοξικό, είναι το πιο επιζήμιο αέριο του θερμοκηπίου (αν εξαιρεθεί η υγρασία) μιας και απορροφά πολλή ακτινοβολία (έχει 34 φορές μεγαλύτερη επίδραση από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη επιταχύνει την παραγωγή ατμοσφαιρικού μεθανίου, αυξάνοντας κι άλλο τη θερμοκρασία. Είναι εξαιρετικά εύφλεκτο στην παρουσία οξυγόνου και ασφυξιογόνο σε ακόμα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.
- **Χλωροφθοράνθρακες (CFCs):** Είναι παράγωγα οργανικών ενώσεων, όπως το μεθάνιο, και χρησιμοποιούνται σαν ψυκτικά μέσα, στη φαρμακοβιομηχανία, στην παραγωγή Teflon, και αλλού. Έχουν χαμηλή τοξικότητα, αλλά η ελεύθερη παρουσία τους στην ατμόσφαιρα προκαλεί την καταστροφή του στρώματος του όζοντος, αυξάνοντας την υπεριώδη ακτινοβολία και συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Πέραν όμως αυτού, είναι σημαντικά αέρια του θερμοκηπίου, καθώς από μόνοι τους απορροφούν ενέργεια, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Διεθνώς, έχουν θεσπιστεί αυστηροί κανονισμοί που απευθύνονται σε βιομηχανίες παραγωγής και χρήσης των χλωροφθορανθράκων για τον περιορισμό τους, ωστόσο συνεχίζουν να λειτουργούν συστήματα που παρήχθησαν παλαιότερα, αυξάνοντας τη ρύπανση του αέρα.
- **Μικροσωματίδια:** Τα σωματίδια αυτά, ανάλογα το είδος τους, έχουν ένα εύρος διαμέτρου 0.01-100 μm, και προκύπτουν είτε από ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως από άκαυστο καύσιμο μεταφορών, από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, από τη σκόνη των πόλεων, από την καύση καπνού κ.λπ., είτε από φυσική δραστηριότητα, όπως ηφαίστεια, πυρκαγιές, αμμοθύελλες, ακόμα κι από τον αφρό της θάλασσας, που είναι και η μεγαλύτερη αιτία παραγωγής των σωματιδίων, περιορίζοντας τη συνεισφορά του ανθρώπινου παράγοντα στο 10% περίπου [4]. Είναι η πιο άμεσα επικίνδυνη μορφή ρύπανσης για τον άνθρωπο, καθώς τα σωματίδια έχουν διάμετρο που επιτρέπει την εισχώρησή τους στους πνεύμονες και στο αίμα, προκαλώντας αναπνευστικά και κυκλοφορικά προβλήματα, καρκινογενέσεις, ενώ ταυτόχρονα θεωρείται ο έκτος κατά εκτιμώμενη σειρά παράγοντας παγκοσμίως για πρόωρους θανάτους. Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μm εισέρχονται στους πνεύμονες και επικάθονται στους βρόγχους, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα, ενώ σωματίδια με διάμετρο μικρότερη του 0.1 μm, όπως είναι τα συσσωματώματα άκαυστου άνθρακα (soot), εισέρχονται στους βρόγχους και από εκεί στο αίμα, πλήττοντας και τα υπόλοιπα όργανα. Έτσι, παρόλο που περίπου το 10% των παραγόμενων σωματιδίων οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα, το συγκεκριμένο ποσοστό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, παρότι δεν πρόκειται για αέρια του θερμοκηπίου αλλά για κυρίως στερεά ύλη, τα σωματίδια δεσμεύουν ενέργεια

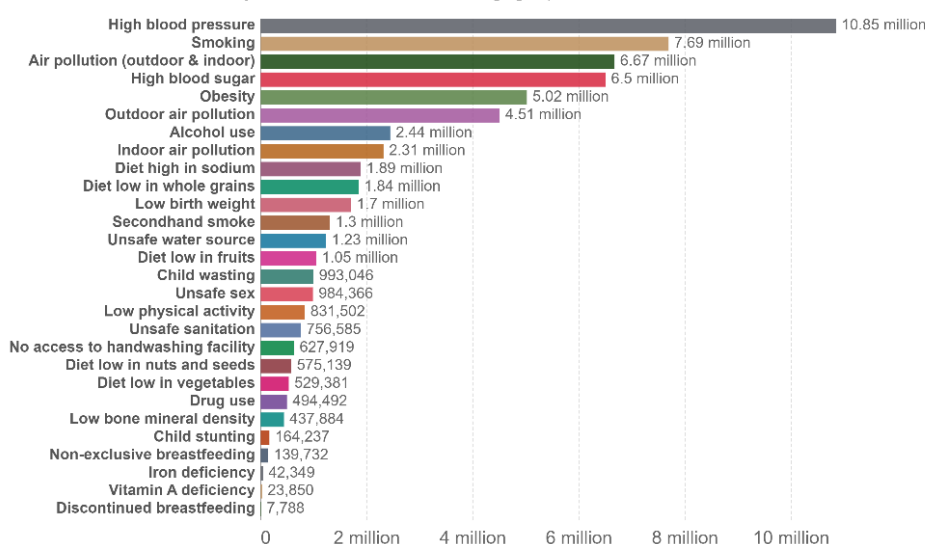
του ήλιου, δεν επιτρέπουν την αντανάκλαση της ακτινοβολίας στο διάστημα, και εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μάλιστα, σε αντίθεση με τα αέρια, είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί η μελλοντική συμβολή τους στο φαινόμενο, καθώς, είναι και δύσκολος ο περιορισμός τους.

- **Βιομόρια:** Πρόκειται για ουσίες που παράγουν ή χρησιμοποιούν οι έμβιοι οργανισμοί, όπως είναι οι βιταμίνες, τα ιχνοστοιχεία, οι ορμόνες, τα αμινοξέα, κ.λπ. Ρύποι θεωρούνται τα βιομόρια που, με την είσοδό τους στον ανθρώπινο οργανισμό, αποτελούν απειλή για αυτόν, όπως είναι οι ιοί και κάποια βακτήρια, που αναπτύσσονται είτε φυσικά είτε σε εργαστήρια, και μπορούν να προκαλέσουν ποικιλία προβλημάτων, ανάλογα τη φύση τους ή το όργανο προσβολής.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι υπάρχει πληθώρα αέριων ρύπων που απειλούν άμεσα τον άνθρωπο, κυρίως με ασθένειες του καρδιοαναπνευστικού συστήματος αλλά και καρκινογενέσεις, και έμμεσα εντείνοντας κυρίως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την όξινη βροχή και την καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Όμως, δεν έχει γίνει ακόμη σαφής η έκταση του κινδύνου στον οποίο εκτίθεται καθημερινά η ανθρωπότητα εξαιτίας της ρύπανσης αυτής. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται πίνακας με κατάταξη του ετήσιου αριθμού θανάτων ανά εκτιμώμενη αιτία, με βάση στατιστικά στοιχεία από σχετική μελέτη του πανεπιστημίου της Οξφόρδης [5].

Number of deaths by risk factor, World, 2019

Total annual number of deaths by risk factor, measured across all age groups and both sexes.



Source: IHME, Global Burden of Disease (2019)

OurWorldInData.org/causes-of-death • CC BY

Εικόνα 1: Ετήσιος αριθμός θανάτων παγκοσμίως ανά προκαλούσα αιτία. [5]

Από την Εικόνα 1 προκύπτει ότι η αέρια ρύπανση είναι η 3^η κατά σειρά αιτία θανάτων παγκοσμίως (έναντι 4^{ης}, που ήταν έως το 2017), όπως προέκυψε από μελέτη θανάτων ανθρώπων κάθε ηλικίας και φύλου κατά το έτος 2019, ενώ μελέτη του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (World Health Organization - WHO) αναφέρει ότι ο αριθμός αυτός πλέον κυμαίνεται στα 7.000.000 ετησίως. Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών αναφέρει ότι 1 στους 9 θανάτους παγκοσμίως οφείλεται στην αέρια ρύπανση [26].

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας αναφέρει επίσης ότι οι ρύποι με την μεγαλύτερη ευθύνη για τους σχετικούς θανάτους είναι τα μικροσωματίδια (particulate matter), εκ των οποίων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα πιο επικίνδυνα, παρότι λιγότερα ως ποσοστό του συνόλου των μικροσωματιδίων, είναι αυτά με διάμετρο μικρότερη των 10 μm, όπως είναι τα σωματίδια αιθάλης (soot) στα καυσαέρια, καθώς και το όζον, που είναι κύριο συστατικό του φωτοχημικού νέφους, και παράγεται με τη βοήθεια και την παρουσία NO_x και ηλιακού φωτός κατά την οξείδωση CO, CH₄ ή άλλων πτητικών ενώσεων, τα οξειδία του αζώτου (NO_x) και τα οξειδία του θείου (SO_x). Για την παραγωγή αυτών των αερίων το μεγαλύτερο μέρος ευθύνης έχει η ανθρώπινη δραστηριότητα. Ειδικότερα, η ναυτιλία έχει συμβολή στην παραγωγή όλων των παραπάνω ρύπων.

1.2.2. Εξέλιξη παραγωγής ρύπων

Οι αέριοι ρύποι σαφώς δεν ήταν πάντα τόσο αυξημένοι, ούτε και η ύπαρξή τους ήταν και κύρια αιτία θνησιμότητας, καθώς η παρουσία τους οφειλόταν στο εξωτερικό περιβάλλον και σε φυσικές δραστηριότητες, οι οποίες παρήγαγαν χαμηλά ποσοστά ρύπων σε μόνιμη βάση, και αυξάνονταν περιστασιακά σε περιόδους φυσικών καταστροφών ή ατυχημάτων σε ορυχεία, και κυρίως στην οικιακή ρύπανση από χρήση, καύση ή υπερθέρμανση υλικών επιβαρυντικών για τους πνεύμονες. Η αύξηση της ρύπανσης από τον ανθρώπινο παράγοντα είναι συνυφασμένη με την ανάγκη του για αύξηση της παραγωγής σε κάθε επίπεδο αναγκών και τη συσχέτιση της παραγωγής με τη χρήση φθηνότερης ενέργειας. Η αύξηση της ρύπανσης τις τελευταίες δύο εκατονταετίες είναι αποτέλεσμα πολλών δράσεων και ιστορικών εξελίξεων, και μόνο υποθέσεις μπορούν να γίνουν ώστε να παραχθεί πληροφορία για την ποσοτικοποίησή της, μια και δεν υπάρχουν μετρήσεις σύγχρονες των ιστορικών περιόδων.

Είναι σαφές ότι η βιομηχανική επανάσταση ήταν το ορόσημο για την αρχή της μαζικής παραγωγής, και η μαζική παραγωγή βασίζεται σε κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε αρχικά η βιομηχανική επανάσταση (1760-1860) για να αυξήσει την παραγωγή της ήταν πρώτες ύλες και εργατικό δυναμικό. Όταν ο ανταγωνισμός αποδείχθηκε μη βιώσιμος για τους ιδιοκτήτες και τα εργατικά χέρια απαιτητικά στο θέμα των εξόδων, οι μηχανές έδωσαν ένα είδος λύσης στο πρόβλημα των μειωμένων κερδών. Η ανάγκη για μηχανοποίηση οδήγησε στην εφεύρεση των ατμομηχανών, βασισμένων στην καύση κάρβουνου, και το 1830 την κατασκευή του πρώτου ατμοκίνητου τρένου. Η ανάπτυξη αυτή έφερε την επανάσταση στις μεταφορές, αλλά όχι μόνο. Ήταν η αρχή για την ευρύτερη χρήση της μεθόδου μετασχηματισμού ενέργειας από τη χημική των καυσίμων σε μηχανική. Από τότε, και φυσικά με την εξέλιξη των μηχανών και την ευρύτερη χρήση τους, ξεκινάει και η αύξηση των αέριων ρύπων ως αποτέλεσμα της καύσης ορυκτών καυσίμων. Το επόμενο βήμα ήταν η συνεργασία της μηχανικής με τον ηλεκτρισμό που άρχισε να ανακαλύπτεται στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, με την εφεύρεση της ηλεκτρικής μηχανής το 1821 και τις θεωρίες του ηλεκτρομαγνητισμού το 1862. Πλέον, η μηχανική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί εύκολα από την καύση πρώτων υλών μπορεί να μετασχηματιστεί σε ηλεκτρισμό. Κατά τη 2^η βιομηχανική επανάσταση, γίνεται φανερό ότι ο ηλεκτρισμός είναι μια 'εύκολη' μορφή ενέργειας, που μετασχηματίζεται χωρίς μεγάλες απώλειες, σε μηχανική, θερμική κ.λπ. Πρώτα η ανάγκη για φωτισμό δημιούργησε την απαίτηση εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και στη συνέχεια η ευρεία χρήση ηλεκτρικών μηχανών ενέτεινε την ανάγκη αυτή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σαφώς στην καύση πρώτων υλών και κυρίως στερεών ορυκτών καυσίμων, που είναι από τα πιο ρυπογόνα καύσιμα.

Σημείο σταθμός σ' αυτή την ταυτόχρονη αύξηση της παραγωγής και των ρύπων είναι η εισαγωγή στην αγορά και η ευρύτερη χρήση του πετρελαίου και των λοιπών ρευστών καυσίμων ως πρώτη ύλη για παραγωγή ενέργειας. Την πρωτοκαθεδρία στις πρώτες εξορύξεις πετρελαίου είχαν οι ΗΠΑ το 19^ο αιώνα με 1.500 πετρελαϊκές εταιρείες να λειτουργούν το 1902. Η πρώτη εξόρυξη πετρελαίου έγινε το 1859 με βοήθεια ατμομηχανής [6]. Λόγω της υψηλής ενεργειακής δύναμης αυτού και των αποσταγμάτων του αλλά και των πολλαπλών χρήσεών του, το πετρέλαιο αποτέλεσε και αποτελεί μεγάλη πηγή κέρδους, δεδομένου ότι όλη η βιομηχανική παραγωγή πλέον βασίζεται κυρίως στα καύσιμα. Η σταδιακή αύξηση της παρουσίας του πετρελαίου στις αγορές έριξε την τιμή του και τα κέρδη των πετρελαιοπαραγωγών. Έτσι, αυτοί αναγκάστηκαν να επενδύσουν σε έρευνες βελτιστοποίησης των καυσίμων, παράγοντας έτσι αποδοτικότερα αποστάγματα με υψηλότερη θερμογόνο ικανότητα, που, εν αγνοία τους, ήταν και πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Μάλιστα, η αύξηση της χρήσης του πετρελαίου σχετίζεται με την εφεύρεση της μηχανής εσωτερικής καύσης και τη χρήση της στις μεταφορές, που άρχισαν να γνωρίζουν άνθιση. Συνεπώς, με την ευρύτερη χρήση ρευστών καυσίμων η παραγωγή αυξάνεται, οι ρύποι όμως αυξάνονται με μικρότερο ρυθμό, αφού πλέον η παραγωγή δεν βασίζεται μόνο στα στερεά καύσιμα.

Το ποσοστό των ρύπων παύει να είναι αποτέλεσμα και έρμαιο του κέρδους όταν η ανθρώπινη κοινότητα αντιλαμβάνεται ότι η αέρια ρύπανση σχετίζεται με πολλές ασθένειες, και συνειδητοποιεί ότι είναι απαραίτητο να αναλάβει δράση. Το μεγαλύτερο ατύχημα διαρροής βιομηχανικών αερίων από αμερικάνικο εργοστάσιο σκότωσε 3787 ανθρώπους και τραυμάτισε 500.000-600.000 στην Ινδία το 1984, ακολουθούμενο από έκδοση νομοθεσίας από την Ινδία για επιβολή προστίμων σε περιπτώσεις διαρροών επικίνδυνων ουσιών από εργοστάσια, που στόχο είχε την αποζημίωση των πληγέντων, όμως δεν εκδόθηκε καθολικός περιορισμός ρύπανσης του αέρα. Δεν λήφθηκαν μέτρα ούτε όταν η διαρροή βακτηρίου από βιολογικό ερευνητικό εργαστήριο στη Σοβιετική Ένωση προκάλεσε το θάνατο 64 ατόμων το 1979, καθώς ο θάνατός τους αποδόθηκε σε μολυσμένο κρέας της περιοχής. Αφού το Λονδίνο καλύφθηκε από πυκνό στρώμα νέφους ελλείπει αέρα και αυξημένης καύσης κάρβουνου στις 4 Δεκεμβρίου 1952, προκαλώντας τον θάνατο 4.000 ανθρώπων μέσα σε 6 μέρες (πιο σύγχρονες έρευνες ανεβάζουν τον αριθμό σε 12.000), το αγγλικό κοινοβούλιο εξέδωσε τους

πρώτους περιοριστικούς κανονισμούς για το νέφος και το διοξείδιο του θείου το 1956, που απαγόρευαν τη χρήση καυσίμων που παρήγαγαν καπνό σε ορισμένες πόλεις. Αυτό ανάγκασε τις πόλεις να βασιστούν στον ηλεκτρισμό για την κάλυψη των αναγκών τους, που όμως δεν σήμαινε και τη μείωση της ρύπανσης, καθώς οι μονάδες παραγωγής ενέργειας, που αναγκάστηκαν να μεταφερθούν από τις πόλεις σε αγροτικές και λιγότερο πολυπληθείς περιοχές, συνέχιζαν να μολύνουν τον αέρα. Παράλληλα, εκκίνησαν συζητήσεις αναφορικά με την αποθείωση των καυσίμων ή τη χρήση φίλτρων, αλλά η οικονομία δεν επέτρεπε την ευρεία υιοθέτηση τέτοιων μέτρων. Ακολούθησαν και άλλα παρόμοια επεισόδια, όπως αυτό του 1962 κατά το οποίο έχασαν τη ζωή τους 750 άτομα. Στις ΗΠΑ, η Ντονόρα της Πεννσυλβάνια καλύφθηκε τον Οκτώβριο του 1948 από πυκνό στρώμα σκόνης αποτελούμενο από μονοξειδίο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και μεταλλική σκόνη από τις κοντινές μονάδες παραγωγής χάλυβα και τήξης ψευδαργύρου. Το συγκεκριμένο συμβάν προκάλεσε τον θάνατο 40 ατόμων, και δημιούργησε προβλήματα σε παραπάνω από 14.000 [8], κρούοντας τον κώδωνα του κινδύνου στις ΗΠΑ, καθιστώντας σαφή τη συσχέτιση της αέριας ρύπανσης από την ανθρώπινη δραστηριότητα με την υγεία της ανθρωπότητας. Μετά από ευρεία δημοσιοποίηση του συμβάντος, το Κογκρέσο εξέδωσε τις πρώτες απαγορεύσεις το 1970, περίπου 20 χρόνια μετά.

Η αλήθεια είναι ότι είναι δύσκολη, ακόμα και σήμερα, που είναι γνωστοί σε μεγάλο βαθμό οι κίνδυνοι που εγκυμονεί η σύντομη αλλά και χρόνια έκθεση σε αέριους ρύπους, η εφαρμογή άμεσων κανονισμών για τη μείωσή τους. Αυτό συμβαίνει γιατί η αέρια ρύπανση είναι πολυπαραγοντική, και πολλοί κλάδοι της οικονομίας συμβάλλουν σε αυτή. Ο περιορισμός των ρύπων μέσω κανονισμών σε κάθε παράγοντα ρύπανσης δεν είναι ισόποσος ή ακριβοδίκαιος, γιατί εξαρτάται από τη χρησιμότητά του και τη θέση του στην οικονομία καθώς και από τις τεχνολογίες περιορισμού των ρύπων που έχουν αναπτυχθεί σε κάθε κλάδο. Για παράδειγμα, είναι εφικτή η απαγόρευση της χρήσης φρέον σε συστήματα ψύξης, ή η απαγόρευση χρήσης αμιάντου σε κτίρια, δεν είναι όμως εφικτή η απαγόρευση καύσης λιγνίτη σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού, τουλάχιστον όχι ακόμα, παρότι αυτή είναι αιτία πολύ μεγαλύτερης ρύπανσης. Ταυτόχρονα, η βαρύτητα των κανονισμών σχετίζεται άμεσα με την εξέλιξη των τεχνολογιών μείωσης ρύπων και την οικονομία. Δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η χρήση τεχνολογιών προστασίας του περιβάλλοντος είναι δαπανηρή για τις επιχειρήσεις, οι κυβερνήσεις σχεδιάζουν τους κανονισμούς έτσι ώστε να είναι ρεαλιστική και εφικτή η συμμόρφωση με αυτούς. Συχνά, οι απαγορεύσεις δεν έχουν κύριο στόχο τον παράγοντα με τη μεγαλύτερη ευθύνη, αλλά εστιάζουν σε αυτούς που είναι ρεαλιστικά δυνατό να αντιμετωπισθούν, από άποψη τεχνολογίας και οικονομίας.

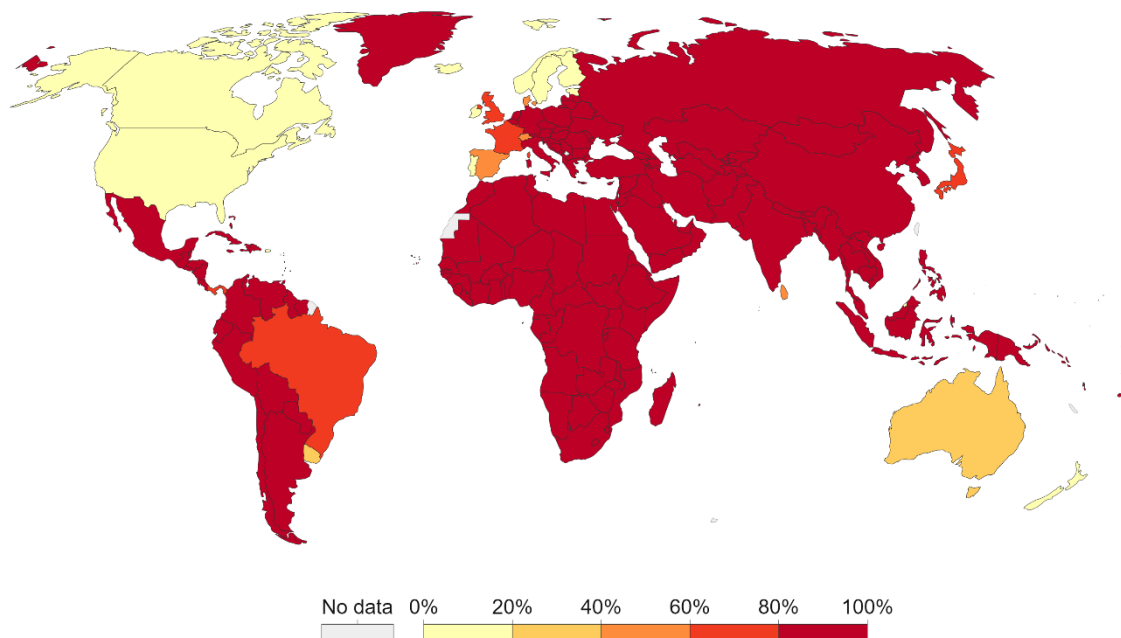
Συνεπώς δεν υπάρχει οργανισμός ή κυβέρνηση που να ορίζει ότι απαγορεύεται γενικότερα η υπέρβαση ορίων ρύπανσης, καθώς κάτι τέτοιο απαιτεί συνεργασία του συνόλου των παραγόντων παραγωγής τους σε διεθνές επίπεδο, καθώς οι περισσότεροι ρύποι δεν είναι στατικοί. Διάφοροι οργανισμοί είναι υπεύθυνοι παγκοσμίως για τη μέτρηση των ρύπων, τη μελέτη της συσχέτισής τους με την ανθρώπινη υγεία και την πρόταση ορίων ρύπων ώστε το περιβάλλον και οι άνθρωποι να αναπτύσσονται χωρίς μεγάλο ρίσκο καταστροφής. Σε κάθε περίπτωση, η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ευθύνη του κάθε ρυπογόνου παράγοντα απέναντι στη μόλυνση του αέρα αλλά και η ευθύνη του κάθε ρύπου για τους ετήσιους θανάτους ή άλλα προβλήματα υγείας, δεν είναι εύκολη διαδικασία, απαιτεί συλλογή πολλών στοιχείων και στατιστικών, και δεν μπορεί να είναι απόλυτα ακριβής. Παράδειγμα τέτοιων οργανισμών είναι ο Οργανισμός Περιβαλλοντικής Προστασίας των ΗΠΑ (United States Environmental Protection Agency (EPA)), που έχει ορίσει τα επιθυμητά όρια National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) για αρκετούς ρύπους. Εν γνώσει των οργανισμών αυτών, κάθε κυβέρνηση ορίζει σε κάθε ρυπογόνο φορέα συγκεκριμένα πρότυπα εκπομπών αερίων, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Τα πρότυπα αυτά προκύπτουν είτε ποσοτικά, απαγορεύοντας άμεσα την υπέρβαση ενός συγκεκριμένου ορίου εκπομπών ρύπων σε κάθε εγκατάσταση, ώστε οι συνολικές εκπομπές να είναι ανεκτές, είτε τεχνολογικά, επιβάλλοντας σε κάθε εγκατάσταση τη χρήση συγκεκριμένων τεχνολογιών μείωσης ρύπων, χωρίς όμως συνήθως να απορρίπτεται κάποια διαφορετική τεχνολογία που έχει τα ίδια αποτελέσματα, είτε συγκριτικά, θέτοντας ως πρότυπο λειτουργίας και εκπομπών την εγκατάσταση με τους χαμηλότερους ρύπους. Όπως προαναφέρθηκε, τα πρότυπα είναι απόφαση της κάθε κυβέρνησης και δεν συνιστούν απαραίτητα την καλύτερη λύση για το περιβάλλον, αλλά διαμορφώνουν μια εύθραυστη ισορροπία μεταξύ περιβάλλοντος και οικονομίας.

Καταδεικτικό του παραπάνω είναι το γεγονός ότι, παρότι τα πρότυπα παγκοσμίως τηρούνται θεωρητικά, τα επιθυμητά όρια ρύπανσης δεν έχουν ακόμα επιτευχθεί, πράγμα που σημαίνει ότι τα πρότυπα πρέπει να γίνουν πιο αυστηρά, με δικαιοσύνη προς τους διαφορετικούς φορείς, και λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των εγκαταστάσεων του κάθε παράγοντα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2**, αναφορικά με το ποσοστό του πληθυσμού που εκτίθεται σε μικροσωματίδια, σε συγκεντρώσεις υψηλότερες από το θεσπισμένο όριο του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας [5]. Διαπιστώνεται ότι χώρες

αραιοκατοικημένες και μεγάλες σε έκταση είναι αυτές με το χαμηλότερο ποσοστό κατοίκων που εκτίθενται σε βλαβερά μικροσωματίδια.

Share of the population exposed to air pollution levels above WHO guidelines, 2017

The share of the population exposed to outdoor concentrations of particulate matter (PM_{2.5}) that exceed the WHO guideline value of 10 micrograms per cubic meter per year. 10μg/m³ represents the lower range of WHO recommendations for air pollution exposure over which adverse health effects are observed.



Source: Brauer et al. (2017) via World Bank

OurWorldInData.org/outdoor-air-pollution • CC BY

Εικόνα 2: Ποσοστό του εγχώριου πληθυσμού που εκτίθεται σε μικροσωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2.5 μm σε συγκέντρωση υψηλότερη του ορίου των 10 μg/m³ του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO), κατά το έτος 2017 [5].

1.2.3. Ισχύουσες νομοθεσίες και παγκόσμια κατανομή ρύπων

Δεδομένης τη δυσκολίας, της υποκειμενικότητας και των αντικρουόμενων συμφερόντων που διέπουν το ζήτημα της μείωσης των ρύπων, δεν είναι ενδεδειγμένο αυτό να αφηθεί στη διαχείριση του κάθε κράτους ξεχωριστά. Για τον λόγο αυτόν, παρόλο που δεν υπάρχει παγκόσμια νομοθεσία, υπάρχουν θεσμοθετημένες επιτροπές που θέτουν όρια σε διεθνές επίπεδο.

Η πρώτη τέτοια επιτροπή (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP)) [10] ορίστηκε το 1979 στη Γενεύη από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών, περιλαμβάνοντας 51 κράτη από την Ευρώπη, τη Β. Αμερική και την Ευρασία (Ρωσία, Τουρκία και κράτη του Καυκάσου), με στόχο τη συνεχή προσπάθεια μείωσης ρύπων, σε επίπεδο οικονομίας, έρευνας και ανάπτυξης τεχνολογιών. Τα επόμενα χρόνια, η επιτροπή αυτή εξέδωσε διάφορα πρωτόκολλα [9], τα οποία παρουσιάζονται ακολούθως.

1. Στο Ελσίνκι, το 1985, όρισε τη μείωση των ετήσιων εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x) κατά 30% έως το 1993, θεωρώντας ως βάση για τον υπολογισμό τις ετήσιες εκπομπές του έτους 1980, και απαιτώντας από τα κράτη συνεχή προσπάθεια μείωσης και ετήσια υποβολή αναφοράς των εθνικών εκπομπών τους. Στο πρωτόκολλο συμμετείχαν 25 ευρωπαϊκές χώρες, μεταξύ άλλων η Ρωσία και ο Καναδάς, αλλά όχι η Ελλάδα [11][12]. Το 1994 ακολούθησε πρωτόκολλο στο Όσλο για περαιτέρω μείωση, μιας και τα κράτη ανέφεραν ότι είχαν επιτύχει το στόχο τους, και αυτή τη φορά με συμμετοχή 29 ευρωπαϊκών και μη κρατών, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, του Καναδά και της Ρωσίας [197][198]. Σύμφωνα με αυτό, τα κράτη είναι υποχρεωμένα να προωθούν τη χρήση καυσίμων με χαμηλά ποσοστά θείου, ώστε να είναι οικονομικά εφικτή η ευρεία

χρήση τους, να λάβουν μέτρα για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας, την αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη χρήση τεχνολογιών μείωσης οξειδίων του θείου. Επιπλέον, το πρωτόκολλο ορίζει ότι οι μονάδες παραγωγής ενέργειας, ανάλογα με το μέγεθός τους, δεν πρέπει να υπερβαίνουν συγκεκριμένα όρια εκπομπών που ορίζονται στο πρωτόκολλο. Οι κανονισμοί πλέον είναι πιο αυστηροί και κυρίως πιο συγκεκριμένοι, μην αφήνοντας το περιθώριο σε κάθε κράτος να κρίνει μόνο του τα πρότυπα που θα εκδώσει.

Table 1
Emission ceilings for sulphur (thousands of tonnes of SO₂ per year)

| Party | Emission levels | | Emission ceilings for 2010 | Percentage emission reductions for 2010 (base year 1990) |
|--|-----------------|--------------------|----------------------------|--|
| | 1980 | 1990 | | |
| Armenia | 141 | 73 | 73 | 0% |
| Austria | 400 | 91 | 39 | -57% |
| Belarus | 740 | 637 | 480 | -25% |
| Belgium | 828 | 372 | 106 | -72% |
| Bulgaria | 2050 | 2008 | 856 | -57% |
| Canada national ^a | 4643 | 3236 | | |
| PEMA (SOMA) | 3135 | 1873 | | |
| Croatia | 150 | 180 | 70 | -61% |
| Cyprus ^a | 28 | 46 | 39 | -15% |
| Czech Republic | 2257 | 1876 | 283 | -85% |
| Denmark | 450 | 182 | 55 | -70% |
| Finland | 584 | 260 | 116 | -55% |
| France | 3208 | 1269 | 400 | -68% |
| Germany | 7514 | 5313 | 550 | -90% |
| Greece | 400 | 509 | 546 | 7% |
| Hungary | 1633 | 1010 | 550 | -46% |
| Ireland | 222 | 178 | 42 | -76% |
| Italy | 3757 | 1651 | 500 | -70% |
| Latvia | - | 119 | 107 | -10% |
| Liechtenstein | 0.39 | 0.15 | 0.11 | -27% |
| Lithuania | 311 | 222 | 145 | -35% |
| Luxembourg | 24 | 15 | 4 | -73% |
| Netherlands | 490 | 202 | 50 | -75% |
| Norway | 137 | 53 | 22 | -58% |
| Poland | 4100 | 3210 | 1397 | -56% |
| Portugal | 266 | 362 | 170 | -53% |
| Republic of Moldova | 308 | 265 | 135 | -49% |
| Romania | 1055 | 1311 | 918 | -30% |
| Russian Federation ^b | 7161 | 4460 | | |
| PEMA | 1062 | 1133 | 635 | -44% |
| Slovakia | 780 | 543 | 110 | -80% |
| Slovenia | 235 | 194 | 27 | -86% |
| Spain ^b | 2959 | 2182 | 774 | -65% |
| Sweden | 491 | 119 | 67 | -44% |
| Switzerland | 116 | 43 | 26 | -40% |
| The former Yugoslav Republic of Macedonia ^c | - | 139.7 | 110 | -21% |
| Ukraine | 3849 | 2782 | 1457 | -48% |
| United Kingdom | 4863 | 3731 | 625 | -83% |
| United States of America ^a | - | 20875 ^d | ^d | ^d |
| European Community | 26456 | 16436 | 4059 | -75% |

Εικόνα 3: Εκπομπές διοξειδίου του θείου για τις χώρες που συμμετείχαν στο πρωτόκολλο του Ελσινκι [199].

2. Το πρωτόκολλο του 1988 υπογράφηκε στη Σόφια μεταξύ 36 χωρών (όπως αυτές συμμετέχουν και σήμερα), συμπεριλαμβανομένης της Ε.Ε., του Καναδά, της Ρωσίας και των ΗΠΑ, θέτοντας τον όρο να υπάρξει επόμενο πρωτόκολλο που θα θέτει σαφείς περιορισμούς των ρύπων και θα λαμβάνει υπόψη τις καινοτόμες τεχνολογίες της μείωσης

ρύπων [13]. Τέθηκε σε εφαρμογή από το 1991, και αφορά στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) με οποιονδήποτε τρόπο έως το 1996, με όρια χαμηλότερα από αυτά του έτους 1987. Επιπλέον, μέσα στα επόμενα δύο χρόνια από την υπογραφή του κάθε κράτους, αυτό όφειλε, λαμβάνοντας υπόψη την εθνική του οικονομία, την τεχνολογική του ανάπτυξη και την εφικτότητα, να εκδώσει πρότυπα εκπομπών και κρίσιμα όρια περιορισμού των εκπομπών NO_x των νέων μονάδων παραγωγής ενέργειας και των οχημάτων, και μέτρα που θα αφορούν στις υπάρχουσες μεγάλες μονάδες. Επιπλέον, τα μέτρα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις παγκόσμιες προσπάθειες και τα επιτεύγματα σε όρια ρύπων και τεχνολογιών, και αντίστοιχα να συμμορφώνονται σε εθνικό επίπεδο, στον βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Μάλιστα, η συνεργασία εταιρειών και η ανταλλαγή τεχνογνωσίας και προϊόντων ορίζεται ρητά. Μεταξύ άλλων, το πρωτόκολλο υποχρέωνε τα κράτη να εισάγουν ευρέως στην αγορά, με οποιονδήποτε τρόπο, την αμόλυβδη βενζίνη, να αναπτύξουν σύστημα μέτρησης των ρύπων και ερευνών σχετικά με το αντίκτυπο στην υγεία και το περιβάλλον, και να βρουν λογικά όρια λειτουργίας των μονάδων στα οποία θα υπάρχει συμφωνία με τα πρότυπα εκπομπών, χωρίς να πλήττεται η οικονομία [14]. Αναφέρεται ότι η Ελλάδα υπέγραψε το συγκεκριμένο πρωτόκολλο το 1998, 10 χρόνια μετά τη σύνταξή του.

Table 2. Emission ceilings for nitrogen oxides (thousands of tonnes of NO_x per year)

| Party | Emission levels 1990 | Emission ceilings for 2010 | Percentage emission reductions for 2010 (base year 1990) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|--|
| Armenia | 46 | 46 | 0% |
| Austria | 194 | 107 | -45% |
| Belarus | 285 | 255 | -11% |
| Belgium | 339 | 181 | -47% |
| Bulgaria | 361 | 266 | -26% |
| Canada a/ | 2104 | | |
| Croatia | 87 | 87 | 0% |
| Czech Republic | 742 | 286 | -61% |
| Denmark | 282 | 127 | -55% |
| Finland | 300 | 170 | -43% |
| France | 1882 | 860 | -54% |
| Germany | 2693 | 1081 | -60% |
| Greece | 343 | 344 | 0% |
| Hungary | 238 | 198 | -17% |
| Ireland | 115 | 65 | -43% |
| Italy | 1938 | 1000 | -48% |
| Latvia | 93 | 84 | -10% |
| Liechtenstein | 0.63 | 0.37 | -41% |
| Lithuania | 158 | 110 | -30% |
| Luxembourg | 23 | 11 | -52% |
| Netherlands | 580 | 266 | -54% |
| Norway | 218 | 156 | -28% |
| Poland | 1280 | 879 | -31% |
| Portugal | 348 | 260 | -25% |
| Republic of Moldova | 100 | 90 | -10% |
| Romania | 546 | 437 | -20% |
| Russian Federation b/ | 3600 | | |
| PEMA | 360 | 265 | -26% |
| Slovakia | 225 | 130 | -42% |
| Slovenia | 62 | 45 | -27% |
| Spain b/ | 1113 | 847 | -24% |
| Sweden | 338 | 148 | -56% |
| Switzerland | 166 | 79 | -52% |
| Ukraine | 1888 | 1222 | -35% |
| United Kingdom | 2673 | 1181 | -56% |
| United States of America c/ | | | |
| European Community | 13161 | 6671 | -49% |

Εικόνα 4: Εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) για τις χώρες που συμμετείχαν στο πρωτόκολλο της Σόφιας [199].

3. Το 1991, συντάσσεται πρωτόκολλο για τον περιορισμό των οργανικών πτητικών ενώσεων (Volatile Organic Compounds – VOCs) [17][18].
4. Το 1998, υπογράφηκε από 34 χώρες στη Δανία το πρωτόκολλο βαρέων μετάλλων [19][20].
5. Το 1998, υπογράφηκε μεταξύ 33 χωρών στη Δανία πρωτόκολλο για μείωση επιμενόντων οργανικών ρύπων στον αέρα, με ισχύ από το 2003 [21][22].
6. Το 1999, 28 χώρες υπογράφουν στη Σουηδία πρωτόκολλο για τον περιορισμό της οξείδωσης, της υπερτροφίας και της παρουσίας του όζοντος στην τροπόσφαιρα.
7. Ένα επίσης σημαντικό πρωτόκολλο υπογράφηκε στο Aarhus της Δανίας, στις 25 Ιουνίου του 1998, και τέθηκε σε ισχύ από το 2001 με συμμετοχή 47 ευρωπαϊκών και ασιατικών χωρών. Το πρωτόκολλο αυτό είναι, όπως και τα άλλα, ανοιχτό προς υπογραφή για όλα τα κράτη των Ηνωμένων Εθνών. Παρότι δεν θέτει περιβαλλοντικούς περιορισμούς στα

συμμετέχοντα κράτη και στις βιομηχανίες παραγωγής ρύπων τους, είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς απευθύνεται στον πολίτη και του εξασφαλίζει την ελεύθερη πρόσβαση σε πληροφορίες και επιστημονικά δεδομένα σχετικά με περιβαλλοντικά ζητήματα (κρίσιμα όρια, στατιστικά, κ.λ.π.), το δικαίωμά του στη λήψη αποφάσεων σχετικά με περιβαλλοντικά θέματα, καθώς και το δικαίωμά του να απευθυνθεί στη δικαιοσύνη σε υποψία παραβίασης συγκεκριμένων ορίων περιεκτικότητας υλικών, που αναφέρονται ρητά στο πρωτόκολλο [28]. Πρόκειται δηλαδή για μια κίνηση εξουσιοδότησης από τον Ο.Η.Ε. προς του πολίτες για άσκηση κριτικής προς τις κυβερνήσεις, και ένα μέσο ώστε η κυβέρνηση να λάβει αποφάσεις με μεγαλύτερη δικαιοσύνη προς όλους, και όχι με γνώμονα μόνο την επίτευξη του απαιτούμενου αποτελέσματος σε επίπεδο ορίων ρύπων. Το πρωτόκολλο αυτό συμπληρώθηκε το 2003 στο Κισινάου της Μολδαβίας από 37 ευρωπαϊκές χώρες, και τέθηκε σε ισχύ το 2009, αναφέροντας ότι τα στατιστικά περιεκτικότητας 86 ρυπογόνων ουσιών όπως οξείδια, αέρια του θερμοκηπίου, καταστροφείς του στρώματος του όζοντος, βαρέα μέταλλα και καρκινογόνες διοξίνες, οφείλουν να είναι διαθέσιμα και εύκολα προσβάσιμα στο διαδίκτυο. Αναφέρεται ότι σε αυτό το πρωτόκολλο η Ελλάδα δεν έχει επικυρώσει τη συμμετοχή της [29].

Τα επόμενα χρόνια έγιναν διορθώσεις και τροποποιήσεις στα υπάρχοντα πρωτόκολλα για τα βαρέα μέταλλα, το τροποσφαιρικό όζον και τους οργανικούς ρύπους, και κυρίως στα παραρτήματά τους, περιλαμβάνοντας περισσότερες ρυπογόνες ουσίες και αναθεωρώντας συνεχώς τα όριά τους, λαμβάνοντας υπόψη τις εξελισσόμενες τεχνολογίες περιορισμού τους αλλά και την πρόοδο των κρατών και το ποσοστό επίτευξης του στόχου.

Άλλη επιτροπή, επίσης ορισμένη από τα Ηνωμένα Έθνη, καλείται στη Βιέννη το 1985 για τη λήψη μέτρων για την προστασία του στρώματος του όζοντος, με το πρωτόκολλο να υπογράφεται το 1987 στο Μόντρεαλ από 198 χώρες, την πλειονότητα δηλαδή των χωρών παγκοσμίως [24][25], με την τελευταία τροποποίηση να γίνεται το 2016.

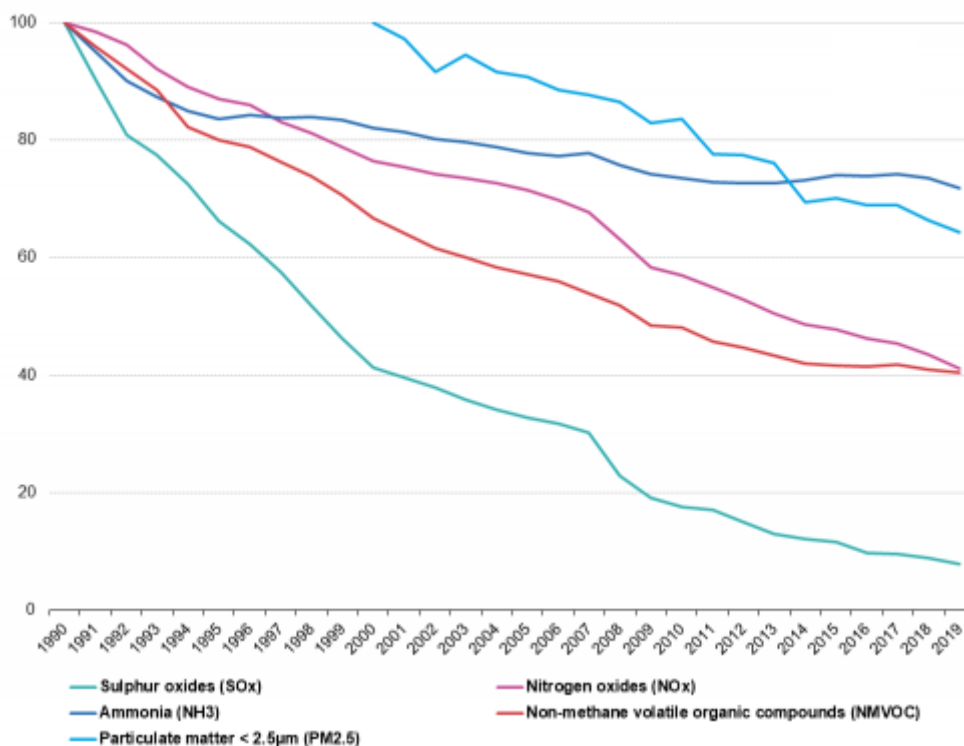
Το 1981, στο Μόντρεαλ, προστίθεται στο πρωτόκολλο της επιτροπής του Σικάγο των Ηνωμένων Εθνών, υπογεγραμμένο από 194 χώρες και σχετικό με τη διεθνή πολιτική αεροπορία, τροποποίηση που θέτει περιορισμούς στις εκπομπές ρύπων των αεροπορικών κινητήρων.

Το 1992, τα Ηνωμένα Έθνη συγκαλούν άλλη επιτροπή στη Νέα Υόρκη, αυτή τη φορά για τη διαχείριση του διοξειδίου του άνθρακα και των λοιπών αερίων του θερμοκηπίου. Σε αυτή την επιτροπή συμμετέχουν σήμερα 198 χώρες, με κύριες εξαιρούμενες την Τουρκία και το Ιράν.

Από μια γρήγορη ματιά στους διεθνείς κανονισμούς, αντιλαμβάνεται κανείς ότι αυτοί ξεκίνησαν επιβάλλοντας στα συμμετέχοντα κράτη τη μείωση συγκεκριμένων ρύπων, όμως χωρίς μεγάλη σαφήνεια, αφήνοντας σε κάθε κράτος περιθώριο να αποφασίσει τη μέθοδο που θα ακολουθήσει, σύμφωνα με τα δικά του κριτήρια. Με το πέρασμα των χρόνων, η εξέλιξη στη σχετική έρευνα, οι νέες γνώσεις και οι νέες τεχνολογίες μείωσης ρύπων αφήνουν το στίγμα τους και στους κανονισμούς, καθώς αυτοί γίνονται πιο αυστηροί, με σαφώς καθορισμένα όρια, και συγκεκριμένες προτάσεις τεχνολογιών που μπορούν να οδηγήσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Η αυστηρότητα αυτή δείχνει αναμφισβήτητα ότι, παρόλο που η μόλυνση του αέρα έχει μειωθεί με την εφαρμογή των μέτρων, ακόμη χρειάζεται μεγάλη συντονισμένη και προσηλωμένη προσπάθεια για να επιτευχθεί η καθαρότητα του αέρα, όπως αυτή ορίζεται από τους αρμόδιους οργανισμούς υγείας. Στην **Εικόνα 5** παρουσιάζεται η πορεία μείωσης των ρύπων στην Ευρώπη κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, σύμφωνα με καταγραφές της Eurostat, η οποία είναι απόρροια της εφαρμογής των προαναφερθέντων διεθνών κανονισμών στο σημαντικά μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης.

Emissions of air pollutants, EU-27, 1990-2019

(Index 1990=100)

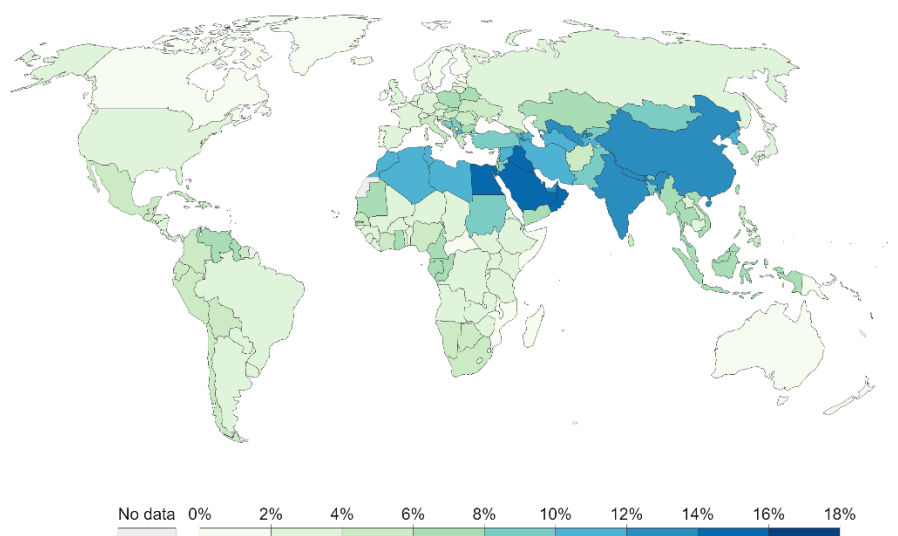


Εικόνα 5: Χρονική μεταβολή των ετήσιων εκπομπών αέριων ρύπων, ως ποσοστό των εκπομπών του έτους 1990 (EuroStat)[7].

Στα παραπάνω, αν και σαφώς θετικά, αποτελέσματα, δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι τα επιθυμητά όρια, όπως ορίζονται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), δεν έχουν ακόμα επιτευχθεί, και, σημαντικότερο, ότι οι κανονισμοί αυτοί δεν εφαρμόζονται παγκοσμίως, αλλά μόνο από μια ομάδα χωρών, που περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στις υπόλοιπες χώρες, το ποσοστό θανάτων που οφείλεται σε αέριους ρύπους να είναι υψηλό, βλ. **Εικόνα 6** για δεδομένα του 2019, στην οποία αποτυπώνεται μεγάλη επιβάρυνση για χώρες της Αφρικής και της Ασίας.

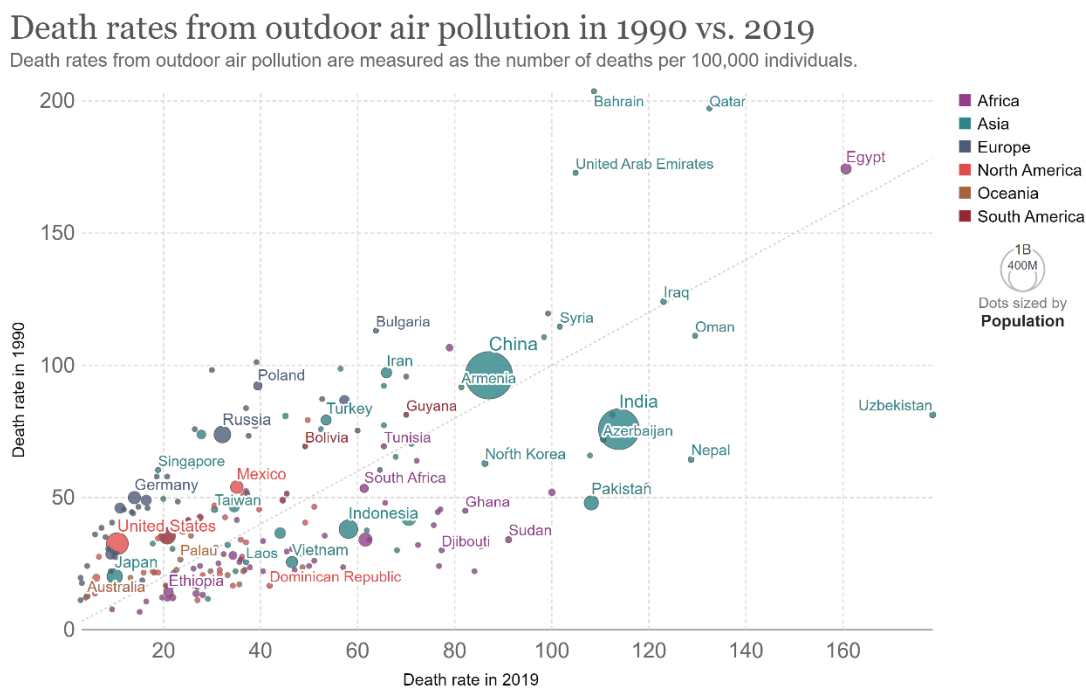
Share of deaths attributed to outdoor air pollution, 2019

Share of deaths, from any cause, which are attributed to outdoor air pollution – from ambient particulate matter and ozone – as a risk factor.



Εικόνα 6: Ποσοστό θανάτων οφειλόμενων στην αέρια ρύπανση ανά τον κόσμο, κατά το έτος 2019 [5].

Κυβερνήσεις χωρών με υπερπληθυσμούς, ασταθή καθεστώτα ή με χαμηλότερη οικονομική ανάπτυξη ενδιαφέρονται λιγότερο για την υγεία των πολιτών τους, δίνοντας έμφαση στην προσπάθεια στήριξης της οικονομίας, αντλώντας κέρδος από τη μη χρήση τεχνολογιών μείωσης της ρύπανσης, και προωθώντας την υπέρμετρη παραγωγή ενέργειας, σε βάρος του περιβάλλοντος. Η σημερινή κατάσταση παραπέμπει στην κατάσταση του Λονδίνου του 1960, όταν κανονισμοί απαγόρευσαν την καύση ρυπογόνων καυσίμων μέσα στην πόλη, αναγκάζοντας βιομηχανίες να μετακινηθούν στην επαρχία, μετακινώντας ταυτόχρονα και την παραγωγή των ρύπων, χωρίς προφανώς να λύνουν συνολικά το πρόβλημα. Η σημερινή κατάσταση δεν διαφέρει πολύ, εάν γίνει συνυπολογισμός της ρύπανσης από τις μεγάλες βιομηχανίες της Ευρώπης και της Αμερικής που βασίζουν την παραγωγή τους σε εργοστάσια εγκατεστημένα σε χώρες της Ασίας και της Αφρικής. Όπως αποτυπώνεται και στην **Εικόνα 7**, στην οποία παρουσιάζονται συγκριτικά στοιχεία για θανάτους οφειλόμενους στην ατμοσφαιρική ρύπανση για τα έτη 1990 και 2019, αρκετές αναπτυγμένες με ήδη σχετικά μικρό ποσοστό ρύπων (και θανάτων) παρουσίασαν βελτίωση, πολλές χώρες χαμηλότερου επιπέδου ανάπτυξης (και υψηλού ποσοστού θανάτων) παρουσίασαν επιδείνωση.



Εικόνα 7: Ετήσιος αριθμός θανάτων οφειλόμενων στην αέρια ρύπανση, ανά 100.000 κατοίκους, για διαφορετικές χώρες, για τα έτη 1990, 2019 [27].

Η κατάσταση αυτή είναι αναμενόμενη αλλά όχι και δικαιολογημένη. Τα άμεσα θύματα της ρύπανσης, που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού αυτών των χωρών, πιθανότατα δεν έχουν την απαραίτητη ενημέρωση και τη συνείδηση της επικινδυνότητας του αέρα που αναπνέουν, με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να ασκήσουν οποιαδήποτε πίεση ή να απαιτήσουν προστασία. Εξάλλου, είναι γεγονός ότι μόνο 47 χώρες έχουν υπογράψει τη συνθήκη του Aarhus, που εξασφαλίζει στον οποιονδήποτε την πρόσβαση σε περιβαλλοντικά δεδομένα. Οι κυβερνήσεις των χωρών αυτών, που επί πολλά χρόνια δεν έχουν δείξει προθυμία συμμετοχής σε διεθνή πρωτόκολλα ή δεν έχουν λάβει αυστηρά μέτρα για τη μείωση των ρύπων τους, προτάσσουν συχνά την οικονομία της χώρας τους σε σχέση με την υγεία των πολιτών τους. Από την άλλη μεριά, οι πολίτες του δυτικού κόσμου, προσηλωμένοι στην προσπάθειά τους να σώσουν τους εαυτούς τους και να μειώσουν τους ρύπους που τους πλήττουν άμεσα, δεν δείχνουν πάντα το απαιτούμενο ενδιαφέρον ή έχουν περιορισμένη ενημέρωση σχετικά με την αύξηση της ρύπανσης στις αναπτυσσόμενες χώρες, θεωρώντας συχνά ότι αυτές είναι μακριά, και η εκεί ρύπανση δεν απειλεί τους ίδιους. Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, που είχε και έχει πλήρη γνώση της κατάστασης, δεδομένης της επικινδυνότητας που μαρτυρούν τα στοιχεία που ο ίδιος εκδίδει για τους ρύπους, σκοπεύει να θεσπίσει ως ανθρώπινο δικαίωμα το δικαίωμα σε μη μολυσμένο αέρα [16].

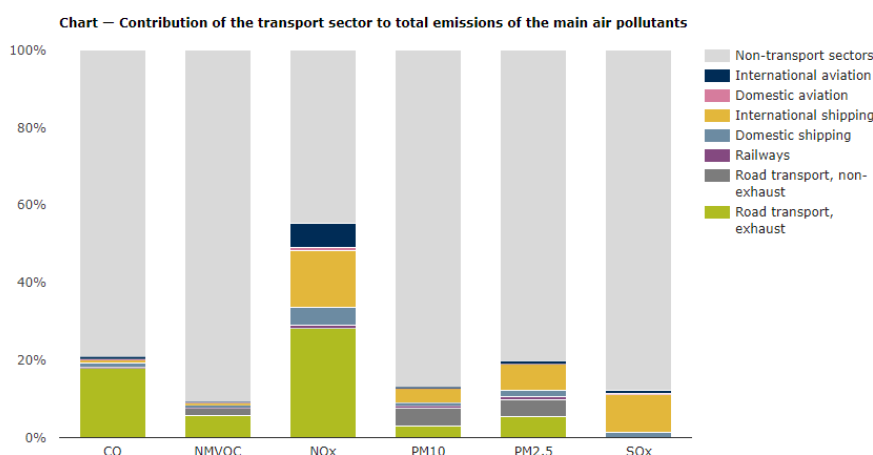
Το 2019, ο Ο.Η.Ε., με στοιχεία από μέλη-κράτη που αποδέχονται τους κανονισμούς του, εξέδωσε βιώσιμο πλάνο και πρόγραμμα αναφέροντας τις εξαιρετικές επιπτώσεις του καθαρού περιβάλλοντος σε όλους τους τομείς ανάπτυξης ενός κράτους. Σε προσπάθεια αύξησης της συμμετοχής των χωρών στο νέο πλάνο, αναφέρει μεταξύ άλλων ότι ~7 εκ. (~11.6 % του παγκόσμιου πληθυσμού) άνθρωποι πεθαίνουν λόγω μόλυνσης του αέρα επιφέροντας, ειδικά στις χώρες χαμηλού εισοδήματος, 2% μείωση της εγχώριας παραγωγής και 7%

αύξηση των ετήσιων εξόδων στον τομέα της υγείας. Μάλιστα, 9/10 του πληθυσμού είναι εκτεθειμένα καθημερινά σε ποσοστά αέριας ρύπανση άνω του ορίου του ΠΟΥ. Το πλάνο αυτό έχει ήδη τεθεί σε εφαρμογή με τη βοήθεια και τη συνεργασία των ειδικών οργανισμών του Ο.Η.Ε. με χρονικό όριο το 2030, αλλά ακόμα δεν έχουν εκδοθεί κανονισμοί προς τα κράτη ούτε έχει επικυρωθεί η συμμετοχή όλων των κρατών της υφελίου [30].

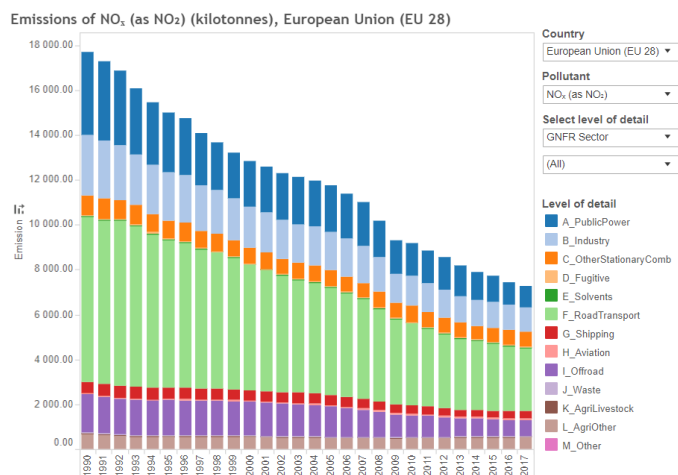
Φαίνεται λοιπόν ότι η μείωση των ρύπων είναι μια δύσκολη διαδικασία και ένα αρκετά λεπτό ζήτημα παγκοσμίως. Είναι προφανές ότι η ύπαρξη κανονισμών επιφέρει θετικά αποτελέσματα, αν και ακόμα δεν έχει επιτευχθεί το επιθυμητό όριο ρύπων. Γίνεται επομένως κατανοητό ότι οι κανόνες πρέπει να επεκταθούν σε όλες τις χώρες παγκοσμίως, προκειμένου όλοι οι άνθρωποι να απολαμβάνουν καθαρότερο αέρα. Αυτό είναι σαφώς δύσκολο, ιδιαίτερα αν οι χώρες δεν συνεργάζονται. Σε κάθε περίπτωση, οι κανονισμοί πρέπει να γίνουν πιο αυστηροί, και περισσότερο στοχευμένοι προς τους παράγοντες που συμβάλλουν περισσότερο στη ρύπανση του αέρα.

1.2.4. Η συμβολή της ναυτιλίας στην παγκόσμια αέρια ρύπανση

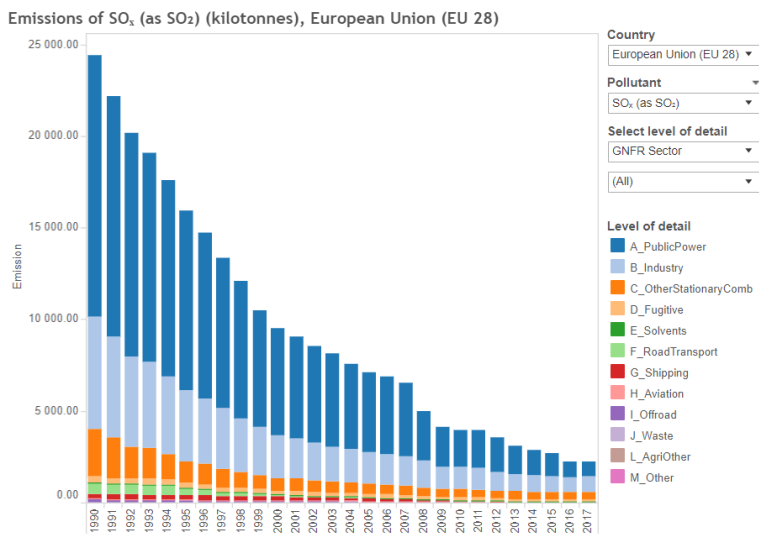
Προκειμένου να γίνει καλύτερη ομαδοποίηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων των κανονισμών και με απώτερο σκοπό τον ορθότερο προσανατολισμό και βελτιστοποίησή τους, ο Ο.Η.Ε. αιτεί από τα κράτη την ποσότητα των ρύπων που προέρχεται από κάθε παράγοντα που δρα στα σύνορά του, σε ετήσια βάση. Έτσι, είναι πιο εύκολη η σύγκριση των τομέων μεταξύ τους, πιο εύκολη η συλλογή των πληροφοριών από αυτούς, αλλά και η διαμόρφωση μιας περισσότερο πλήρους εικόνας του κάθε τομέα, συνυπολογίζοντας στους ρύπους και τις τεχνολογίες που έχει αναπτύξει κάθε τομέας καθώς και την οικονομική του κατάσταση. Σημειώνεται ότι οι παράγοντες κατηγοριοποιούνται με βάση το προϊόν παραγωγής τους [31]. Στην **Εικόνα 8** παρουσιάζεται διάγραμμα συμβολής των επιμέρους μέσων μεταφοράς στην αέρια ρύπανση, για διαφορετικές κατηγορίες ρύπων, ως ποσοστό της συνολικής αέριας ρύπανσης, ενώ στην **Εικόνα 9** δίνεται αντίστοιχη πληροφoρία ανά έτος και ανά τομέα.



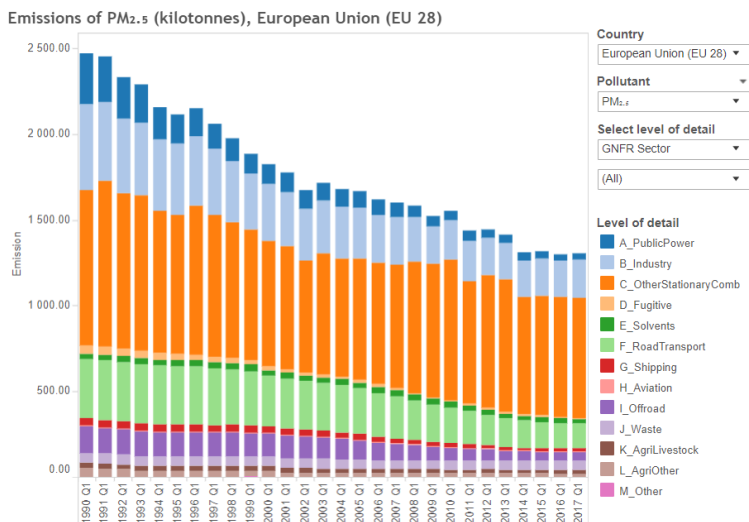
Εικόνα 8: Συμβολή των μέσων μεταφοράς στη συνολική αέρια ρύπανση της Ευρώπης [32].



The data presented in this data viewer uses the GNFR14 and NFR14 nomenclature and is the officially reported data submitted up to 20 June 2019.



The data presented in this data viewer uses the GNFR14 and NFR14 nomenclature and is the officially reported data submitted up to 20 June 2019.



The data presented in this data viewer uses the GNFR14 and NFR14 nomenclature and is the officially reported data submitted up to 20 June 2019.

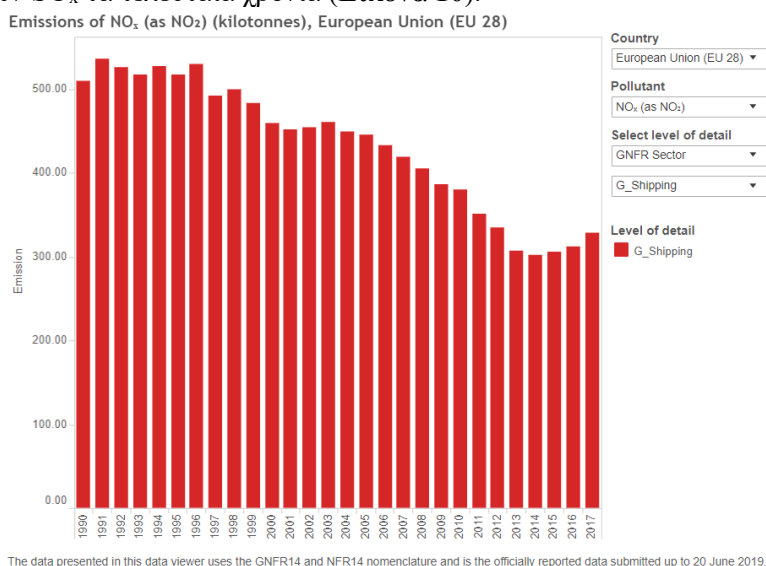
Εικόνα 9: Μείωση ρύπων ανά έτος και ανά τομέα.

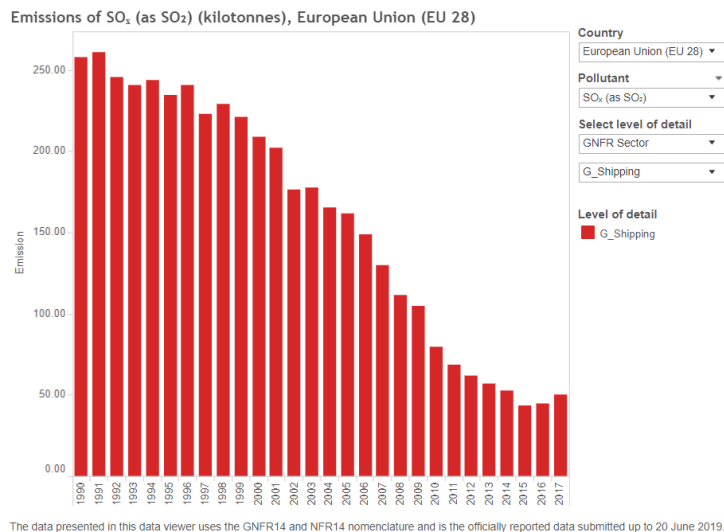
Από τις Εικόνες 8 και 9 προκύπτει ότι οι κυριότεροι τομείς ρύπανσης είναι οι παραγωγοί και διανομείς ηλεκτρισμού, οι οποίοι προκαλούν το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπανσης από SO_x, η οδική μετακίνηση και μεταφορά προϊόντων, που έχει τη μεγαλύτερη ευθύνη για τη ρύπανση του αέρα με NO_x, η βιομηχανία, και κυρίως οι κατοικίες/νοικοκυριά, που είναι οι κύριοι ρυπαντές σε μικροσωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2.5 μm.

Οι ρύποι προερχόμενοι από τις θαλάσσιες μεταφορές, η μέτρηση των οποίων προκύπτει από δεδομένα των λιμανιών κάθε χώρας και περιλαμβάνει μετρήσεις από πλοία σε εθνικές ή διεθνείς αποστολές, καθώς και τα εθνικά αλιευτικά, φαίνονται ότι είναι χαμηλοί σε σχέση με αυτούς που προκαλούνται από τους υπόλοιπους τομείς, με ενδεικτική παραγωγή 328.420 t NO_x από τους περίπου 7.000.000 t συνολικά το 2017.

Το γεγονός ότι η ναυτιλία έχει σχετικά χαμηλό ποσοστό αέριων ρύπων σχετίζεται και το ότι είναι ο μόνος ρυπογόνος κλάδος που είναι σχετικά αυτόνομος και δεν υπάγεται σε κανονισμούς ψηφισμένους άμεσα από τον Ο.Η.Ε., μια και από τους παραπάνω κανονισμούς φαίνεται ότι στη ναυτιλία δεν έχει τεθεί κανένας άμεσος περιορισμός, όπως έχει συμβεί με τον τομέα παραγωγής ηλεκτρισμού ή λιπασμάτων και της οδικής κυκλοφορίας. Η ναυτιλία υπάγεται σε παγκόσμιους κανονισμούς οι οποίοι καθορίζονται από τον ειδικό οργανισμό International Marine Organization (IMO) του Ο.Η.Ε. Ο Ο.Η.Ε. διαθέτει πλήθος αντίστοιχων οργάνων για την καλύτερη οργάνωση και επίτευξη των στόχων του, όπως είναι ο UNIDO για την ανάπτυξη των βιομηχανιών, ο ICAO για τον έλεγχο της πολιτικής αεροπορίας, ο FAO για την οργάνωση της γεωργίας κ.λπ. [35], αλλά κανένα από αυτά δεν έχει θέσει επιπλέον κανονισμούς, σε σχέση με τους υπάρχοντες, για την αέρια ρύπανση, και η μέχρι τώρα πρόοδος τους σε ζητήματα αέριας ρύπανσης είναι η βοήθεια προς τα κράτη-μέλη τους να πετύχουν τους στόχους των κανονισμών του Ο.Η.Ε. ενώ τα τελευταία χρόνια η έρευνα και οι προσπάθειες για εφαρμογή νέων κανονισμών που συμφωνούν με τα πρόσφατα ψηφίσματα του Ο.Η.Ε. [37]. Χαρακτηριστικά, ο ICAO μόλις το 2004 έθεσε ως στόχο τη μείωση των εκπομπών ρύπων προς βελτίωση του τοπικού αέρα και μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, και το 2019 εξέδωσε πιλοτικά ψηφίσματα που τίθενται σε εφαρμογή τα επόμενα χρόνια [36].

Ο I.M.O. συντέθηκε αρχικά για την εξασφάλιση της ασφάλειας των πλοίων, το 1948, με θέση σε λειτουργία το 1958, καθώς σε πολλές περιπτώσεις οι κατασκευές τους ήταν ελλιπείς σε ασφάλεια, στην προσπάθεια κατασκευής οικονομικών πλοίων. Στη συνέχεια, και μετά από κάποια τραγικά ατυχήματα διαρροής πετρελαίου στη θάλασσα, συντέθηκε το ειδικό συμβούλιο του I.M.O. για την προστασία του περιβάλλοντος από τα πλοία, η MEPC (Marine Environment Protection Committee) θεσπίζοντας την αντίστοιχη σύμβαση για την προστασία του περιβάλλοντος από τα πλοία (MARPOL) το 1973, κατά την οποία μεν τέθηκε η ανησυχία για τη μόλυνση του αέρα με NO_x από τα πλοία, δεν υιοθετήθηκε όμως κάποια στρατηγική περιορισμού τους [41]. Η μέριμνα για την αέρια ρύπανση από τα πλοία ξεκίνησε το 1997, οπότε τέθηκαν συγκεκριμένα όρια για τους αέριους ρύπους από τα πλοία και την περιεκτικότητά τους σε SO_x, NO_x και αέρια που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος. Από τότε και στο εξής οι κανονισμοί αναθεωρούνται συνεχώς και γίνονται όλο και πιο αυστηροί. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους φαίνονται ιδιαίτερα στην εκτεταμένη μείωση των SO_x τα τελευταία χρόνια (**Εικόνα 10**).





Εικόνα 10: Μείωση των ρύπων της ναυτιλίας ανά έτος

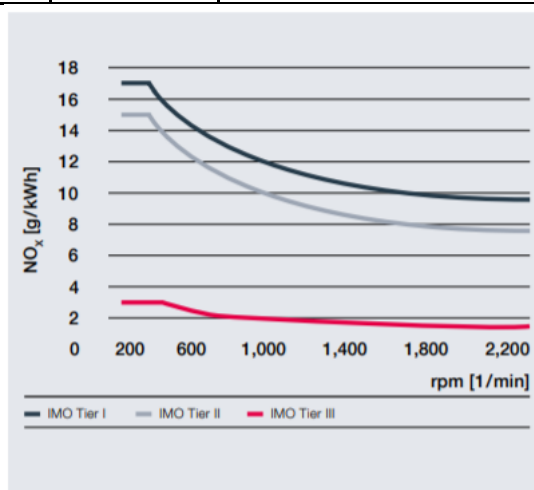
Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με την αέρια ρύπανση, ο Ι.Μ.Ο., μετρώντας σήμερα 175 κράτη-μέλη, θέσπισε τους παρακάτω κανονισμούς:

- Το 1997, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εντάσσεται στους κανονισμούς της MARPOL πρωτόκολλο περιορισμού της αέριας ρύπανσης για πρώτη φορά, απ' τη μία σχετικά καθυστερημένα αν σκεφτεί κανείς ότι η LRTAP ορίστηκε το 1979, απ' την άλλη δικαιολογημένα μια και οι αέριοι ρύποι από τα πλοία δεν είναι κατά κανέναν τρόπο ο βασικός παράγοντας παγκόσμιας ρύπανσης του αέρα. Η βασική κινητήρια δύναμη για την υιοθέτηση των κανονισμών ήταν η Νορβηγία, και πάνω σε μελέτες της στη Βόρεια Θάλασσα βασίστηκαν οι πρώτοι κανονισμοί. Σύμφωνα με αυτές τις μελέτες, που υποβλήθηκαν το 1990, εκτιμήθηκε ότι οι εκπομπές SO_x από τα πλοία ανέρχονταν στους 4.5-6.5 εκατομμύρια τόνους ετησίως, δηλαδή το 4% της παγκόσμιας ρύπανσης σε SO_x, οι εκπομπές σε NO_x ανέρχονταν σε 5 εκατομμύρια τόνους ετησίως, περίπου 7% της παγκόσμιας ρύπανσης, και οι εκπομπές σε CFCs (χλωροφθοράνθρακες, υπεύθυνοι για την καταστροφή του στρώματος του όζοντος) ανέρχονταν στους 3-6 χιλιάδες τόνους ετησίως, καλύπτοντας το 1-3% της παγκόσμιας παραγωγής CFCs. Το πρωτόκολλο αυτό, υπό τη μορφή του πρόσθετου κεφαλαίου Annex VI, είναι πλέον υπογεγραμμένο από 104 χώρες, δηλαδή το 96.81% του παγκόσμιου στόλου [40], και τέθηκε σε εφαρμογή το 2005, ορίζοντας πλαφόν 4.5% m/m (mass/mass) περιεκτικότητα θείου στα ναυτικά καύσιμα παγκοσμίως και καθιστώντας τον Ι.Μ.Ο. υπεύθυνο για τη μέτρηση και επιτήρηση της μέσης περιεκτικότητας σε θείο των ναυτικών καυσίμων παγκοσμίως. Παράλληλα, το πρωτόκολλο ορίζει περιοχές SECAs (SO_x Emission Control Areas), στις οποίες ευρισκόμενα τα πλοία απαγορεύεται να χρησιμοποιούν καύσιμα με περιεκτικότητα σε θείο ανώτερη των 1.5% m/m, ή εναλλακτικά υποχρεούνται να χρησιμοποιούν τεχνολογίες μείωσης εκπομπών SO_x, όπως φίλτρα καθαρισμού ή άλλες. Τέτοιες περιοχές ορίστηκαν η Βαλτική και η Βόρεια Θάλασσα. Σχετικά με τους καταστροφείς του στρώματος του όζοντος, όπως οι χλωροφθοράνθρακες και τα halons, εκπομπές που στα πλοία προέρχονται κυρίως από τα συστήματα ψύξης τους, είτε σε χώρους επιβατών είτε σε χώρους φορτίου είτε σε containers, τέθηκαν συγκεκριμένοι περιορισμοί και απαγορεύτηκε η χρήση τους σε οποιαδήποτε νέα κατασκευή σε όλα τα πλοία, ενώ νέες κατασκευές με χρήση υδροχλωροφθορανθράκων HCFCs επιτρέπονται μόνο έως το τέλος του 2019. Το πρωτόκολλο θέτει επίσης όρια στις εκπομπές NO_x από τις πετρελαιοκίνητες μηχανές των πλοίων, εκδίδοντας τεχνικό κώδικα με υποχρεωτικές προτάσεις για το πώς μπορεί να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, και προτείνοντας τρόπους επιτόπιας μέτρησης και επιτήρησης των ρύπων σε κάθε πλοίο. Τέλος, απαγορεύει την καύση απορριμμάτων και πλαστικών σε χώρους του πλοίου [41].
- Το 2003 εκδίδονται ακριβείς οδηγίες (resolution MEPC.103(49)) προκειμένου κάθε πλοίο να έχει άμεση και πλήρη γνώση και επιτήρηση στους ρύπους NO_x, ώστε το συμβούλιο να μπορεί να έχει πλήρη έλεγχο των πλοίων αλλά και στατιστικών για περαιτέρω έρευνα [42], ενώ το 2005 εκδίδονται αντίστοιχες οδηγίες για τα συστήματα φιλτραρίσματος των καυσαερίων από SO_x [43].
- Το 2005 ο Ι.Μ.Ο. καλεί τις κυβερνήσεις και τους λιμένες του να εφαρμόζουν ελέγχους και επιθεωρήσεις στα πλοία που εισέρχονται σε αυτά, με βάση τους κανονισμούς για τη μείωση των SO_x, NO_x, VOCs και των αέριων καταστροφέων του όζοντος, και να δίνουν αναφορά στον οργανισμό. Τα

πλοία οφείλουν να έχουν τα απαραίτητα έγγραφα προκειμένου να γίνονται οι έλεγχοι. Μάλιστα ορίζει ότι αντίστοιχοι έλεγχοι επικινδυνότητας πρέπει να γίνονται και σε πλοία χωρών που δεν έχουν υπογράψει τις αντίστοιχες συμβάσεις (πρωτόκολλο του 1997, Annex VI) ή δεν είναι μέλη του Ι.Μ.Ο. [44]

- Το 2008 οι οδηγίες σχετικά με τα συστήματα φιλτραρίσματος καυσαερίων από SO_x του 2005 ανακαλούνται, και εκδίδονται νέες δίνοντας εκτεταμένες λεπτομέρειες σχετικές με την ακριβή συνεχή καταγραφή των εκπομπών SO_x σε κάθε πλοίο [45].
- Το 2008 εξετάζονται αλλαγές στο πρωτόκολλο του 1997, με βασικότερη αλλαγή την υιοθέτηση αυστηρότερων ορίων για τις εκπομπές NO_x και SO_x των πλοίων. Τα όρια και οι έλεγχοι (Tiers) για τις εκπομπές NO_x καθορίζονται ανάλογα το έτος κατασκευής του πλοίου, ως εξής:

| Tier | Ship construction date on or after | Total weighted cycle emission limit (g/kWh) n = engine's rated speed (rpm) | | |
|------|------------------------------------|---|---|----------|
| | | n < 130 | n = 130 - 1999 | n ≥ 2000 |
| I | 1 January 2000 | 17.0 | $45 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 12.1 | 9.8 |
| II | 1 January 2011 | 14.4 | $44 \cdot n^{(-0.23)}$ e.g., 720 rpm – 9.7 | 7.7 |
| III | 1 January 2016 | 3.4 | $9 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 2.4 | 2.0 |



IMO NO_x limit curves according to engine speed

Ο έλεγχος Tier III ισχύει για πλοία κατασκευής από το 2016 και μετά, μόνο σε περίπτωση πλεύσης σε περιοχές μειωμένων εκπομπών ECAs, διαφορετικά υπάγονται στα όρια του Tier II. Αντίστοιχα, τα όρια για την περιεκτικότητα μάζα προς μάζα των καυσίμων των πλοίων σε θείο, ανάλογα το έτος κατασκευής του πλοίου και το χώρο πλεύσης του, τίθενται ως εξής:

| Outside an ECA established to limit SO _x and particulate matter emissions | Inside an ECA established to limit SO _x and particulate matter emissions |
|--|---|
| 4.50% m/m prior to 1 January 2012 | 1.50% m/m prior to 1 July 2010 |
| 3.50% m/m on and after 1 January 2012 | 1.00% m/m on and after 1 July 2010 |
| 0.50% m/m on and after 1 January 2020 | 0.10% m/m on and after 1 January 2015 |

Αναφέρεται επίσης ότι η περιεκτικότητα των καυσίμων οφείλει να είναι καταγεγραμμένη από τον προμηθευτή τους, και επιπλέον τα πλοία με ρότες εντός και εκτός των ECAs, που αναγκάζονται να χρησιμοποιούν διπλό καύσιμο, οφείλουν να καταγράφουν σε χρονοδιάγραμμα τις ποσότητες καυσίμου που καταναλώθηκε, ώστε οι έλεγχοι να εξασφαλίσουν ότι πράγματι εντός των ορίων των περιοχών χρησιμοποιήθηκε καύσιμο με την απαιτούμενη περιεκτικότητα σε θείο. Σχετικά με το τεθέν όριο του 0.5% m/m περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο σε πλοία κατασκευής από το 2020 και μετέπειτα, η επιτροπή όρισε ερευνητική ομάδα προκειμένου να καθοριστεί εάν είναι εφικτή η υλοποίηση του συγκεκριμένου μέτρου, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα ενός τέτοιου καυσίμου στην αγορά και ζητήματα που θα προέκυπταν στην οικονομία και τη ναυτιλία. Τα αποτελέσματα της έρευνας θα παρουσιάζονταν το 2018, και τα κράτη-μέλη μετά από μελέτη τους θα αποφάσιζαν αν θα υιοθετηθούν τα μέτρα ως έχουν ή αν ο συγκεκριμένος κανονισμός θα αναβαλλόταν για το 2025 [45]. Άλλα σημαντικά σχετικά δεδομένα είναι τα ακόλουθα.

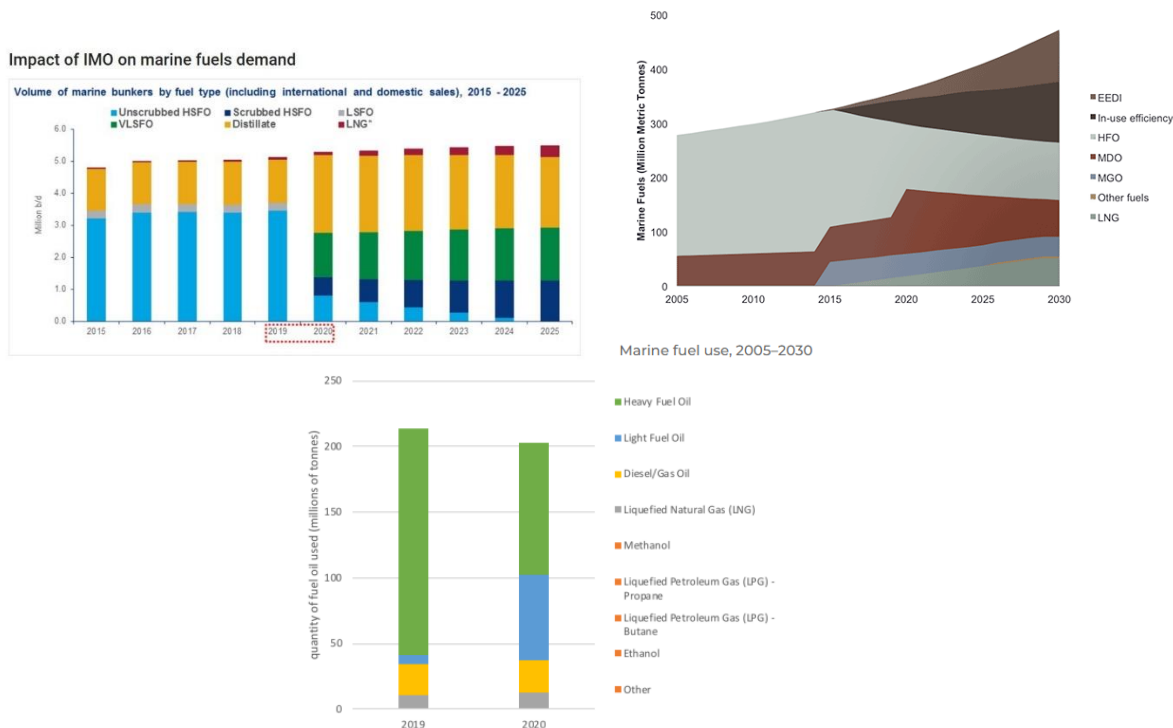
- Το 2008 η επιτροπή εκδίδει αλλαγές στον τεχνικό κώδικα περιορισμού των NO_x, στον οποίο καθορίζονται επακριβώς οι διαδικασίες μέτρησης των ρύπων και οι έλεγχοι που πρέπει να γίνουν ώστε να κριθεί μια μηχανή κατάλληλη για το πλοίο και σύμφωνη με τους κανονισμούς περιορισμού των NO_x, και καλεί την πλειονότητα των μελών να δώσουν την έγκρισή τους μέχρι το 2010, οπότε και θα ξεκινούσε η εφαρμογή των νέων δοκιμών και ελέγχων [47].
- Το 2011 προστίθενται στον παραπάνω κώδικα και οδηγίες για τον σωστό έλεγχο μηχανών εφοδιασμένων με συστήματα Selective Catalytic Reduction (SCR), προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι οι εκπομπές τους σε NO_x είναι συμβατές με τους κανονισμούς [48].
- Τον Οκτώβριο του 2016 αποφασίζεται σχετικά με τις εκπομπές SO_x ότι από την 1^η Ιανουαρίου του 2020 θα τεθεί σε ισχύ ο περιορισμός της χρήσης καυσίμου με περιεκτικότητα θείου σε αυτό 0.5 %m/m, όπως προσχεδιάστηκε στους κανονισμούς του 2008 [52].
- Κάθε χρόνο γίνονται μικρές τροποποιήσεις των κανονισμών κυρίως αλλάζοντας και συγκεκριμενοποιώντας τις διαδικασίες ελέγχου και τους τρόπους υπολογισμού των ρύπων, γίνονται αναθεωρημένοι προσδιορισμοί των μηχανών στις οποίες αναφέρονται οι κανονισμοί και μικρές τροποποιήσεις στα όρια των ECAs. Το 2017, ορίζεται ότι στις περιοχές περιορισμένων εκπομπών NO_x (ECAs), στις οποίες τα πλοία υπάγονται στον κανονισμό Tier III, συγκαταλέγονται η Βόρεια Αμερικάνικη θάλασσα, η θάλασσα της Καραϊβικής, η Βαλτική και η Βόρεια Θάλασσα, δοσμένες με ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες [49].
- Το 2017, η επιτροπή θεσπίζει επίσης την πρόσβαση των κρατών-μελών σε ανώνυμες πληροφορίες του οργανισμού σχετικές με την κατανάλωση καυσίμου των πλοίων ανάλογα με το είδος τους, με τις ώρες λειτουργίας και τις διανυθείσες αποστάσεις, προκειμένου κάθε μέλος να μπορεί να εξάγει τα συμπεράσματά του και να κρίνει αντιστοίχως τους εκδοθέντες κανονισμούς. [50]
- Το 2019, με εφαρμογή από τον Μάρτιο του 2020, η επιτροπή επιπλέον απαγορεύει ακόμα και τη μεταφορά καυσίμου με περιεκτικότητα σε θείο άνω της 0.5% m/m για πλεύση σε οποιαδήποτε χωρική συντεταγμένη και ανεξαρτήτου έτους κατασκευής του πλοίου, ενώ στις περιοχές μειωμένων εκπομπών SO_x (ECAs) περιλαμβάνει εκτός της Βαλτικής και Βόρειας Θάλασσας, τη Βόρεια Αμερικάνικη θάλασσα και την Καραϊβική, και αναφέρει ότι κάθε πλοίο ευρισκόμενο εντός των ορίων αυτών των περιοχών πρέπει να χρησιμοποιεί καύσιμο με περιεκτικότητα σε θείο μικρότερη από 0.1% m/m. Η τροποποίηση αυτή κατέδειξε ότι οι κανονισμοί του 2008 έγιναν δεκτοί και ψηφίστηκαν από την πλειονότητα των κρατών-μελών [51].

Οι κανονισμοί κατά την πάροδο των χρόνων υποσχέθηκαν σε αλλαγές, που δεν περιορίζονται σε αυτές που αναφέρονται παραπάνω. Ωστόσο, σε αδρές γραμμές, η πορεία τους είναι αυτή και διαφαίνεται η αυστηρότητα που υπάρχει σε αυτούς, η οποία είναι θεμιτή για την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά αναλογιζόμενοι τα στατιστικά αποτελέσματα ρύπων της ναυτιλίας και συγκρίνοντάς τα με τα υπέρογκα ποσά ρύπων άλλων τομέων γεννιούνται ερωτηματικά ως προς το λόγο που παγκόσμια οργανωμένες ενέργειες δε στρέφονται προς τον περιορισμό των μεγαλύτερων ευθυνόμενων για τους ρύπους και στρέφονται με τόση αυστηρότητα στη ναυτιλία.

1.3. Ναυτικά καύσιμα

Έχει γίνει σαφές ότι οι αέριοι ρύποι που προέρχονται από εκπομπές κινητήρων, και ιδιαίτερα τα SO_x και τα μικροσωματίδια, έχουν μεγάλη εξάρτηση από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται και το ποσοστό του σε θείο, άνθρακα, υδρογόνο κ.λ.π., και αυτό φαίνεται και από τους πιο πρόσφατους κανονισμούς του I.M.O., που απαγορεύουν τη χρήση καυσίμου με περιεκτικότητα σε θείο μεγαλύτερη της 0.5% m/m, εκτός αν βέβαια διαθέτουν ένα εγκεκριμένο σύστημα μείωσης ρύπων. Παραδοσιακά κατά την εποχή της ευρείας χρήσης πετρελαίου τα πλοία χρησιμοποιούν βαρύ μη αποσταγμένο πετρέλαιο, που στη ναυτιλία

αναγνωρίζεται ως Heavy Fuel Oil (HFO) και ανεπεξέργαστο περιέχει ποσότητες θείου. Με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη των κανονισμών έγινε απαραίτητη και η χρήση πιο ελαφριών καυσίμων, με λιγότερους ρύπους, προκειμένου να προστατευθούν λιμάνια και παραθαλάσσιες περιοχές από τη ρύπανση. Παρότι οι ρύποι σε NO_x, που αφορούν την παρούσα εργασία, δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα και άμεσα από το είδος του καυσίμου που καταναλώνεται, η μετάβαση της ναυτιλίας σε ελαφρύτερα καύσιμα είναι γεγονός και δεν μπορεί να αφήσει ανεπηρέαστες τις νέες μελέτες, οι οποίες πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους ότι πλοία που δε διαθέτουν συστήματα περιορισμού των SO_x είναι υποχρεωμένα να λειτουργούν με το αντίστοιχο καύσιμο. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι 33.9 % των μεσόστροφων και ταχύστροφων 20-1000 kW ναυτικών κινητήρων εργάζεται με ναυτικό καύσιμο Diesel, το 65.7% εργάζεται με βενζίνη, ποσοστό που εμφανίζεται αυξημένο λόγω του μεγάλου αριθμού ταχύστροφων μικρών πλοιαρίων, και μόνο το 0.4% χρησιμοποιεί HFO. Αντίστοιχα μεγάλοι κινητήρες ισχύος άνω του 1MW χρησιμοποιούν HFO σε ποσοστό 29.6% και Diesel σε ποσοστό 67.5%. Είναι σαφές και από τα παρακάτω διαγράμματα του IMO και ICCT ότι υπάρχει τάση στροφής προς ελαφρύτερα καύσιμα, χωρίς όμως να εγκαταλείπεται και το HFO. [133]



Εικόνα 11: Ποσοστό ναυτικών καυσίμων ανά είδος καυσίμου [63],[54],[57]

Η ποιότητα των καυσίμων, η καταλληλότητά τους για χρήση και ο τρόπος διαχείρισης είναι συμπεράσματα που εξάγονται από κάποια μεγέθη που χαρακτηρίζουν το κάθε καύσιμο και οι τιμές τους οφείλουν να παρέχονται από τους προμηθευτές. Τέτοια μεγέθη είναι:

- **Cold Flow Properties/Ιδιότητες ψυχρής ροής:** Η ιδιότητα αυτή αφορά κυρίως την ικανότητα μεταφοράς και αποθήκευσης του καυσίμου και εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία κάτω από την οποία αρχίζει η κρυσταλλοποίησή του. Η θερμοκρασία αυτή αναφέρεται ως cloud point (CP) και οφείλει να είναι γνωστή στο πλήρωμα ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι δεξαμενές αποθήκευσης του καυσίμου δε θα έχουν θερμοκρασία μικρότερη αυτής. Αντίστοιχα σημαντική είναι και η θερμοκρασία υγροποίησης του καυσίμου (pure point), πάνω από την οποία το καύσιμο είναι ρευστό και ικανό να ρεύσει σε σωληνώσεις μεταφοράς του. Ένα πλοίο που δεν είναι εξοπλισμένο με συστήματα θέρμανσης του καυσίμου, ή πλοίο που πρόκειται να πλεύσει ή να φορτοεκφορτώσει καύσιμο σε περιοχές με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες πρέπει να έχει γνώση της συμπεριφοράς του καυσίμου που προμηθεύεται ώστε να το διαχειριστεί ανάλογα. Αν επέλθει κρυσταλλοποίηση του καυσίμου, ακόμα και μερική, στερεοποιημένα κατακάθια επικαθονται σε τοιχώματα και φίλτρα και μπλοκάρουν τις διαδικασίες μεταφοράς, θέρμανσης και καύσης του, ενώ η διάλυσή τους δεν είναι εφικτή με απλή θέρμανσή τους και απαιτείται χειρωνακτικός καθαρισμός.
- **Stability/Σταθερότητα:** Η ιδιότητα αυτή αφορά την τάση των ασφατενίων του καυσίμου προς ιζηματοποίηση και δημιουργία γλίτσας και στερεών συσσωματωμάτων και μετράται λαμβάνοντας υπόψη το κατακάθι και τις αδιάλυτες οργανικές και ανόργανες ενώσεις που παραμένουν μετά από τυποποιημένη διαδικασία φιλτραρίσματος του καυσίμου υπό πρότυπες συνθήκες. Είναι μια εξαιρετικά

σημαντική ιδιότητα, ειδικά κατά την πρόσμιξη διαφορετικών καυσίμων ή και ίδιων καυσίμων διαφορετικών παραγωγών, καθώς δύο σταθερά καύσιμα αν αναμιχθούν είναι δυνατό να δώσουν ένα ασταθές καύσιμο. Συνεπώς τα τεστ ελέγχου είναι σε φάση επαναπροσδιορισμού, προκειμένου να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη σταθερότητα κατά τις προσμίξεις καυσίμων, ιδιαίτερα τώρα που οι απαιτήσεις σε καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο είναι υψηλές. Ένα κατά τ' άλλα σταθερό καύσιμο που έχει προκύψει από προσμίξεις βαρέων και ελαφρύτερων καυσίμων με μεγάλες αποκλίσεις στην πυκνότητά τους μπορεί να παρουσιάσει αστάθεια και τα συστατικά του να διαστρωματοποιηθούν, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του καυσίμου, τον τρόπο και το χρόνο αποθήκευσής του. Αντίθετα, ένα καλά ομογενοποιημένο μίγμα καυσίμων παρουσιάζει μικρότερες πιθανότητες να εμφανίσει αστάθεια, επομένως σε περιπτώσεις προσμίξεων με μεγάλες διαφορές στην πυκνότητα είναι πιθανό να χρειάζονται συχνές αναδεύσεις του καυσίμου, εφόσον αυτό είναι δυνατό. Αν το καύσιμο εν τέλει παρουσιάσει αστάθεια, το πρόβλημα είναι μη αντιστρεπτό και οι θρομβώσεις πρέπει να απομακρυνθούν χειρωνακτικά.

- **Viscosity/Ιξώδες:** Η τιμή του ιξώδους είναι σημαντική κυρίως για τη διαδικασία φυγοκεντρισμού του καυσίμου και της αποβολής του νερού και στερεών σωμάτων από αυτό. Όσο μικρότερο είναι το ιξώδες τόσο πιο αποτελεσματικός είναι ο διαχωρισμός, και ανάλογα την τιμή του επιλέγεται και η θερμοκρασία στην οποία θα γίνει ο διαχωρισμός. Επίσης σημαντική είναι η τιμή του κατά την έγχυση του καυσίμου στον κινητήρα, καθώς η κατασκευαστική της μηχανής ορίζει συγκεκριμένο ιξώδες καυσίμου με το οποίο μπορεί να λειτουργήσει ιδανικά και να δημιουργηθεί κατάλληλο spray. Αν το ιξώδες είναι μεγαλύτερο από το προδιαγραφόμενο, θα δημιουργηθούν άκαυστες επικαθίσεις και η απόδοση της καύσης θα είναι μειωμένη, ενώ θα παρουσιαστούν και έντονα κρουστικά φαινόμενα που θα καταπονήσουν τα εξαρτήματα της μηχανής. Αν αντίθετα το ιξώδες είναι χαμηλότερο, η εγχυόμενη ποσότητα καυσίμου δε θα κατανεμηθεί επαρκώς στο θάλαμο καύσης και υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης πολύ υψηλών θερμοκρασιών.
- **Acid Number/Αριθμός οξέος:** Πρόκειται για αριθμό καταδεικτικό των οξέων που περιέχονται στο καύσιμο και υπάρχουν κυρίως στα βαρέα καύσιμα, είτε αναπτύσσονται σε μικρότερο βαθμό σε κακοδιατηρημένα καύσιμα κατά την αποθήκευσή τους. Η ύπαρξη τέτοιων οξέων εξαρτάται κυρίως από το είδος του αργού πετρελαίου από το οποίο προήλθε το καύσιμο και προκαλούν διάβρωση σε μεταλλικές επιφάνειες και ιδιαίτερα σε αυτές του εξοπλισμού έγχυσης. Συνεπώς υπάρχουν περιορισμοί στον αριθμό αυτό, ενώ η ύπαρξη ανόργανων οξέων απαγορεύεται εντελώς (MARPOL Annex VI Regulation 18.3). Παρόλα αυτά το γεγονός ότι ένα καύσιμο έχει μικρή περιεκτικότητα σε οξέα και είναι σύμφωνο με τους κανονισμούς, δε σημαίνει ότι δεν πρόκειται να παρουσιάσει αντίστοιχα προβλήματα διάβρωσης.
- **Flashpoint/Σημείο ανάφλεξης:** Όλα τα καύσιμα, με εξαίρεση το DMX για χρήση έκτακτης ανάγκης, ορίζεται ότι πρέπει να έχουν ελάχιστο σημείο ανάφλεξης τους 60° C, όπως αναφέρει η SOLAS (Safety Of Life At Sea). Σημείο ανάφλεξης χαμηλότερο από αυτό μπορεί να είναι επικίνδυνο σε περιπτώσεις υπερθέρμανσης και πλεύσης σε περιοχές υψηλών θερμοκρασιών. Το σημείο ανάφλεξης δεν επηρεάζει την απόδοση του καυσίμου κατά την καύση, ούτε την ικανότητα αυτανάφλεξής του. Αποτελεί ένδειξη για την ύπαρξη διαλυμάτων όπως βενζίνη, που έχουν χαμηλά σημεία ανάφλεξης, ο κύριος σκοπός του όμως είναι η παροχή πληροφορίας σχετικά με την θερμοκρασία στην οποία πρέπει να αποθηκευτεί το καύσιμο προκειμένου να μην προκληθεί πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό οι προμηθευτές είναι υπεύθυνοι και αναγκασμένοι να δηλώνουν στους αγοραστές τις θερμοκρασίες στις οποίες είναι ασφαλές να αποθηκευτεί το καύσιμο. Παρόλα αυτά, η αποφυγή της πυρκαγιάς δεν είναι εγγυημένη καθώς πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου συχνά σχηματίζονται εύφλεκτα αέρια πριν επέλθει η ισορροπία και τις ζεστές μέρες ο κίνδυνος είναι αυξημένος.
- **Ignition Quality/Ικανότητα ανάφλεξης:** Η ικανότητα ανάφλεξης ενός καυσίμου και η ποιότητα της καύσης είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες σωστής λειτουργίας της μηχανής. Παρότι και τα δύο εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου, υπάρχει ένα εύρος άλλων παραγόντων που τα επηρεάζουν, όπως είναι ο σχεδιασμός της μηχανής, η εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας και οι λειτουργικές ρυθμίσεις, το εφαρμοζόμενο φορτίο, η κατάσταση του περιβάλλοντος, η προθέρμανση και μεταχείριση του καυσίμου. Συνεπώς η ποιότητα της καύσης είναι δύσκολο να προβλεφθεί λαμβάνοντας ως δεδομένο μόνο την ικανότητα ανάφλεξής του. Η ικανότητα ανάφλεξης ορίζεται από τον αριθμό CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index), που προκύπτει από την πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου, και όσο μεγαλύτερος είναι τόσο χειρότερη είναι και η ποιότητα της ανάφλεξης. Είναι ιδιαίτερα βοηθητικό μέσο πρόβλεψης της ποιότητας έναυσης σε καύσιμα που έχουν δυσανάλογες σχέσεις πυκνότητας-ιξώδους και τα αντίστοιχα συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν

από αυτές τις τιμές. Ωστόσο ο αριθμός αυτός δεν είναι ευαγγέλιο, μιας και καύσιμα με παρόμοιο αριθμό CCAI μπορεί να παρουσιάσουν αποκλίνοντα χαρακτηριστικά ανάφλεξης ή καύσιμα με αποδεκτό αριθμό CCAI να παρουσιάσουν χαμηλή ποιότητα έναυσης και υψηλή ποιότητα καύσης και αντίστροφα. Κάποιες κατασκευαστικές εταιρείες μηχανών αναφέρουν τα όρια του αριθμού CCAI για τα οποία η ανάφλεξη και η καύση είναι αποδεκτές.

- **Catalyst Fines/Καταλυτικά διαλύματα:** Πρόκειται για ενώσεις που αποκολλώνται από τα εξαρτήματα της διύλισης και της απόσταξης και αναμιγνύονται με το καύσιμο. Για το αλουμίνιο (Al) και πυρίτιο (Si), που είναι τα συχνότερα και πιο καταστρεπτικά στοιχεία, υπάρχουν ορισμένα επιτρεπτά μέγιστα όρια, που ανέρχονται στα 60 mg/kg. Η εκτεταμένη ύπαρξή τους μπορεί να προκαλέσει τράχυνση και φθορά στις σωληνώσεις, τους εγχυτήρες, τους δακτυλίους του πιστονιού και τα χιτώνια των κυλίνδρων. Για να αποφευχθούν τέτοιες ζημιές είναι σημαντικό τα καύσιμα πριν την καύση τους να υπόσχονται σε διαδικασίες ηρεμίας και κατακάθισης και στη συνέχεια σε φυγοκεντρικό διαχωρισμό. Όταν ένα πλοίο χρησιμοποιεί καύσιμα με αυξημένες περιεκτικότητες σε τέτοιες ενώσεις πρέπει να διασφαλίζεται ότι οι φυγοκεντρικοί διαχωριστές λειτουργούν με το βέλτιστο δυνατό τρόπο.

1.3.1. HFO (Heavy Fuel Oil)

Πρόκειται για παχύρρευστο καύσιμο, υπόλειμμα της απόσταξης του αργού πετρελαίου, με άσχημα χαρακτηριστικά αλλά εξαιρετικά φθηνό δεδομένου ότι στοιχίζει 30% λιγότερο από τα αποστάγματα, όπως το MDO. Εξαιτίας της χαμηλής του ποιότητας και της μικρής επεξεργασίας του περιέχει διάφορες ουσίες, όπως αρωματικές ύλες, θείο, νάτριο, που κάνουν τις εκπομπές της καύσης του εξαιρετικά βλαβερές σε σχέση με αυτές άλλων καυσίμων. Εξαιτίας του χαμηλού του κόστους αποτελεί το βασικό καύσιμο της ναυτιλίας κάνοντάς την ακόμα πιο αποδοτική όσον αφορά το θέμα κόστους μεταφοράς προϊόντων. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρότι το καύσιμο που χρησιμοποιεί είναι από τα πιο επικίνδυνα για το περιβάλλον, η ναυτιλία παραμένει από τους πιο καθαρούς και αειφόρους τρόπους μεταφοράς φορτίου, δεδομένου ότι οι αποστάσεις που διανύονται είναι μεγάλες και οι ποσότητες των προϊόντων φτάνουν και τους 11 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως (2017) [56] με το 80% των εμπορευμάτων να μεταφέρονται δια θαλάσσης [56], με αποτέλεσμα το ποσό ρύπων ανά μονάδα φορτίου και ανά μονάδα απόστασης να είναι μικρό συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές άλλων μέσων μεταφοράς, όπως η οδική, αέρια ή σιδηροδρομική [55]. Πέρα από την αέρια ρύπανση ωστόσο, η χρήση και μεταφορά τέτοιου καυσίμου αποτελεί αδιαμφισβήτητο κίνδυνο στην περίπτωση ατυχήματος και διαρροής του στον υδάτινο ορίζοντα, καθώς η υψηλή του πυκνότητα εμποδίζει την διάλυσή του στο νερό δημιουργώντας κοίτες επικίνδυνες και για τα έμβια όντα.

Το καύσιμο αυτό άρχισε κυρίως να χρησιμοποιείται την εποχή της κρίσης του πετρελαίου, δηλαδή μεταξύ 1970s-1980s, λόγω της χαμηλής του τιμής και χρειάστηκαν εκτενείς τροποποιήσεις κυρίως στο σύστημα έγχυσης των μηχανών προκειμένου να λειτουργήσουν με αυτό, μιας και, εκτός των άλλων, λόγω της παχύρρευστης φύσης του, είναι πιθανώς απαραίτητη η προθέρμανσή του προ της έγχυσης. Η σύνθεσή του ποικίλει και μπορεί να περιέχει ανθρακαλυσίδες από 20 έως 50 άνθρακες (C₂₀~C₅₀), καθώς συνήθως αναμειγνύεται με άλλα αποστάγματα προκειμένου να επιτευχθεί μια επιθυμητή πυκνότητα ή κινηματικό ιξώδες. Χαρακτηρίζεται σύμφωνα με το ISO 8217, που είναι η πιο ευρεία χρησιμοποιούμενη τυποποίηση στη ναυτιλία, από μέγιστη πυκνότητα 1010 kg/m³ στους 15° C και μέγιστο κινηματικό ιξώδες 700 mm²/s στους 50° C. Το HFO αναγνωρίζεται ως RMA, RMB, RMD, RME, RMG, RMK και είναι ανεξάρτητο από την περιεκτικότητά του σε θείο, μιας και αυτή μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις. Προς το παρόν δεν έχει γίνει τυποποίηση ISO που να περιλαμβάνει τα ακριβή χαρακτηριστικά του HFO με περιεκτικότητα σε θείο χαμηλότερη της 0.5% m/m [59].

REQUIREMENTS FOR MARINE RESIDUAL FUELS

| Characteristic | Unit | Limit | Category ISO-F- | | | | | | | | | | Test method reference | |
|---|---------------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--|----------|
| | | | RMA | | | | RMG | | | | RMK | | | |
| | | | 10 | 30 | 80 | 180 | 180 | 380 | 500 | 700 | 380 | 500 | | 700 |
| Kinematic viscosity at 50 °C | mm ² /s ^a | Max | 10,00 | 30,00 | 80,00 | 180,0 | 180,0 | 380,0 | 500,0 | 700,0 | 380,0 | 500,0 | 700,0 | ISO 3104 |
| Density at 15 °C | kg/m ³ | Max | 920,0 | 960,0 | 975,0 | 991,0 | 991,0 | | | | 1010,0 | | ISO 3675 or ISO 12185; see 6.1 | |
| CCAI | – | Max | 850 | 860 | 860 | 860 | 870 | | | | 870 | | see 6.2 | |
| Sulfur ^b | mass % | Max | Statutory requirements | | | | | | | | | | ISO 8754 or ISO 14596 or ASTM D4294; see 6.3 | |
| Flash point | °C | Min | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | | | | 60,0 | | ISO 2719; see 6.4 | |
| Hydrogen sulfide | mg/kg | Max | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | | | | 2,00 | | IP 570; see 6.5 | |
| Acid number ^c | mg KOH/g | Max | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | | | | 2,5 | | ASTM D664; see 6.6 | |
| Total sediment – Aged | mass % | Max | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | | | 0,10 | | ISO 10307-2; see 6.9 | |
| Carbon residue – Micro method | mass % | Max | 2,50 | 10,00 | 14,00 | 15,00 | 18,00 | | | | 20,00 | | ISO 10370 | |
| Pour point (upper) ^d | winter | °C | Max | 0 | 0 | 30 | 30 | 30 | | | | 30 | | ISO 3016 |
| | summer | °C | Max | 6 | 6 | 30 | 30 | 30 | | | | 30 | | |
| Water | volume % | Max | 0,30 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | | | | 0,50 | | ISO 3733 | |
| Ash | mass % | Max | 0,040 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,100 | | | | 0,150 | | ISO 6245 | |
| Vanadium | mg/kg | Max | 50 | 150 | 150 | 150 | 350 | | | | 450 | | IP 501, IP 470 or ISO 14597; see 6.14 | |
| Sodium | mg/kg | Max | 50 | 100 | 100 | 50 | 100 | | | | 100 | | IP 501, IP 470; see 6.15 | |
| Aluminium plus silicon | mg/kg | Max | 25 | 40 | 40 | 50 | 60 | | | | 60 | | IP 501, IP 470 or ISO 10478; see 6.16 | |
| Used lubricating oil (ULO): – Calcium and zinc; or – Calcium and phosphorus | mg/kg | – | Calcium > 30 and zinc > 15 or Calcium > 30 and phosphorus > 15 | | | | | | | | | | IP 501 or IP 470, IP 500; see 6.17 | |

^a 1 mm²/s = 1 cSt.

^b The purchaser shall define the maximum sulfur content in accordance with relevant statutory limitations. See Introduction.

^c See Annex E.

^d Purchasers should confirm that this pour point is suitable for the ship's intended area of operation.

Εικόνα 12: Κατηγοριοποίηση βαρέων καυσίμων σύμφωνα με τον ISO [58].

1.3.2. Ναυτικά αποστάγματα/MDO (Marine Diesel Oil)

Τα ελαφρύτερα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία προκύπτουν από προσμίξεις επιμέρους καυσίμων, όπως ελαφριού και βαρέος αέριου ή υγρού καυσίμου ή υγροποιημένου αέριου καυσίμου, ανάλογα με την πυκνότητα που απαιτείται για τη λειτουργία της μηχανής του πλοίου. Πρόκειται για καύσιμα υψηλότερης ποιότητας με χαμηλότερους ρύπους και μεγαλύτερη απόδοση, κάτι που τα κάνει ακόμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον, καθώς για την ίδια λειτουργία καταναλώνεται λιγότερο καύσιμο και παράγονται λιγότεροι ρύποι. Τα ναυτικά αποστάγματα διακρίνονται κυρίως στο υγρό Marine Diesel Oil (MDO-DMB), που προκύπτει από την πρόσμιξη αποσταγμάτων και HFO, και το αέριο Marine Gas Oil (MGO-DMA), που προκύπτει αποκλειστικά από την πρόσμιξη αποσταγμάτων του πετρελαίου, ενώ σχετικά πρόσφατα η τυποποίηση ISO προβλέπει τη δημιουργία τους μετά από πρόσμιξη βιο-καυσίμων (DF). Ιδιαίτερα το MDO, που είναι το πιο διαδεδομένο αποσταγματικό καύσιμο, προκύπτει συνήθως από πρόσμιξη ντίζελ και βαρέος καυσίμου (residual-HFO), με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε βαρύ καύσιμο, χωρίς όμως να χρειάζεται προθέρμανση κατά τη χρήση ή αποθήκευσή του. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ταχύστροφες ή μεσόστροφες μηχανές, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μεγαλύτερες αργόστροφες. Λόγω του γεγονότος ότι οι περισσότερες ναυτικές μηχανές είναι σχεδιασμένες για βαριά καύσιμα η χρήση του MDO στη ναυτιλία αποτελεί μόνο το 3.7% της παγκόσμιας χρήσης του MDO.

REQUIREMENTS FOR MARINE DISTILLATE FUELS

| Characteristic | Unit | Limit | Category ISO-F- | | | | | | Test method(s) and references | |
|---|---------------------------------|-------|-------------------------------|-------|--------|--------|-----|-------------------|--|--------------------------------|
| | | | DMX | DMA | DFA | DMZ | DFZ | DMB | | DFB |
| Kinematic viscosity at 40 °C | mm ² /s ^a | Max | 5,500 | 6,000 | | 6,000 | | 11,00 | ISO 3104 | |
| | | Min | 1,400 | 2,000 | | 3,000 | | 2,000 | | |
| Density at 15 °C | kg/m ³ | Max | – | 890,0 | | 890,0 | | 900,0 | ISO 3675 or ISO 12185; see 6.1 | |
| Cetane index | – | Min | 45 | 40 | | 40 | | 35 | ISO 4264 | |
| Sulfur ^b | mass % | Max | 1,00 | 1,00 | | 1,00 | | 1,50 | ISO 8754 or ISO 14596, ASTM D4294; see 6.3 | |
| Flash point | °C | Min | 43,0 | 60,0 | | 60,0 | | 60,0 | ISO 2719; see 6.4 | |
| Hydrogen sulfide | mg/kg | Max | 2,00 | 2,00 | | 2,00 | | 2,00 | IP 570; see 6.5 | |
| Acid number | mg KOH/g | Max | 0,5 | 0,5 | | 0,5 | | 0,5 | ASTM D664; see 6.6 | |
| Total sediment by hot filtration | mass % | Max | – | – | | – | | 0,10 ^e | ISO 10307-1; see 6.8 | |
| Oxidation stability | g/m ³ | Max | 25 | 25 | | 25 | | 25 ^d | ISO 12205 | |
| Fatty acid methyl ester (FAME) ^g | volume % | Max | – | – | 7,0 | – | 7,0 | – | 7,0 | ASTM D7963 or IP 579; see 6.10 |
| Carbon residue – Micro method on the 10 % volume distillation residue | mass % | Max | 0,30 | 0,30 | | 0,30 | | – | ISO 10370 | |
| Carbon residue – Micro method | mass % | Max | – | – | | – | | 0,30 | ISO 10370 | |
| Cloud point ^f | winter | °C | Max | –16 | report | report | | – | ISO 3015; see 6.11 | |
| | summer | °C | Max | –16 | – | – | | – | | |
| Cold filter plugging point ^f | winter | °C | Max | – | report | report | | – | IP 309 or IP 612; see 6.11 | |
| | summer | °C | Max | – | – | – | | – | | |
| Pour point (upper) ^f | winter | °C | Max | – | –6 | –6 | | 0 | ISO 3016; see 6.11 | |
| | summer | °C | Max | – | 0 | 0 | | 6 | | |
| Appearance | | | Clear and Bright ^g | | | | | | ^h | see 6.12 |
| Water | volume % | Max | – | – | | – | | 0,30 ^e | ISO 3733 | |
| Ash | mass % | Max | 0,010 | 0,010 | | 0,010 | | 0,010 | ISO 6245 | |
| Lubricity, corrected wear scar diameter (WSD) at 60 °C ^h | µm | Max | 520 | 520 | | 520 | | 520 ^d | ISO 12156-1 | |

^a 1 mm²/s = 1 cSt.

^b Notwithstanding the limits given, the purchaser shall define the maximum sulfur content in accordance with relevant statutory limitations. See Introduction.

^c If the sample is not clear and bright, the total sediment by hot filtration and water tests shall be required, see 6.8 and 6.12.

^d If the sample is not clear and bright, the test cannot be undertaken and therefore, compliance with this limit cannot be shown.

^e See 5.1 and Annex A.

^f Pour point cannot guarantee operability for all ships in all climates. The purchaser should confirm that the cold flow characteristics (pour point, cloud point, cold filter, plugging point) are suitable for the ship's design and intended voyage. See 6.11.

^g If the sample is dyed and not transparent, then the water limit and test method as given in 6.12 shall apply.

^h This requirement is applicable to fuels with a sulfur content below 500 mg/kg (0.050 mass %).

Εικόνα 13: Κατηγοριοποίηση ελαφρών καυσίμων σύμφωνα με το ISO [58].

1.3.3. Ταξινόμηση καυσίμων σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε θείο

Στη ναυτιλία, ανάλογα τις απαιτήσεις της κάθε μηχανής αλλά και των κανονισμών στους οποίους υπάγεται το πλοίο και τα ύδατα στα οποία πλέει, χρησιμοποιούνται καύσιμα-προσμίξεις των καυσίμων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, με την προϋπόθεση ότι πληρούν κάποιους περιορισμούς, η διαδικασία παρασκευής τους είναι καταγεγραμμένη, διασφαλίζεται ότι δεν περιέχουν επικίνδυνες για το περιβάλλον ουσίες και ότι είναι κατάλληλα προς χρήση στο πλοίο. Ευθύνη για την καταλληλότητα του καυσίμου έχουν και ο προμηθευτής, ο μεταφορέας και ο παραλήπτης στο πλοίο, ενώ δείγμα του καυσίμου οφείλουν να διατηρούν όλοι, ενώ ένα δείγμα δικαιούται και η επιτροπή της MARPOL, προκειμένου να το εγκρίνει. Το κάθε καύσιμο είναι επιπλέον σημαντικό να συνοδεύεται από τον προμηθευτή του με κατάλογο των χαρακτηριστικών του προκειμένου το πλήρωμα να γνωρίζει και να προετοιμαστεί κατάλληλα για τη διαχείριση, αποθήκευση ή μεταφορά του, καθώς και να εξασφαλιστεί ότι το πλοίο διαθέτει τα απαραίτητα συστήματα προθέρμανσής του και ασφαλούς χρήσης του [61]. Εξαιτίας των κανονισμών των τελευταίων χρόνων, που περιορίζουν τη χρήση θειούχων καυσίμων, η ταξινόμησή τους γίνεται και με κριτήριο την περιεκτικότητά τους σε θείο:

| Fuel Types | ISO Category | Viscosity (cSt) (at 50°C for Residual and 40°C for Distillate Fuels) | | Sulfur Content (%) |
|--------------------------------------|------------------------------|--|---------|-----------------------|
| | | Minimum | Maximum | |
| Distillate Marine Fuels (DM) | DMA, DMB, DMX, DMZ | 1.4 | 6.0 | 0.10 - ≤0.50 |
| Residual Marine Fuels (RM) | RMA, RMB, RMD, RME, RMG, RMK | 10 | 700 | 1.0 - 3.5 |
| Ultra-low Sulfur Fuel Oil (ULSFO-DM) | DMA, DMX | 1.4 | 6.0 | ≤0.10 |
| Ultra-low Sulfur Fuel Oil (ULSFO-RM) | Mixed fuel with RM category | 8 | 60 | ≤0.10 |
| Very low Sulfur Fuel Oil (VLSFO-DM) | DMA, DMX | 1.4 | 6.0 | ≤0.50 |
| Very low Sulfur Fuel Oil (VLSFO-RM) | Mixed fuel with RM category | 8 | 60 | ≤0.50 |
| High Sulfur Heavy Fuel Oil (HSFO) | RMA, RMB, RMD, RME, RMG, RMK | 10 | 700 | >0.50 |

Εικόνα 14: Ταξινόμηση καυσίμων ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε θείο [59]

Οι προσμίξεις των καυσίμων πρέπει να γίνονται με πείρα και προσοχή και μόνο όταν αυτά είναι συμβατά μεταξύ τους, διαφορετικά θα προκληθεί αστάθεια και μακρομόρια του μη αποσταγματικού καυσίμου είναι πιθανό να δημιουργήσουν συσσωματώματα που κατακάθονται σε τοιχώματα και παρεμποδίζουν την μεταφορά ή την καύση του καυσίμου. Αυτό συμβαίνει διότι τα βαρέα καύσιμα αποτελούνται από ασφαλτένια διάχυτα στην ελαιώδη συνεχή μάζα του καυσίμου, των οποίων, αν η ισορροπία διαταραχθεί σε περίπτωση θέρμανσης του καυσίμου ή σε περίπτωση ανάμιξής του με άλλο, σωρεύονται σχηματίζοντας κολλώδεις μάζες. Με το πρόβλημα αυτό έρχονται αντιμέτωπα και όσα πλοία είναι υποχρεωμένα να λειτουργούν με διπλά καύσιμα προσεγγίζοντας περιοχές με αυστηρότερους κανονισμούς ή πλοία που αναγκάζονται να αλλάξουν εξολοκλήρου καύσιμο λειτουργίας. Αν τα καύσιμα δεν είναι συμβατά, απαιτείται εκτενής καθαρισμός των σωληνώσεων μεταφοράς και αποθήκευσης του πρώτου καυσίμου και των εξαρτημάτων της μηχανής προκειμένου η μηχανή να λειτουργήσει με διαφορετικό καύσιμο. Ένα ακόμα πρόβλημα κατά την μετάβαση από το ένα καύσιμο στο άλλο εν ώρα πλεύσης είναι το γεγονός ότι κατά τη λειτουργία με βαρύ καύσιμο οι σωληνώσεις και τα εξαρτήματα έχουν υψηλή θερμοκρασία λόγω της διέλευσης του προθερμασμένου βαρέως καυσίμου και υπάρχει κίνδυνος εξαέρωσης του ελαφρύτερου καυσίμου που θα διέλθει και συνεπαγόμενη ανακοπή λειτουργίας της μηχανής. Αντίστοιχα κατά τη μετάβαση από ελαφρύ καύσιμο που δε χρειάζεται προθέρμανση, σε βαρύ, τα εξαρτήματα θα είναι ψυχρά και θα παρακωλύουν τη ροή του.

Γενικότερα, η εναλλαγή των καυσίμων και η πρόσμιξή τους είναι διαδικασίες που πλέον πρέπει να γίνονται με μεγαλύτερη άνεση και ευελιξία, μιας και οι κανονισμοί απαιτούν χρήση καυσίμων στα οποία ούτε τα πλοία αλλά ούτε και ο προμηθευτής τους έχουν μεγάλη εμπειρία, αφού καύσιμα με τόσο χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο πρώτη φορά χρησιμοποιούνται. Η χρήση μόνο αποσταγματικών καυσίμων είναι μια λύση, μιας και η ανάμιξή τους δίνει εν γένει πιο σταθερά αποτελέσματα, ωστόσο η πλειονότητα των μηχανών των πλοίων είναι κατασκευασμένες για λειτουργία σε βαρύ καύσιμο, το οποίο είναι, εκτός των άλλων, και πιο φθηνό, και συνεπώς προτιμώμενο από τους πλοιοκτήτες. Μάλιστα για ένα πλοίο που λειτουργεί εντός αλλά και εκτός ECAs, και συνεπώς πιθανότητα χρησιμοποιεί HFO, είναι συμφέρον να κάνει εναλλαγή με βαρύ καύσιμο, που είναι πιο συμβατό με το HFO απ' ό,τι ένα ελαφρύτερο και δεν απαιτείται να διαθέτει θερμαντήρες ή ψυκτήρες εξαρτημάτων. Συνεπώς γίνονται εκτενείς προσπάθειες για να κατασταθεί η χρήση βαρέων καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο ευρέως ασφαλής.

Ακόμα δεν υφίσταται τυποποίηση βαρέως καυσίμου με περιεκτικότητα σε θείο χαμηλότερη της 0.1% m/m (ULSFO-RM), ωστόσο αρκετοί προμηθευτές παράγουν τέτοια καύσιμα, που είναι συμβατά με τις απαιτήσεις του ISO 8217. Αυτά περιέχουν θείο όσο κι ένα αντίστοιχο καύσιμο MGO, έχουν όμως υψηλότερο ιξώδες και σημείο έναυσης. Κάποια από τα καύσιμα αυτά παρουσιάζουν υψηλό σημείο υγροποίησης σε χαμηλές θερμοκρασίες και αυξημένο κίνδυνο δημιουργίας κρυστάλλων. Ταυτόχρονα, επειδή τα καύσιμα αυτά είναι έντονα παραφινικά είναι πιθανό να μην είναι συμβατά με τα προηγούμενα χρησιμοποιούμενα καύσιμα και συνεπώς απαιτείται προσοχή και πειράματα. Τέλος είναι σημαντικό πριν τη χρήση τους να λαμβάνεται η γνώμη και η έγκρισή τους από τον κατασκευαστή της μηχανής ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία της.

Αντίστοιχα προβλήματα προκύπτουν και για βαρέα καύσιμα με περιεκτικότητα σε θείο μικρότερη της 0.5% m/m (VLSFO-RM). Η περιεκτικότητά σε θείο του αργού πετρελαίου διαφέρει από περιοχή σε περιοχή σε εύρος 0.1-4.1% m/m. Κατά την μετατροπή του σε βαρύ καύσιμο RM η περιεκτικότητα αυτή διπλασιάζεται ή τριπλασιάζεται, σημαίνοντας ότι αργό πετρέλαιο με περιεκτικότητα σε θείο 0.4% μπορεί να δώσει βαρύ καύσιμο RM περιεκτικότητας τουλάχιστον 0.8%~1.3%. Επομένως για να προκύψει καύσιμο με περιεκτικότητα μικρότερη της 0.5% πρέπει τα διυλιστήρια να επεξεργαστούν περαιτέρω το καύσιμο ή να το αναμείξουν με καύσιμο ULSFO. Τα χαρακτηριστικά των καυσίμων από τοποθεσία σε τοποθεσία και από προμηθευτή σε προμηθευτή διαφέρουν και η ανάμιξή τους ή η εναλλασσόμενη χρήση τους χωρίς να προηγείται εκτενής καθαρισμός μπορεί να προκαλέσει αστάθειες στο καύσιμο και δυσλειτουργίες.

Γενικότερα, τα νέα καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο δεν έχουν τυποποιηθεί από τον ISO και παρουσιάζουν διαφορές στα χαρακτηριστικά τους, γεγονός που τα κάνει προς το παρόν επικίνδυνα και ακατάλληλα για αφελή πρόσμιξη. Τα καύσιμα αυτά αναμένεται να είναι παραφινικά και πιθανότατα αρκετά ασύμβατα με τα υπάρχοντα καύσιμα ενώ πρόκειται να έχουν ιξώδες μικρότερο από το HSHFO αλλά μεγαλύτερο από τα MGO, DMA. Η πυκνότητά τους αναμένεται να είναι γενικά μικρότερη, επομένως και οι φυγοκεντρικές μηχανές θα απαιτούν επαναρρύθμιση, ενώ για καύσιμα με υψηλό σημείο υγροποίησης θα απαιτείται η θερμαινόμενη αποθήκευση και μεταφορά τους.

Στην προσπάθεια συμμόρφωσης με τους κανονισμούς για μείωση των SO_x μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εναλλακτικά καύσιμα όπως LNG, LPG, εθάνιο, μεθανόλη, CNG, βιο-καύσιμα, ηλιακή ή ηλεκτρική ενέργεια, ενώ πάντα υπάρχει και η εναλλακτική του φιλτραρίσματος των καυσαερίων Exhaust Gas Cleaning Systems (EGCS) με χρήση βαρέως καυσίμου υψηλής περιεκτικότητας σε θείο High Sulfur Heavy Fuel Oil (HSHFO). Ωστόσο οι πιο διαδεδομένες λύσεις προς το παρόν είναι η χρήση καυσίμων DM ή RM είτε με χαμηλές περιεκτικότητες σε θείο είτε με τη χρήση καταλυτικών φίλτρων (scrubber ή EGCS) [33]. Στην περίπτωση λειτουργίας σε HFO και EGCS τα επίπεδα NO_x δεν επιτυγχάνονται στις NECAs, οπότε απαραίτητα τίθεται σε λειτουργία το φίλτρο των NO_x SCR. Επειδή όμως η ενεργειακή απαίτηση και για τα δύο φίλτρα είναι μεγάλη, το EGCS απενεργοποιείται και η αλλαγή σε καύσιμο με 0,1% S είναι απαραίτητη. Επί του παρόντος η κατεύθυνση που θα πάρει η ναυτική πετρελαιαγορά είναι ακόμα ασαφής, συνεπώς νέες μελέτες θα έπρεπε να στραφούν προς όλες τις πιθανές κατευθύνσεις. Στην παρούσα εργασία η μελέτη λαμβάνει υπόψιν τη λειτουργία σε DM.

2. Δίχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel

2.1. Εξέλιξη μηχανισμών πρόωσης

Τα συστήματα πρόωσης των πλοίων έχουν αναπτυχθεί κατά το πέρασμα των χρόνων ακολουθώντας τις εξελίξεις της τεχνολογίας. Τα αρχαιότερα χρόνια κύριο μέσο πρόωσης ήταν τα χειροκίνητα κουπιά και τα ιστία ή συνδυασμός αυτών, με την κωπηλασία να υπερτερεί σε θέματα ελιγμών και ταχύτητας και συνεπώς να αποτελεί βασικό τρόπο πρόωσης των αρχαίων πολεμικών πλοίων, ενώ η ιστιοπλοΐα ήταν κυριότερο χαρακτηριστικό του εμπορικού στόλου. Όταν η τεχνολογία των όπλων τον 16^ο αιώνα εξελίχθηκε αρκετά ώστε η ελικτικότητα να μην αποτελεί αναγκαίο προτέρημα για τη νίκη, τα πολεμικά πλοία βάσισαν την πρόωσή τους κυρίως στον άνεμο. Το πρώτο προηγμένο μηχανικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για πρόωση ήταν η ατμομηχανή στις αρχές του 19^{ου} αιώνα (North River Steamboat 1807), η οποία αρχικά λειτουργούσε με την καύση ξυλείας, στη συνέχεια με την καύση άνθρακα και τελικά με πετρέλαια καύσιμα. Ο ατμός που δημιουργείται από τη θέρμανση του νερού με την καύση, κινούσε ένα παλινδρομικό έμβολο, ορίζοντας τη βασική αρχή λειτουργίας των εμβολοφόρων κινητήρων. Η παλινδρομική αυτή κίνηση μηχανικά μεταφερόταν αρχικά σε μεγάλες περιστρεφόμενες ρόδες τοποθετημένες πλώρα ή/και πρύμα του πλοίου, προαγγέλοντας την ανακάλυψη της πιο αποδοτικής πρόωσης με έλικα. Το 1897 ξεκίνησε η αντικατάσταση των παλινδρομικών ατμομηχανών από τους ατμοστροβίλους, που αυξάνοντας την αναλογία ισχύος προς βάρος, απέκτησαν αρκετή δημοτικότητα. Επρόκειτο για μηχανές εξωτερικής καύσης, όπου με την καύση αρχικά άνθρακα και στη συνέχεια υγρών καυσίμων παραγόταν ατμός στους λέβητες, που στη συνέχεια προωθούνταν σε ψυγεία προς ανακύκλωση της πορείας του. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο αντικαθιστά σταδιακά τον άνθρακα ως πηγή ενέργειας, εξοικονομώντας εκτός των άλλων, χώρο αποθήκευσης, χώρο εγκαταστάσεων καύσης, ανθρώπινο δυναμικό και ανθρωποώρες εργασίας. Το 2^ο μισό του 20^{ου} αιώνα ωστόσο η αύξηση των τιμών των καυσίμων επανέφερε στο προσκήνιο το παλινδρομικό έμβολο υπό τη μορφή του κινητήρα Diesel, που αντικατέστησε τον ατμοστρόβιλο, ενώ αναπτύχθηκε και η στροβιλο-ηλεκτροπρόωση, κατά την οποία η μηχανική ενέργεια των στροβίλων μετατρέπεται σε ηλεκτρική και από εκεί κατανέμεται στις διάφορες λειτουργίες του πλοίου, μεταξύ άλλων και στην πρόωση. Άλλα είδη πρόωσης είναι αυτή της καύσης φυσικού αερίου, της κίνησης με αεριοστροβίλους ή με πυρηνικούς αντιδραστήρες, η πιο διαδεδομένη μέθοδος όμως είναι αυτή των εμβολοφόρων κινητήρων ντίζελ εσωτερικής καύσης, λόγω της απλής λειτουργίας τους, της εξοικονόμησης καυσίμου και της στιβαρότητάς τους. Αυτό φαίνεται και από τον παρακάτω πίνακα, με στοιχεία από τον παγκόσμιο στόλο του 2016, όπου η πλειονότητα (99.62%) των μηχανών που χρησιμοποιούνται από τα πλοία είναι μηχανές Diesel:

| Engine type ^a | IHS global fleet | |
|--------------------------|------------------|----------------|
| | Vessel count | Share of fleet |
| SSD | 33,047 | 26% |
| MSD | 37,964 | 30% |
| HSD | 56,153 | 44% |
| ST | 543 | 0.4% |
| GT | 109 | 0.08% |
| LNG-Otto | 318 | 0.2% |
| LNG-Diesel | 133 | 0.1% |
| Total | 128,267 | 100% |

^aSSD = slow-speed diesel (<300 rpm); MSD = medium-speed diesel (300-900 rpm); HSD = high-speed diesel (>900 rpm); ST = steam turbine; GT = gas turbine; LNG-Otto = dual fuel engine operating on the Otto cycle; LNG-Diesel = dual fuel engine operating on the Diesel cycle.

Εικόνα 15: Ποσοστό τύπου μηχανών στον παγκόσμιο στόλο (στοιχεία του 2016) [62].

2.2. Εμβολοφόρες ΜΕΚ

Οι θερμικές μηχανές γενικότερα, στις οποίες επιδιώκεται η παραγωγή μηχανικού έργου από τη θερμική ενέργεια που διατίθεται κατά την καύση με αξιοποίηση της αποταμιευμένης χημικής ενέργειας των καυσίμων, χωρίζονται σε μηχανές εξωτερικής και εσωτερικής καύσης. Στις μηχανές εξωτερικής καύσης τα προϊόντα της καύσης του αέρα και του καυσίμου μεταφέρουν θερμότητα σε ένα διαφορετικό ρευστό, δια μέσου μιας επιφάνειας συναλλαγής, που αποτελεί και το εργαζόμενο μέσο, όπως συμβαίνει στις ατμομηχανές. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) τα προϊόντα της καύσης του αέρα και του καυσίμου αποτελούν απευθείας το εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή της μηχανικής ισχύος, όπως συμβαίνει στους κινητήρες ντίζελ, γενικότερα στους εμβολοφόρους κινητήρες, στους αεριοστροβίλους, τους στροβιλοαντιδραστήρες κ.λπ.

Η εμβολοφόρος ΜΕΚ είναι η πιο κοινή μορφή κινητήριου μηχανής. Λόγω της απλής της κατασκευής, με την έννοια ότι ως μηχανή εσωτερικής καύσης δεν απαιτείται η χρήση επιφανειών συναλλαγής θερμότητας, όπως ατμοπαραγωγοί ή συμπυκνωτές, και της δυνατότητάς της να χρησιμοποιεί εργαζόμενο μέσο σε υψηλή θερμοκρασιακή στάθμη, μιας και η κυκλική αλλαγή της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου έχει σαν συνέπεια τα διάφορα θερμικώς φορτιζόμενα τμήματα του κινητήρα να έχουν θερμοκρασία πολύ χαμηλότερη της μέγιστης του αερίου σε έναν κύκλο λειτουργίας, συνδυάζει καλό ολικό βαθμό απόδοσης και υψηλή συγκέντρωση ισχύος. Η αυξημένη απόδοσή της σχετίζεται και με το γεγονός ότι η εμβολοφόρος ΜΕΚ υπό τη μορφή κινητήρα ντίζελ μέσης και μεγάλης ισχύος επιτυγχάνει ικανοποιητική καύση φθηνού καυσίμου. Έτσι χρησιμοποιείται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα για όλες τις μεταφορές (αυτοκίνητα, πλοία, τρένα, αεροπλάνα χαμηλής ταχύτητας) με εξαίρεση τα μέσης και υψηλής ταχύτητας αεροσκάφη, όπου η χρήση στροβιλοαντιδραστήρων καθίσταται απαραίτητη για την επίτευξη υψηλής συγκέντρωσης ισχύος.

Σε όλες τις ΜΕΚ το εργαζόμενο μέσο (αέρας ή αέρας και καύσιμο) αναρροφάται από τη μηχανή και συμπιέζεται πρώτα μέχρι μια ορισμένη πίεση, οπότε αυξάνεται και η θερμοκρασία του ενώ στη συνέχεια προσδίδεται σε αυτό η θερμική ενέργεια που προέρχεται από την καύση του καυσίμου, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του, της πίεσης και του όγκου του. Κατά την αποτόνωση που ακολουθεί παρέχεται, κατά κύριο λόγο, το κινητήριο έργο, ένα τμήμα του οποίου καταναλώνεται για τις ανάγκες της προηγηθείσας συμπίεσης, ενώ το υπόλοιπο αποτελεί το ωφέλιμο έργο της μηχανής. Στις εμβολοφόρες ΜΕΚ οι παραπάνω φάσεις, δηλαδή συμπίεση, καύση, αποτόνωση, λαμβάνουν χώρα μέσα στον ίδιο χώρο, τον κύλινδρο. Σημαντική σημασία για τη λειτουργία της μηχανής έχουν, εκτός από τις παραπάνω κύριες φάσεις, και οι φάσεις εναλλαγής αερίων, δηλαδή της εκκένωσης του κυλίνδρου από το καυσαέριο κατά το τέλος του κύκλου και της εκ νέου πλήρωσής του με νέο αέρα για την εκτέλεση του νέου κύκλου.

Η συγκρότηση των εμβολοφόρων ΜΕΚ βασίζεται στον κινηματικό μηχανισμό εμβόλου-διωστήρα-στροφάλου, όπου το έμβολο παλινδρομεί μέσα στον κύλινδρο και μεταφέρει την ισχύ στη στροφαλοφόρο άτρακτο δια μέσου του διωστήρα. Το έμβολο ακινητεί σε δύο ορισμένες θέσεις της στροφαλοφόρου άτρακτου, προτού επέλθει αναστροφή της κίνησής του. Αυτές οι θέσεις καλούνται άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ) και κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ). Η απόσταση που διανύει το έμβολο για να πάει από το ένα σημείο στο άλλο καλείται διαδρομή ή 'χρόνος' και αντιστοιχεί σε μισή στροφή, δηλαδή 180° της στροφαλοφόρου άτρακτου. Η ύπαρξη βαρέων μαζών του κινητήρα και του σφονδύλου καθιστούν περίπου ομοιόμορφη την ταχύτητα περιστροφής της στροφαλοφόρου άτρακτου, παρά το γεγονός της ανομοιομορφίας της διανομής της στρεπτικής δυνάμεως σε ένα κύκλο λειτουργίας.

Οι εμβολοφόρες ΜΕΚ ανάλογα την εσωτερική τους λειτουργία χωρίζονται σε κινητήρες Otto και σε κινητήρες Diesel. Η διάκριση αυτή βασίζεται στον τρόπο ανάφλεξης του καυσίμου, που μπορεί να είναι είτε υγρό είτε αέριο, και επιδρά στον τρόπο καύσης του. Στους κινητήρες Otto ή εκρήξεως με σπινθήρα υπάρχει πάντοτε ανάφλεξη με τη βοήθεια κάποιου εξωτερικού μέσου, συνήθεστερα ενός ηλεκτρικού σπινθηριστή. Ανάλογα με το καύσιμο που καίνε διακρίνονται σε αεριομηχανές (φυσικό αέριο, υγραέριο, φωταέριο κ.λπ.) και βενζινομηχανές (βενζίνη, βενζόλιο, κ.λπ.). Οι βενζινομηχανές είτε αναρροφούν ομοιογενές προαναμεμιγμένο σε ειδικό όργανο (εξαεριοτή) μίγμα, είτε υφίστανται μηχανική έγχυση καυσίμου, συνεχής ή διακοπτόμενη. Αντίθετα στους κινητήρες Diesel ή αυτανάφλεξης ή καύσεως με συμπίεση, υπάρχει πάντοτε αυτανάφλεξη, λόγω της κατάλληλης εισαγωγής του καυσίμου στον κύλινδρο τη στιγμή κατά την οποία το περιεχόμενό του έχει ήδη θερμανθεί σε επαρκώς υψηλή θερμοκρασία, λόγω της προηγηθείσας σχετικώς ισχυρής συμπίεσης. Ο κινητήρας Diesel, που αλλιώς καλείται πετρελαιομηχανή, αναρροφά πάντα ατμοσφαιρικό αέρα και χρησιμοποιεί σαν καύσιμα τα βαρύτερα της βενζίνης υγρά καύσιμα και της κατηγορίας των πετρελαίων (που είναι λιγότερο πτητικά και φθηνότερα), όπως το αερίελλαιο ή το καύσιμο λεβήτων. Για το σχηματισμό του καυσίμου μίγματος το πετρέλαιο εισάγεται στον κύλινδρο, διασκορπιζόμενο στη μάζα του ήδη συμπιεσμένου αέρα, με τη βοήθεια μηχανικής εγχύσεως, δηλαδή υπό την επίδραση της ισχυρής πίεσεως που δημιουργείται από το σύστημα αντλίας καυσίμου-εγχυτήρα.

Άλλες κατηγοριοποιήσεις των εμβολοφόρων MEK γίνεται ανάλογα:

- τον κύκλο λειτουργίας τους σε δίχρονους και τετράχρονους. Στους 4-X κινητήρες μία περίοδος λειτουργίας διαρκεί δύο πλήρεις περιστροφές (720° της στροφαλοφόρου ατράκτου), δηλαδή περιλαμβάνει 4 πλήρεις διαδρομές εμβόλου ('χρόνους'), εκ των οποίων οι δύο, πρώτη και τέταρτη, είναι αφιερωμένες στην εναλλαγή των αερίων, που έτσι διεξάγεται με σχετική άνεση και υπό την εκτοπιστική δράση του εμβόλου. Την πλήρωση ή εκκένωση του κυλίνδρου καθώς και την έναρξη της καύσεως ρυθμίζουν ειδικά όργανα διανομής (βαλβίδα/-ες εισαγωγής και εξαγωγής, αντλία καυσίμου-εγγυτήρας ή διανομέας-σπινθηριστής), που λαμβάνουν κίνηση από την εκκεντροφόρο άτρακτο, η οποία κινείται από τη στροφαλοφόρο με το μισό της ταχύτητάς της. Στους 2-X κινητήρες μια περίοδος λειτουργίας διαρκεί μόνο μία περιστροφή (360°) της στροφαλοφόρου ατράκτου, δηλαδή περιλαμβάνει 2 διαδρομές-'χρόνους' του εμβόλου, εκ των οποίων μόνο περίπου η μισή πλησίον του ΚΝΣ είναι αφιερωμένη στην εναλλαγή των αερίων. Κατά κανόνα την πλήρωση του κυλίνδρου ρυθμίζει η άνω ακμή του εμβόλου αποκαλύπτουσα ή καλύπτουσα σχετικές θυρίδες τοποθετημένες στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου. Έτσι η εναλλαγή των αερίων διεξάγεται πάντα υπό δυσμενείς συνθήκες, που καθιστούν απαραίτητη τη βίαιη πλήρωση του κυλίνδρου με τη βοήθεια ειδικής αντλίας αποπλύσεως ή σαρώσεως που απορροφά πολύτιμο μηχανικό έργο από την στροφαλοφόρο άτρακτο. Στην περίπτωση αυτή η εκκεντροφόρος άτρακτος κινείται με ταχύτητα ίδια της στροφαλοφόρου.
- την κατασκευή τους: με βάκτρο, κορμό ή αντίθετων εμβόλων. Το βάκτρο συνδέει το έμβολο με το διωστήρα μέσω ζυγώματος ούτως ώστε το βάκτρο να κινείται κατακόρυφα χωρίς το έμβολο να ασκεί πιέσεις στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Οι κινητήρες με κορμό δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν αρκετά στα μέσα του 19^{ου} αιώνα προκειμένου να μειωθεί το συνολικό ύψος της μηχανής, καθώς με αυτή την κατασκευή ο κύλινδρος της μηχανής μπορεί να διαταχθεί οριζοντίως, χωρίς να απαιτείται μείωση του μήκους του πιστονιού. Ο διωστήρας του στροφάλου σε αυτή την περίπτωση συνδέεται άμεσα με το έμβολο, ενώ ο κύλινδρος έχει μεγάλη διάμετρο για να επιτρέπει την κίνησή του. Οι κινητήρες αντίθετων εμβόλων διαθέτουν δύο πιστόνια που κινούνται αντίθετα. Έχουν το πλεονέκτημα του μικρού κυλίνδρου και κεφαλής, που έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένες απώλειες λόγω τριβών, χαμηλότερο βάρος και πολυπλοκότητα κατασκευής, χαμηλότερο κόστος και μειωμένο ύψος μηχανής, έχουν όμως και το μειονέκτημα της σύνδεσης των πιστονιών σε κοινό στροφαλοφόρο, που επιτυγχάνεται με σύμπλεξη και κατασκευή που τελικά αυξάνει το βάρος και την πολυπλοκότητα του κινητήρα.
- την ταχύτητα περιστροφής τους σε αργόστροφους (μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας έως 300 rpm), μεσόστροφους και ταχύστροφους. Αργόστροφοι κινητήρες ορίζονται αυτοί που έχουν μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας έως 300 rpm, στην πραγματικότητα όμως οι περισσότεροι δίχρονοι λειτουργούν κάτω από τις 120 rpm. Πρόκειται για τις μεγαλύτερες μηχανές με τη μεγαλύτερη ισχύ και η ταχύτητά τους μπορεί να φτάσει έως περίπου τις 80 rpm. Μεσόστροφοι ορίζονται αυτοί που περιστρέφονται σε ένα εύρος ταχυτήτων μεταξύ 300-1000 rpm, η πλειονότητά τους όμως λειτουργεί σε ταχύτητα περίπου 500 rpm. Ταχύστροφοι κινητήρες είναι αυτοί που λειτουργούν σε ταχύτητα άνω των 1000 rpm και πρόκειται συνήθως για τετράχρονους κινητήρες χαμηλότερης ισχύος.

Τα περισσότερα σύγχρονα μεγάλα εμπορικά πλοία χρησιμοποιούν αργόστροφες δίχρονες μηχανές με βάκτρο ή μεσόστροφες τετράχρονες με κορμό. Ταχύστροφοι κινητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως από μικρότερα σκάφη. Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της μηχανής σε ένα νέο πλοίο είναι επίσης το μέγεθός της. Οι δίχρονες αργόστροφες μηχανές είθισται να καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση αλλά να είναι αισθητά ψηλότερες, με αποτέλεσμα πλοία όπως τα επιβατηγά, που έχουν χαμηλό κατάστρωμα αυτοκινήτων, να μην μπορούν να στεγάσουν τέτοιες μηχανές και να λειτουργούν με δύο ή περισσότερες μεσόστροφες τετράχρονες μηχανές στεγασμένες σε ένα μακρύ αλλά χαμηλό μηχανοστάσιο, απελευθερώνοντας ωφέλιμο χώρο για τα καταστρώματα πάνω από την ίσαλο. Μάλιστα η χρήση πολλαπλών κινητήρων προσφέρει το πλεονέκτημα της ευελιξίας διαχείρισης φορτίου ώστε οι μηχανές να λειτουργούν όσο το δυνατόν πιο κοντά στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας τους για αύξηση της απόδοσης, ενώ υπάρχει επάρκεια μηχανικής ισχύος σε περίπτωση βλάβης μιας μηχανής. Αντίθετα οι ψηλές δίχρονες μηχανές είναι πιο ιδανικές για τα φορτηγά και πετρελαιοφόρα πλοία, μιας και τα στενά μηχανοστάσια που απαιτούνται απελευθερώνουν χώρο κατά το διάμηκες για κατασκευή μεγαλύτερων αμπαριών και μεταφορά περισσότερου φορτίου.

Οι περισσότερες έλικες είναι σχεδιασμένες ώστε να έχουν αποδοτικότερη λειτουργία σε ταχύτητα περιστροφής που αντιστοιχεί σε ταχύτητες αργόστροφων κινητήρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αργόστροφοι κινητήρες να συνδέονται άμεσα με τον άξονα και την έλικα, ενώ οι μεσόστροφοι και ταχύστροφοι να συνδέονται με την έλικα μέσω μειωτήρα στροφών. Συχνά πλοία με πολλές μεσόστροφες μηχανές έχουν δύο έλικες, που η κάθε μία συνδέεται σε διαφορετική μηχανή. Όταν παραπάνω από μία μηχανές

κινούν μία έλικα, αυτές συνδέονται στον άξονα με συμπλέκτη και ανά πάσα στιγμή μπορούν να απεμπλακούν από αυτόν, ανάλογα με τις απαιτήσεις της πρόωσης, ή σε περίπτωση ανάγκης συντήρησής κάποιας εν ώρα πλεύσης. Στον άξονα επίσης μπορεί να συνδεθεί γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρισμού που εξυπηρετεί άλλες ανάγκες πρόωσης του πλοίου, όπως για παράδειγμα τη λειτουργία των thrusters, ή άλλες ανάγκες του πλοίου.

Ο κινητήρας που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία είναι δίχρονος αργόστροφος ναυτικός πετρελαιοκινητήρας με βάκτρο/διωστήρα σε λειτουργία με ελαφρύ καύσιμο, που είναι και η συνηθέστερη μορφή κινητήρα που συναντάται σε μεγάλα πλοία.

| Fuel type | ST ^a | GT | HSD | | MSD | | SSD | | Total |
|--------------|-----------------|-----------|--------------|---------------|------------|------------------|----------------|--------------|---------------|
| | | | 2-stroke | 4-stroke | 2-stroke | 4-stroke | 2-stroke | 4-stroke | |
| Residual | 79 | 9 | 20 | 569 | 191 | 8,699 | 24,063 | 1459 | 35,089 |
| Distillate | 9 | 53 | 1,832 | 21,693 | 379 | 10,494 | 97 | 222 | 34,779 |
| LNG | 254 | 1 | — | — | — | 221 ^b | 6 ^c | — | 482 |
| Methanol | — | — | — | — | — | 1 | 2 | — | 3 |
| Coal | 2 | — | — | — | — | — | — | — | 2 |
| Nuclear | 5 | — | — | — | — | — | — | — | 5 |
| Total | 349 | 63 | 1,852 | 22,262 | 570 | 19,415 | 24,168 | 1,681 | 70,360 |

^aST = steam turbine; GT = gas turbine; HSD = high-speed diesel (>900 rpm); MSD = medium-speed diesel (300-900 rpm); SSD = slow-speed diesel (<300 rpm). ^bLNG MSD 4-stroke contains LNG-Otto cycle and LNG-Diesel cycle dual fuel engines. ^cLNG SSD 2-stroke contains only LNG-Diesel cycle dual fuel engines.

Εικόνα 16: Ποσοστό του παγκόσμιου στόλου το 2015 ανά τύπο μηχανής και καυσίμου [62].

2.3. Δίχρονος κινητήρας Diesel

2.3.1. Κύκλος λειτουργίας

Οι δίχρονοι κινητήρες είναι πιο απλοί από μηχανικής άποψης από τους τετράχρονους, είναι όμως πιο περίπλοκοι από την άποψη των θερμοδυναμικών και αεροδυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στον κύλινδρο, μιας και τα βασικά στάδια του κύκλου λειτουργίας ολοκληρώνονται σε μικρότερους χρόνους και επικαλύπτονται:

- Η έγχυση του καυσίμου ξεκινάει περίπου στις 4° προ του ΑΝΣ προκειμένου να έχει τελειώσει στο ΑΝΣ ή λίγο μετά από αυτό και από το ΑΝΣ να ξεκινάει η δυναμική κάθοδος του πιστονιού, μιας και το καύσιμο καίγεται σχεδόν με την είσοδό του στον κύλινδρο.
- Η εκτόνωση συμβαίνει μέχρι τις 103° περίπου οπότε και αποκαλύπτεται η θυρίδα εξαγωγής των καυσαερίων, οπότε και η πίεση και η θερμοκρασία μειώνονται.
- 32° αργότερα, δηλαδή περίπου στις 135° στροφάλου (ΚΝΣ-45°) ξεκινάει η σάρωση των καυσαερίων, που διαρκεί 90° περίπου, μέχρι δηλαδή μέχρι τις 135° προ του ΑΝΣ. Η σάρωση γίνεται είτε μηχανικά είτε με υπερπληρωτή και είναι η διαδικασία κατά την οποία τα καυσαέρια ωθούνται εκτός του κυλίνδρου και αυτός πληρώνεται με νέο ατμοσφαιρικό αέρα. Η έξοδος των καυσαερίων είναι δυνατή λόγω του γεγονότος ότι κατά τις 32° που μεσολαβούν από το άνοιγμα της θυρίδας εξαγωγής μέχρι το άνοιγμα της θυρίδας εισόδου ατμοσφαιρικού αέρα, η πίεση των καυσαερίων έχει μειωθεί αρκετά ώστε να είναι μικρότερη της πίεσης του εισαγόμενου ατμοσφαιρικού αέρα και να μη γίνει αναρρόφηση καυσαερίων. Είναι σημαντικό η σάρωση να εκτελεστεί με επιτυχία, προκειμένου να μείνουν στον κύλινδρο όσο το δυνατόν λιγότερα υπολείμματα καυσαερίων ώστε η καύση του επόμενου κύκλου να έχει επάρκεια σε οξυγόνο.
- 16° μετά το πέρας της σάρωσης, δηλαδή περίπου 61° μετά το ΚΝΣ, κλείνουν οι θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής και ξεκινάει η συμπίεση. Η σάρωση συνεπώς ξεκινάει μετά το άνοιγμα της θυρίδας εξαγωγής και τελειώνει πριν το κλείσιμό της, γεγονός που αυξάνει την αποδοτικότητα της σάρωσης και συνεπώς αυξάνει και το ωφέλιμο έργο της μηχανής, μιας και η σάρωση καταναλώνει έργο από αυτή.
- Η συμπίεση ξεκινά από τις 61° μετά το ΚΝΣ και διαρκεί περίπου 119°, οπότε και συμβαίνει η νέα έγχυση καυσίμου.

Οι παραπάνω χρόνοι, που αποτυπώνονται σε μοίρες στροφάλου, ρυθμίζονται διαφορετικά σε κάθε μηχανή ανάλογα με τους στόχους, οι αποκλίσεις όμως δεν είναι μεγάλες.

2.3.2. Ρύθμιση ισχύος

Η ρύθμιση της ισχύος των κινητήρων Diesel, σε αντίθεση με τους κινητήρες Otto, που η ρύθμιση γίνεται ποσοτικά με αύξηση της πλήρωσης του κυλίνδρου αλλά με ίδια περίπου αναλογία καυσίμου-αέρα, γίνεται με αλλαγή της ποιότητας της γόμωσης του κυλίνδρου και της ρύθμισης της αναλογίας καυσίμου-αέρα. Όπως αναφέρθηκε και ωρύτερα, στους κινητήρες Diesel πρώτα πληρώνεται ο κύλινδρος και ατμοσφαιρικό αέρα καύσης και λίγο προ του ΑΝΣ ξεκινάει ο ψεκάσιμος του καυσίμου, με αποτέλεσμα η καύση να συμβαίνει σε ένα ετερογενές μείγμα καυσίμου-αέρα. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η δράση της τύρβης μέσα στον κύλινδρο. Συνεπώς η έναυση και ο ρυθμός της καύσεως ελέγχονται από τη στιγμή της εγχύσεως και το ρυθμό της εγχύσεως του καυσίμου, σε συνδυασμό κυρίως με το επίπεδο της τύρβης του συμπιεσμένου αέρα, ενώ σαφώς υπάρχει επηρεασμός και από την πίεση και θερμοκρασία. Επειδή ο διατιθέμενος χρόνος για το σχηματισμό του μίγματος είναι μικρός, είναι πάντοτε αναγκαία μια περίσσεια αέρα (λόγος μάζας αέρα προς μάζα καυσίμου 18:1 έως 25:1) για την επίτευξη της τέλει καύσεως, πράγμα που όμως οδηγεί σε μειωμένη συγκέντρωση ισχύος.

Η καύση του καυσίμου γίνεται καθώς τμήματα του καυσίμου έρχονται σε θερμοκρασία αυτανάφλεξης, στην ελάχιστη δηλαδή θερμοκρασία που εξασφαλίζει τέτοια ταχύτητα αντιδράσεως ώστε, υπερνικώντας π.χ. τις απώλειες ψύξεως, να έχουμε ταχεία ανύψωση της θερμοκρασίας και λοιπά φαινόμενα της ταχείας καύσεως. Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι ομόσημη συνάρτηση του χρόνου καθυστέρησης της έναυσης, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται από τη στιγμή κατά την οποία το μείγμα απέκτησε τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης μέχρι τη εμφάνιση πραγματικών φαινομένων καύσεως. Για έναν κινητήρα Diesel είναι σημαντικό η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου να είναι μικρή, ώστε κατά την έγχυσή του να καίγεται γρήγορα, δηλαδή με μικρή καθυστέρηση, χωρίς να συσσωρεύεται, οπότε θα καιγόταν απότομα σε μεγάλη ποσότητα, προκαλώντας κρουστικά φαινόμενα, που αυξάνουν το θόρυβο και καταπονούν τα εξαρτήματα της μηχανής. Απαιτούνται συνεπώς καύσιμα που αντιδρούν ευχερώς με το οξυγόνο. Τυπικές τιμές θερμοκρασίας αυτανάφλεξης καυσίμων σε στοιχειομετρική καύση με αέρα σε πίεση 1 bar είναι: αεριέλαιο Diesel 330~350° C, λιπαντικό έλαιο 380~420° C, βενζίνη 520~530° C, βενζόλιο 670~770° C, μεθάνιο 645~750° C.

Η αυξομείωση του έργου και της ισχύος του κινητήρα επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της ποιότητας του μίγματος, δηλαδή του λόγου αέρα-καυσίμου, η οποία προκαλείται με τη μεταβολή της ποσότητας του εγχεόμενου καυσίμου ανά κύκλο λειτουργίας, ενώ η ποσότητα του αέρα καύσης παραμένει σχεδόν σταθερή, αφού σταθερές παραμένουν και οι στροφές του στροφαλοφόρου άξονα (με τη βοήθεια του ρυθμιστή στροφών). Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να επιφορτωθεί ένας κινητήρας Diesel τίθεται συνήθως από την καύση και την περίσσεια αέρα, δηλαδή αντιστοιχεί στο φορτίο πέραν του οποίου αρχίζει να παράγεται, πλέον του 'ελαφρού', καπνός με υψηλές περιεκτικότητες σε άκαυστο άνθρακα στην εξαγωγή. Στους μεγαλύτερους κινητήρες όρια τίθενται συνθηθέστερα από τις θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις.

Η ικανοποιητική λειτουργία του κινητήρα Diesel εξαρτάται από τον κατάλληλο έλεγχο της εγχύσεως του καυσίμου και της κινήσεως του αέρα στο θάλαμο καύσεως. Ιδανικά είναι επιθυμητή μια καλή ποιότητα εγχύσεως, που να επιφέρει εκτός των άλλων και μείωση της καθυστέρησης αναφλέξεως, του καυσίμου και ένα υψηλό επίπεδο κινήσεως του αέρα στον κύλινδρο, με σκοπό την επίτευξη γρήγορης έναυσης φλόγας η οποία θα κινηθεί στο θάλαμο καύσης με μεγάλη ταχύτητα, προς εύρεση επαρκούς οξυγόνου.

Η λύση της καλής ποιότητας εγχύσεως του καυσίμου, δηλαδή ενός καλού διασκορπισμού του καυσίμου στον θάλαμο καύσης, επιτυγχάνεται με ακροφύσια πολλών οπών υπό υψηλή διαφορά πίεσεως εγχύσεως που, εξαιτίας του προς τα κάτω περιορισμού του μεγέθους τους, λόγω κινδύνου αποφράξεώς τους, περιορίζεται στους μέσων και μεγάλων διαστάσεων με ενιαίους θαλάμους καύσεως. Στους μικρούς κινητήρες αντίθετα, η ποιότητα της εγχύσεως είναι μικρή, καθώς συνήθως χρησιμοποιούν ακροφύσια μίας οπής υπό μικρή διαφορά πίεσεως, και η απαιτούμενη ανάμειξη επιτυγχάνεται με τη βίαιη κίνηση που προέρχεται από την ίδια την καύση με κατάλληλο χωρισμό του θαλάμου καύσεως σε δύο τμήματα (διμερείς θάλαμοι καύσεως).

Ο ενιαίος θάλαμος καύσεως με άμεση έγχυση του καυσίμου χρησιμοποιείται περισσότερο στους κινητήρες μεγάλων και μέσων διαστάσεων, που είναι και μικρής ή μέσης ταχύτητας περιστροφής, και σχηματίζεται μεταξύ της άνω επιφάνειας του εμβόλου και της κάτω επιφάνειας του καλύμματος του κυλίνδρου. Στην καλή κατανομή του καυσίμου στο θάλαμο μέσω της τυρβώδους ροής βοηθάει και η γεωμετρία του θαλάμου, όπως είναι η διαμόρφωση της άνω επιφάνειας του εμβόλου και γενικότερα των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσεως, ώστε κατά τη συμπίεση ο αέρας να υφίσταται εκτόπιση και ακτινικώς (squish), η κατάλληλη διάταξη της θυρίδας εισαγωγής, ώστε ο αέρας να εισέρχεται με εφαιπτομενική συνιστώσα ταχύτητας (swirl), η προσθήκη ειδικού μονόπλευρου διαφράγματος επί της θυρίδας εισαγωγής για εφαιπτομενική εκτροπή του εισερχόμενου αέρα, κ.λπ.

2.3.3. Συστήματα έγχυσης καυσίμου

Ο τρόπος έγχυσης του καυσίμου είναι εξαιρετικά σημαντικός για τη βέλτιστη λειτουργία του κινητήρα αλλά και τη μείωση των ρύπων καθώς από αυτόν καθορίζεται η ποιότητα της καύσης, μέσω του χρονισμού, της ποσότητας και της ποιότητας της έγχυσης.

2.3.3.1. Μηχανική έγχυση

Η έγχυση του καυσίμου κυρίως παλαιότερα γινόταν μηχανικά, με το έμβολο του εγχυτήρα να κινείται από την εκκεντροφόρο άτρακτο και συνεπώς να εξαρτάται από τις στροφές του κινητήρα. Σύμφωνα με αυτή την κατασκευή, όταν το έμβολο της αντλίας βρίσκεται στο κατώτερο σημείο της διαδρομής του, το καύσιμο εξαναγκάζεται να εισχωρήσει στο χώρο του κυλίνδρου της αντλίας δια μέσου της θυρίδας εισαγωγής. Την κατάλληλη χρονική στιγμή, το έμβολο της αντλίας ανυψώνεται καλύπτοντας τη θυρίδα εισαγωγής του καυσίμου και συμπιέζοντάς το, με αποτέλεσμα αυτό να ανοίγει τη βαλβίδα καταθλίψεως και να μεταδίδει την πίεσή του στο καύσιμο που βρίσκεται μέσα στο σωλήνα καταθλίψεως. Το καύσιμο αυτό με τη σειρά του, υπερνικώντας τη δύναμη του ελατηρίου που συγκρατεί τη βελονοειδή βαλβίδα, που φράσσει τον εγχυτήρα, χαμηλωμένη, την ανυψώνει, και εκτοξεύεται στο θάλαμο καύσης του κυλίνδρου υπό μεγάλη διαφορά πίεσεως δια μέσου των ακροφυσίων του εγχυτήρα.

Το τέλος της έγχυσης έρχεται όταν ακόμη κατά την άνοδο του εμβόλου του καυσίμου αποκαλυφθεί η θυρίδα υπερχειλίσεως του καυσίμου, που επικοινωνεί με το χώρο χαμηλής πίεσεως του καυσίμου, ή αν δεν υπάρχει τέτοια, όταν αποκαλυφθεί η θυρίδα εισαγωγής. Η στιγμή της αποκάλυψης της θυρίδας χαμηλής πίεσης σημαίνει την επικοινωνία του χώρου καταθλίψεως και του χώρου αναρρόφησης του καυσίμου, την πτώση της πίεσης στο χώρο κατάθλιψης και κατά συνέπεια την έκταση του ελατηρίου και το κλείσιμο της βαλβίδας, και ρυθμίζεται από την ελικοειδή εγκοπή που υπάρχει στο έμβολο της αντλίας. Η γωνία περιστροφής του εμβόλου γύρω από το διαμήκη άξονά του, και επομένως η θέση της εγκοπής και ο χρόνος αποκάλυψης της θυρίδας εισαγωγής, ρυθμίζεται από έναν οδοντωτό κανόνα και αλλάζει ανάλογα την απαίτηση του φορτίου.

Σε κινητήρες μέσων και μεγάλων διαστάσεων χρησιμοποιείται μία ανεξάρτητη αντλία για κάθε κύλινδρο, που κινείται αμέσως από τον εκκεντροφόρο άξονα του κινητήρα. Στους κινητήρες μικρών ή και μέσων διαστάσεων χρησιμοποιείται συνήθως μία κεντρική πολυκύλινδρη αντλία, όπου κάθε κύλινδρος εξυπηρετεί και έναν κύλινδρο του κινητήρα.

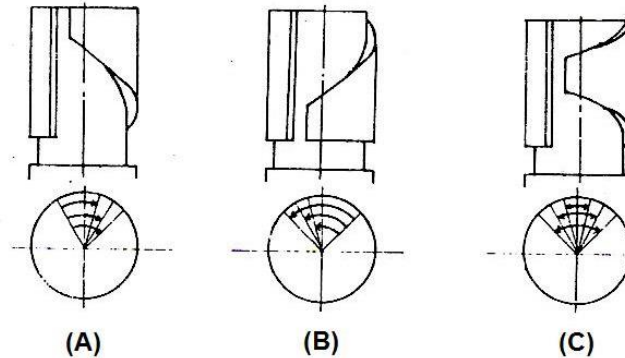
Με τον τρόπο αυτό της έγχυσης η υδροστατική πίεση στο σωλήνα κατάθλιψης είναι σταθερή και ίση με την πίεση του ελατηρίου, όπως σταθερή είναι και η πίεση με την οποία το καύσιμο εισχωρεί στο θάλαμο καύσης. Παρόλα αυτά η ταχύτητα του εμβόλου, που σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, ανάλογα το φορτίο δεν παραμένει σταθερή. Συνεπώς η λειτουργία σε διαφορετικά φορτία συνεπάγεται και διαφορετική ταχύτητα εισχώρησης του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, κάτι που επηρεάζει τη διαμόρφωση του σπρέι και την τελειότητα της καύσης. Όταν για παράδειγμα το πλοίο πλέει με χαμηλότερες ταχύτητες, το φορτίο είναι μειωμένο και αντίστοιχα μειωμένες είναι και οι στροφές του κινητήρα, το έμβολο της αντλίας καυσίμου κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα, με αποτέλεσμα και η ταχύτητα του καυσίμου να είναι μειωμένη. Έτσι το σπρέι δε διασπάται σε αρκούντως μικρά σταγονίδια και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα παραμονής άκαυστου καυσίμου και δημιουργίας μαύρου ρυπογόνου καπνού κατά την εξαγωγή.

Επιπλέον, το θεωρητικό μοντέλο κατά το οποίο η βελόνα της θυρίδας έγχυσης καυσίμου σηκώνεται όταν η πίεση στο θάλαμο κατάθλιψης καυσίμου φτάσει την πίεση του ελατηρίου, δεν ισχύει επακριβώς στην πραγματικότητα λόγω της ταχείας αύξησης της πίεσης του καυσίμου και της πρακτικής συμπεστότητάς του. Το έμβολο κινείται με μεγάλη ταχύτητα με αποτέλεσμα το καύσιμο να συμπιέζεται τοπικά και η συμπίεση αυτή να μεταδίδεται σαν κύμα κρούσης μέσα στο σωλήνα κατάθλιψης ανοίγοντας τη βαλβίδα. Το κύμα αυτό ταξιδεύει με περίπου 1300 m/s ταχύτητα και αναπόφευκτα ανακλάται μεταξύ βαλβίδας και σωλήνα μέχρι να σταθεροποιηθεί η πίεση σε όλο το ρευστό. Ως τότε όμως η βαλβίδα ταλαντεύεται και ανοιγοκλείνει με αποτέλεσμα η έναρξη της έγχυσης και η ποσότητα του καυσίμου που έχει ορισθεί να εγχυθεί διαφέρουν από τις προγραμματισμένες.

Το γεγονός της ανεξέλεγκτης αυτής παροχής, στα πλαίσια της ταλάντωσης της βαλβίδας, καθιστά ακόμα πιο σημαντική τη διατήρηση των εξαρτημάτων του εγχυτήρα σε καλή κατάσταση προκειμένου η έγχυση σε όλους τους κυλίνδρους να είναι ίδια. Μια ασυμμετρία στην έγχυση των κυλίνδρων και κυρίως στην ποσότητα του εγχεόμενου μπορεί να προκαλέσει ταλάντωση στην κίνηση του άξονα, εκτεταμένο θόρυβο και καταστροφές. Έτσι μια φραγή ενός ακροφυσίου λόγω χρήσης κακής ποιότητας καυσίμου θα έχει σαν αποτέλεσμα την εκτεταμένη αύξηση της πίεσης του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, την καταπόνηση των εξαρτημάτων έγχυσης και τη μείωση της εγχεόμενης ποσότητας. Ακόμα και η πιο μικρή φθορά των

εξαρτημάτων μπορεί να αποβεί ολέθρια, μιας και οι διαστάσεις τους έχουν εξαιρετικά μικρές ανοχές και η κατασκευή τους μεγάλη ακρίβεια.

Πέραν των μειονεκτημάτων που σχετίζονται με την πίεση και τη μετάδοσή της, που επηρεάζουν την ποσότητα, την έναρξη και την ταχύτητα της έγχυσης, η μηχανική έγχυση έχει το επιπλέον μειονέκτημα του περιορισμένου ελέγχου του χρονισμού της έγχυσης. Το εύρος της έγχυσης, η έναρξη και το πέρας της ορίζονται αυστηρά από την εγκοπή του εμβόλου και η έγχυση είναι απαραίτητως συνεχόμενη, δεν υπάρχει δηλαδή δυνατότητα διακοπόμενης έγχυσης. Τα εύρη και οι δυνατές ρυθμίσεις της έγχυσης φαίνονται παρακάτω:

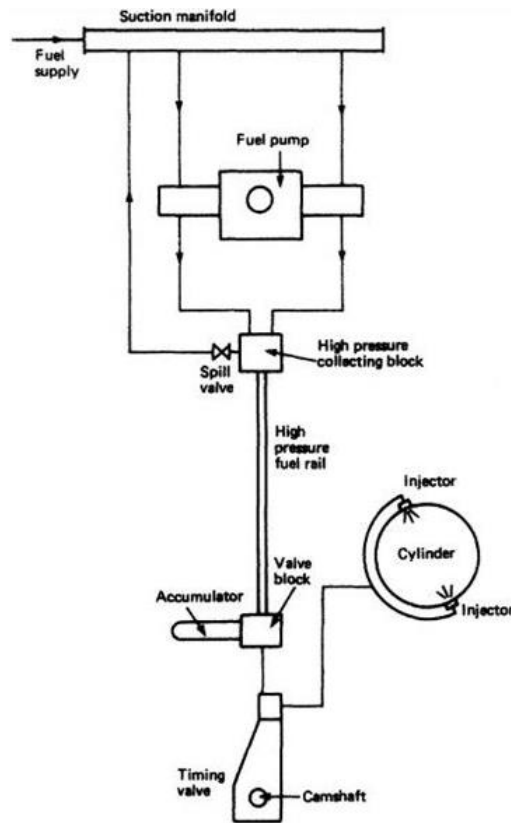


Εικόνα 17: Ρύθμιση μηχανικής έγχυσης

2.3.3.2. Σύστημα κοινού συλλέκτη/ Common Rail System (CRS) [64]

Παρότι η ιδέα του συστήματος του κοινού συλλέκτη, στην προσπάθεια έγχυσης σταθερά υψηλής πίεσης, ξεκίνησε από τους ναυτικούς κινητήρες, και μάλιστα από κινητήρες υποβρύχιων κατασκευών το 1921, η τελική του μορφή με τα πλεονεκτήματα του ηλεκτρονικού ελέγχου αναπτύχθηκε και υιοθετήθηκε πρώτα από την αυτοκινητοβιομηχανία. Οι πρώτες μελέτες γίνονται τη δεκαετία του '60 και η ευρεία κυκλοφορία στην αγορά το 1997 με το σύστημα κοινού συλλέκτη ηλεκτρονικής έγχυσης να ενσωματώνεται από τότε πλήρως στην αγορά της αυτοκινητοβιομηχανίας. Εφαρμογή του CRS με ηλεκτρονικό εγχυτήρα στους ναυτικούς κινητήρες ή λοιπές βαριές μηχανές ξεκινάει δειλά από το 2000.[130][131]

Παλαιότερα το σύστημα κοινού συλλέκτη δεν είχε μεγάλες διαφορές από το σύστημα μηχανικής έγχυσης, παρά μόνο ότι αντί κάθε κύλινδρος να έχει τον δικό του πάροχο καυσίμου, είχαν όλοι έναν κοινό, από τον οποίο λάμβαναν καύσιμο όλοι οι κύλινδροι. Τα πλεονεκτήματα έναντι της μηχανικής έγχυσης χωρίς κοινό συλλέκτη είναι ότι το καύσιμο στον συσσωρευτή καυσίμου βρίσκεται σε περίσσεια και σε ψηλότερη πίεση, σταθερά περίπου στα 550 bar, ενώ υπάρχει και δοχείο απόσβεσης κυμάτων πίεσης κατά την εναλλαγή φορτίου στον κινητήρα. Ωστόσο πάλι η έναρξη και το πέρας της έγχυσης ρυθμίζονται από το στροφαλοφόρο άξονα περιορίζοντας τις δυνατότητες του προφίλ έγχυσης. Με τις νέες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί στον τομέα του συστήματος έγχυσης με κοινό συλλέκτη είναι δυνατός ο ηλεκτρονικός έλεγχος της έγχυσης, και συνεπώς σε ναυτικούς κινητήρες, από το 2004.

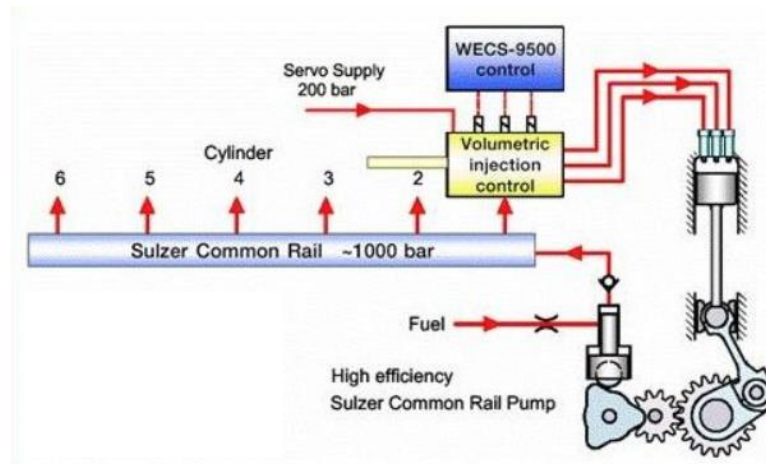


Εικόνα 18: Διάγραμμα συστήματος με common rail και μηχανική έγχυση [66]

Το σύστημα έγχυσης με κοινό συλλέκτη και ηλεκτρονικό έλεγχο μπόρεσε να υλοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλους κινητήρες Diesel τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάπτυξης του ηλεκτρονικού ελέγχου, που επιτρέπει την ανεξαρτησία των επιμέρους συστημάτων και τον πλήρη έλεγχο των λειτουργιών της κατασκευής αυξάνοντας το εύρος και τις δυνατότητές της. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος, έναντι της μηχανικής έγχυσης, είναι ότι υπάρχει πλήρης ηλεκτρονικός έλεγχος της έναρξης και του πέρατος της έγχυσης, της ποσότητας και της πίεσης του εγχεόμενου καυσίμου.

Τα πλεονεκτήματα αυτά προκύπτουν από το διαχωρισμό και την ανεξαρτησία του ελέγχου της έγχυσης από το σύστημα πίεσης και ροής του καυσίμου, επιτρέποντας την παρέμβαση στο μηχανικό και υδραυλικό σύστημα ξεχωριστά και πετυχαίνοντας σταθερή έγχυση τη στιγμή της επιθυμητής πίεσης. Επιπλέον, κάθε κύλινδρος έχει 3 εγχυτήρες με αυτόνομο έλεγχο ο καθένας, για μεγαλύτερη ευελιξία, οι οποίοι συνήθως λειτουργούν ταυτόχρονα, δίνοντας όμως και τη δυνατότητα ασύγχρονης λειτουργίας σε περιπτώσεις που αυτό είναι επιθυμητό για επίτευξη βέλτιστης καύσης.

Τα βασικά κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος είναι: ο κοινός συλλέκτης (rail unit), που βρίσκεται στο πλάι των κυλίνδρων, το σύστημα παροχής (supply unit), που βρίσκεται στο πλάι της μηχανής, το φίλτρο του ελαίου λειτουργίας και το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, που περιλαμβάνει και το μετρητή γωνίας στροφάλου. Το σύστημα στο σύνολό του μπορεί να πετύχει και να λειτουργήσει με πιέσεις καυσίμου έως και 1000 bar και πιέσεις ελαίου λειτουργίας και ελέγχου έως και 200 bar.



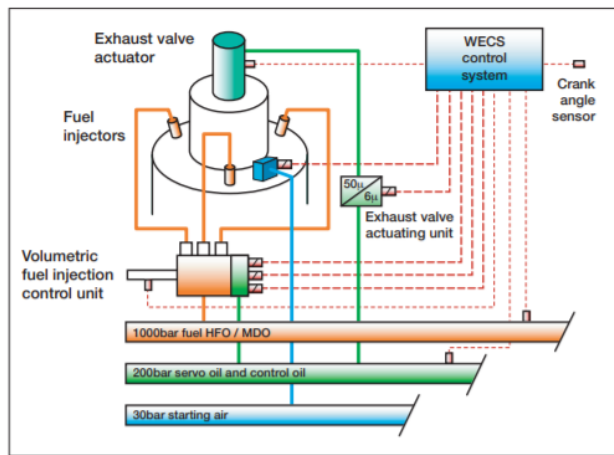
Εικόνα 19: Διάγραμμα παροχής καυσίμου στο common rail [66].

Η μονάδα παροχής καυσίμου και ελαίου λειτουργίας συνδέεται μέσω γρανάζωσης αύξησης στροφών με το στροφαλοφόρο άξονα και οδηγεί το καύσιμο και το λάδι στις αντίστοιχες λεκάνες του κοινού συλλέκτη. Η σύνδεση αυτή με το στροφαλοφόρο άξονα διαφέρει με την αντίστοιχη της μηχανικής έγχυσης, καθώς η μεσολάβηση των γραναζιών και η αύξηση των στροφών οδηγεί σε μια σταθερή παροχή καυσίμου και ελαίου και όχι σε απότομη αύξηση πίεσης και διάδοση με μορφή κύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, εκτός των άλλων, και τη μικρότερη καταπόνηση των εξαρτημάτων της κατασκευής, καθώς τα κρουστικά φορτία είναι μικρότερα από αυτά της μηχανικής έγχυσης. Η μονάδα παροχής διαθέτει συνήθως από 4 έως 8 αντλίες παροχής καυσίμου με μέγεθος ανάλογο των απαιτήσεων της μηχανής σε παροχή όγκου καυσίμου, που ανά πάσα στιγμή μπορούν να αποσυνδεθούν και η παροχή να σταματήσει. Η παροχή όγκου και η πίεση στον κοινό συλλέκτη ρυθμίζεται κατά την αναρρόφηση του καυσίμου μέσω ρύθμισης του αναρροφόμενου όγκου στις αντλίες παροχής. Έτσι καταθλίβεται μόνο η ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για το κάθε φορτίο και όχι παραπάνω, καταναλώνοντας άσκοπα έργο του στροφαλοφόρου άξονα. Οι σωλήνες παροχής οδηγούν το συμπιεσμένο καύσιμο σε έναν διπλό συλλέκτη, ο οποίος διαθέτει βαλβίδα ασφαλείας στα 1250 bar, από όπου και μεταφέρονται μέσω δύο διπλότοιχων σωλήνων ανώτερα, στον κοινό συλλέκτη (rail unit). Στη μονάδα παροχής, απέναντι από τις σωλήνες παροχής καυσίμου υπάρχουν οι σωλήνες παροχής ελαίου λειτουργίας με αντίστοιχο σύστημα σωληνώσεων που οδηγούν σε συλλέκτη.

Το έλαιο λειτουργίας χρησιμεύει για τη ρύθμιση του ανοίγματος των βαλβίδων εισαγωγής καυσίμου και εξαγωγής καυσαερίων. Η παροχή του γίνεται από το σύστημα παροχής (supply unit), όπως και του καυσίμου, μέσω αξονικών πιστονιών στις υδραυλικές σωλήνες, που ανάλογα τη μηχανή και τους κυλίνδρους της είναι από 3 έως 6. Τα πιστόνια αυτά συνδέονται επίσης με το στροφαλοφόρο μέσω αζωτήρα στροφών για την επίτευξη κατάλληλης και κατά το δυνατόν ομοιόμορφης ταχύτητας, με συνήθη πίεση λειτουργίας περίπου στα 200 bar. Η πίεση λειτουργίας είναι ρυθμιζόμενη, ώστε σε απαιτήσεις χαμηλής πίεσης, να μην καταναλώνεται άσκοπα ισχύ της μηχανής. Το έλαιο λειτουργίας, αλλά και αυτό του ελέγχου, είναι το ίδιο λάδι που χρησιμοποιείται και για τη λίπανση της μηχανής, αφού έχει φιλτραριστεί και καθαριστεί. Το φιλτράρισμα αποσκοπεί στην προστασία των σωληνώσεων από φθορά και την παράταση της ζωής των επιμέρους εξαρτημάτων. Μετά το φίλτρο το έλαιο διαχωρίζεται προς τις σωληνώσεις του ελαίου λειτουργίας και σε αυτές του ελαίου ελέγχου.

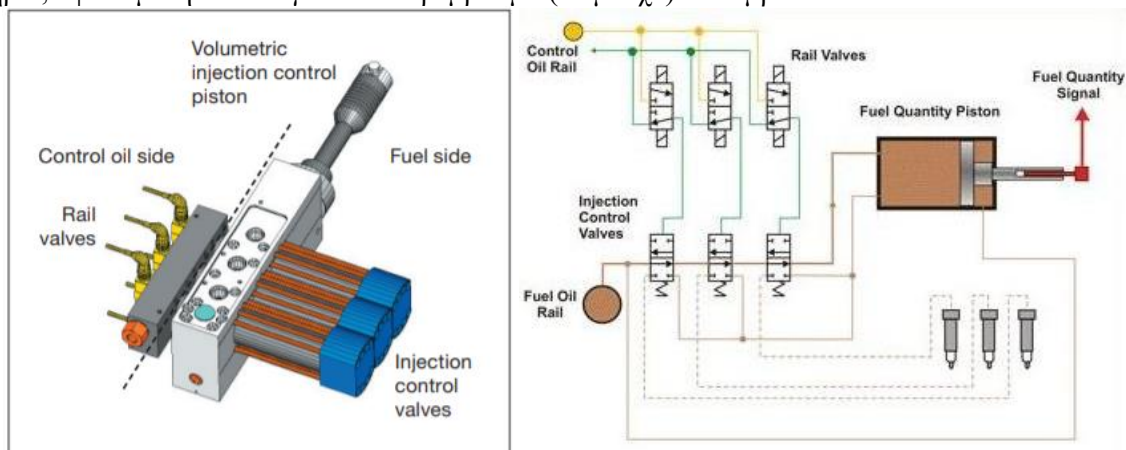
Η παροχή του ελαίου ελέγχου γίνεται σταθερά και ανεξάρτητα από το φορτίο της μηχανής στα 200 bar, μέσω δύο αντλιών, εκ των οποίων ο ένας βρίσκεται σε λειτουργία και ο άλλος υπάρχει για περίπτωση ανάγκης. Η κάθε αντλία έχει τη δική της ρυθμιστική βαλβίδα πίεσης και τη βαλβίδα ασφαλείας. Το έλαιο ελέγχου αποτελεί μικρό ποσοστό του συνολικού ποσού ελαίου που διέρχεται από το φίλτρο, αλλά είναι το μέσο που ανοίγει όλες τις βαλβίδες ελέγχου της έγχυσης του κοινού συλλέκτη προκειμένου το καύσιμο από τον κοινό συλλέκτη να οδηγηθεί στις βαλβίδες έγχυσης. Η πίεση διατηρείται σταθερή προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια στο χρονοισμό των βαλβίδων ελέγχου.

Ο κοινός συλλέκτης περιλαμβάνει το συλλέκτη καυσίμου και το συλλέκτη ελαίου μαζί με τους σωλήνες και τα λοιπά εξαρτήματα, και τοποθετείται στο ψηλότερο επίπεδο της μηχανής, κάτω από τα καλύμματα των κυλίνδρων. Ο συλλέκτης καυσίμου εσωκλείει έναν όγκο καυσίμου σαφώς μεγαλύτερο από αυτόν που θα χρησιμοποιηθεί στην έγχυση και διαθέτει μέσο απόσβεσης της κυματικής διάδοσης της πίεσης. Ο όγκος του καυσίμου στο συλλέκτη και η παροχή του καυσίμου σε αυτόν είναι σε μεγάλο ποσοστό σταθεροί, ούτως ώστε η πίεση στο συλλέκτη να είναι κατά το δυνατόν αμετάβλητη, με μία μόνο αμελητέα πτώση της αμέσως μετά την έγχυση.



Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση συστήματος [64].

Το καύσιμο από τον κοινό συλλέκτη οδηγείται στους εγχυτήρες αφού πρώτα περάσει από τις βαλβίδες ελέγχου της έγχυσης. Η μονάδα ελέγχου της έγχυσης ελέγχει ακριβώς το χρόνο της έγχυσης, τον όγκο του καυσίμου της έγχυσης και το προφίλ της έγχυσης (ποσοστό της συνολικής εγχυόμενης μάζας -χρόνος). Κάθε κύλινδρος έχει τη δική του μονάδα ελέγχου έγχυσης (Injection Control Unit) και οι βαλβίδες ελέγχου του είναι όσες και οι εγχυτήρες καυσίμου, δίνοντας τη δυνατότητα ανεξάρτητης και συντονισμένης ή μη λειτουργίας τους. Συνήθως στις περισσότερες μηχανές κάθε κύλινδρος έχει 3 εγχυτήρες. Κάθε βαλβίδα ελέγχου, που ενεργοποιείται με έλαιο λειτουργίας, συνοδεύεται και από μια ηλεκτρο-υδραυλική βαλβίδα, η οποία λαμβάνει σήματα για την έναρξη και το τέλος της έγχυσης από την αντίστοιχη ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου, η οποία με τη σειρά της παίρνει σήματα σχετικά με το χρόνο, την ταχύτητα και τη γωνία στροφάλου σε κάθε κύκλο από ένα σένσορα συνδεδεμένο στο στροφαλοφόρο. Οι εγχυτήρες καυσίμου λειτουργούν υδραυλικά, όπως και στη μηχανική έγχυση, με το υδραυλικό λάδι, αντί του καυσίμου, σε υψηλή πίεση να ωθεί τη βελόνα του εγχυτήρα. Συνεπώς η αλλαγή καυσίμου δεν επιφέρει κινδύνους στη λειτουργία του συστήματος σε ό,τι αφορά τη λειτουργία και την καθαριότητα του μηχανισμού. Η RT-Flex ωστόσο, με τη μετάβαση σε πιο ελαφρύ καύσιμο LS αντιμετώπισε πρόβλημα εκτεταμένης διαρροής καυσίμου στο θάλαμο υδραυλικού λαδιού του εγχυτήρα, οφειλόμενη στο στεγνωτικό παρέμβυσμα (τσιμούχα) του εμβόλου.



Εικόνα 21: Injection Control Unit για 3 εγχυτήρες του κυλίνδρου καύσης [64][66].

Η ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου αποτελεί ένα διακριτό σύστημα, το οποίο αποτελείται από ξεχωριστούς μικροεπεξεργαστές για κάθε κύλινδρο, και δύο κεντρικούς επεξεργαστές. Οι κεντρικοί επεξεργαστές παρέχουν την απαιτούμενη διεπαφή μεταξύ του ηλεκτρονικού ρυθμιστή στροφών και του απομακρυσμένου συστήματος εποπτείας και ελέγχου της μηχανής. Αναφέρεται ότι χρειάζεται σαν σήμα εισόδου τη γωνία στροφάλου κάθε στιγμή, η οποία και δίνεται από δύο αισθητήρες προσαρμοσμένους στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου άξονα, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην καταγράφονται οι ακτινικές και διαμήκεις μικροταλαντώσεις του άξονα. Κάθε εγχυτήρας ελέγχεται από τη δική του ηλεκτρονική solenoid βαλβίδα, η οποία βρίσκεται στη μεριά του ελαίου ελέγχου. Το έλαιο ελέγχου και το καύσιμο διαχωρίζονται από ένα έμβολο το πιστόνι του οποίου συνδέεται ε ελατήριο στη μεριά του καυσίμου. Όταν το ηλεκτρονικό σήμα ενεργοποιήσει τη βαλβίδα ελέγχου, το λάδι ελέγχου εισέρχεται στο σύστημα, πιέζει το έμβολο, το

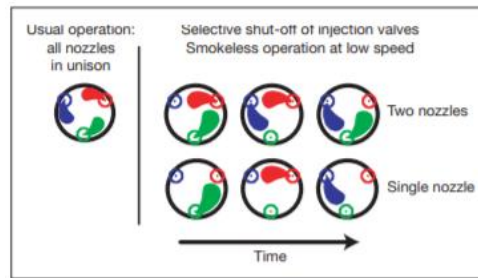
ελατήριο συρρικνώνεται και η θυρίδα για την εξαγωγή του καυσίμου από τον εγχυτήρα ανοίγει, οδηγώντας το στο ακροφύσιο. Συνεπώς, υπάρχει απόλυτος έλεγχος: της ποσότητας καυσίμου από το αισθητήρα στο στροφαλοφόρο, της ταχύτητας έγχυσης από την πίεση στον κοινό συλλέκτη, και του χρονισμού από τη solenoid valve.

Το σύστημα κοινού συλλέκτη παρουσιάζει πλεονεκτήματα και ως προς την ασφάλεια του συστήματος σε περίπτωση ατυχήματος και αστοχίας της κατασκευής. Οι αντλίες καυσίμου και ελαίου λειτουργίας υψηλής πίεσης, καθώς και οι σωλήνες του ελαίου ελέγχου, είναι διπλοί, ώστε, σε περίπτωση αστοχίας του ενός, ο άλλος να μπορεί να παραλάβει όλο το φορτίο και η μηχανή να συνεχίσει τη λειτουργία της. Σε αντίθεση με το σύστημα της μηχανικής έγχυσης, όπου κάθε κύλινδρος έχει ξεχωριστή έγχυση και η αστοχία ενός σωλήνα μεταφοράς καυσίμου οδηγεί σε αχρηστία όλο τον κύλινδρο και σε ανισορροπία τη στροφοκότητα του κινητήρα με αποτέλεσμα την αναγκαστική διακοπή λειτουργίας, στο σύστημα κοινού συλλέκτη οι σωλήνες υψηλής πίεσης οδηγούν το καύσιμο σε κοινή λεκάνη προ της έγχυσης σε κάθε κύλινδρο ξεχωριστά, οπότε οποιαδήποτε αστοχία τους δεν επηρεάζει δραματικά τη λειτουργία της μηχανής, αφού η έλλειψη της παροχής καυσίμου στη λεκάνη από τον ένα κύλινδρο μπορεί να αντικατασταθεί από τους υπόλοιπους. Ακόμα κι αν αστοχήσουν περισσότεροι σωλήνες ταυτόχρονα η λειτουργία είναι εφικτή, αλλά με μειωμένο φορτίο. Επιπλέον, ο ηλεκτρονικός έλεγχος των ακροφυσίων επιτρέπει τη μεμονωμένη διακοπή λειτουργίας του σε περίπτωση που το υδραυλικό του σύστημα δυσλειτουργεί. Τέλος, η μονάδα ελέγχου της έγχυσης ICU του κάθε κυλίνδρου αποκλείει υδραυλικά οποιαδήποτε ποσότητα καυσίμου ανώτερη της προκαθορισμένης. Η μέγιστη ποσότητα έγχυσης σε κάθε κύλινδρο ρυθμίζεται από τη διαδρομή του εμβόλου, το οποίο ελέγχεται ηλεκτρονικά. Το έμβολο διαθέτει αισθητήρα ώστε σε περίπτωση που η διαδρομή του, και συνεπώς η ποσότητα εγχέομενου καυσίμου, κρίνεται ακατάλληλη και διαφορετική της απαιτούμενης αμέσως η έγχυση στον κύλινδρο διακόπτεται και σταδιακά σταματάει η λειτουργία της μηχανής. Σε περίπτωση που το έμβολο τεθεί εκτός ελέγχου και εκτελέσει τη φυσική διαδρομή του, αυτόματα ανακόπτεται η επιστροφή του και σταματάει η έγχυση.

Εν ολίγοις, τα βασικά πλεονεκτήματα του συστήματος κοινού συλλέκτη είναι: η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου του όγκου εγχέομενου καυσίμου μέσω του ηλεκτρονικά ελεγχόμενου πιστονιού έγχυσης, ο πλήρης καθορισμός του χρονικού προφίλ έγχυσης καυσίμου και της πίεσης έγχυσης, η ανεξαρτησία της λειτουργίας των εγχυτήρων κάθε κυλίνδρου λόγω ύπαρξης διαφορετικού πιστονιού για κάθε έναν από αυτούς, η καταλληλότητα για λειτουργία με βαρύ καύσιμο μιας και η πίεση ελέγχεται και ρυθμίζεται μέσω του ελαίου λειτουργίας και όχι απευθείας με έλεγχο του καυσίμου, οι μειωμένες ταλαντωτικές συμπεριφορές λόγω της συνεχούς παροχής καυσίμου από πολύστροφη αντλία, της ύπαρξης συστήματος απόσβεσης κρουστικών κυμάτων πίεσης στον κοινό συλλέκτη και του ελέγχου για συντονισμένη και ταυτόχρονη λειτουργία των κυλίνδρων, η σταθερότητα λειτουργίας του συστήματος σε κάθε φορτίο μέσω του ακριβούς ελέγχου της πίεσης και του όγκου της εγχέομενης ποσότητας καυσίμου, που έχει και σαν αποτέλεσμα την απουσία καπνού σε χαμηλά φορτία, πρόβλημα που παρουσιάζεται σε μεγάλο βαθμό κατά τη μηχανική έγχυση και, τέλος, τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου σε χαμηλά φορτία λόγω της πλήρους καύσης του καυσίμου, μιας και αυτό έχει τη δυνατότητα να εγχυθεί στον κύλινδρο με την κατάλληλη πίεση.

Η ανεξαρτησία της λειτουργίας των εγχυτήρων έχει μεγάλη χρησιμότητα σε περιπτώσεις λειτουργίας με προφίλ έγχυσης πολλαπλών παλμών ή μεταβαλλόμενης παροχής εγχέομενου καυσίμου ανά το χρόνο. Προκύπτει έτσι η δυνατότητα δημιουργίας άπειρων και ποικιλόμορφων προφίλ έγχυσης ώστε ανάλογα το φορτίο και την επιθυμητή ειδική κατανάλωση καυσίμου να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά επίπεδα έκλυσης θερμότητας και ρύπων NO_x. Έτσι, κάθε έμβολο ελέγχου της έγχυσης δε χρειάζεται να εκτελεί μια περίπλοκη διαδρομή, που θα απαιτούσε σταματήματα, οπισθοδρομήσεις και μεταβολές στην ταχύτητά του, αλλά η ποσότητα καυσίμου του κάθε παλμού έγχυσης διαμερίζεται στους τρεις εγχυτήρες, που λειτουργούν κυκλικά. Επιπλέον αυτού, η ανεξαρτησία των εγχυτήρων σε συνδυασμό με τον έλεγχο της πίεσης της έγχυσης καθιστά δυνατή τη λειτουργία του κινητήρα σε πολύ χαμηλά φορτία, χαμηλότερα αυτών που επιτυγχάνονται με μηχανική έγχυση. Μπορούν να λειτουργήσουν, χωρίς την έκλυση μαύρου καπνού, ακόμα και σε φορτίο 10% του ονομαστικού, καθιστώντας ασφαλή τη λειτουργία του κινητήρα σε καταστάσεις μανουβραρίσματος ή διέλευσης από διώρυγες και ποτάμια. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω των υψηλών πιέσεων έγχυσης που μπορεί να πετύχει το σύστημα αυτό καθώς και λόγω του ότι μπορεί να απενεργοποιήσει έναν ή δύο εκ των τριών εγχυτήρων σε κάθε κύλινδρο. Έτσι ακόμα κι όταν σε εξαιρετικά χαμηλά φορτία ο όγκος του εγχέομενου καυσίμου είναι μικρός δε χρειάζεται να χωριστεί στους τρεις εγχυτήρες αλλά μόνο σε έναν ή δύο που βρίσκονται σε λειτουργία, ώστε να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά επίπεδα πίεσης και η έγχυση να είναι πιο αποδοτική. Η εναλλάξ και κυκλική λειτουργία των εγχυτήρων σε αυτή την περίπτωση αυξάνουν τα επίπεδα στροβιλότητας του μίγματος οδηγώντας σε μια πιο ολοκληρωμένη καύση, ενώ ταυτόχρονα δεν καταπονείται

θερμικά μόνο ένα μέρος του κυλίνδρου. Μάλιστα, με την απενεργοποίηση κάποιων εγχυτήρων, δεν είναι αναγκαστική η θέση εκτός λειτουργίας κυλίνδρων της μηχανής, κάτι που προκαλεί ανισορροπία στη λειτουργία της και ταλαντωτικές συμπεριφορές.



Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση εναλλασσόμενης χρήση εγχυτήρων σε χαμηλά φορτία [64].

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος κοινού συλλέκτη, όπως φαίνεται, είναι πολλά και πάνω σε αυτό, της δυνατότητας δημιουργίας διαφορετικών προφίλ έγχυσης, με στόχο τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων NO_x , βασίζεται και η παρούσα εργασία. Πειράματα της κατασκευάστριας εταιρείας με συνεχόμενα προφίλ έγχυσης έχουν δείξει ότι είναι εφικτή η μείωση των NO_x σε σύγκριση με ένα σύστημα μηχανικής έγχυσης, κρατώντας στα ίδια περίπου επίπεδα την ειδική κατανάλωση καυσίμου, ή ακόμα και μειώνοντάς την. Πειράματα σε κάθε φορτίο έχουν αποδώσει το κατάλληλο προφίλ για την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου, ενώ κατάλληλα προς εφαρμογή είναι αυτά που αποφέρουν επίπεδα εκπομπών NO_x σύμφωνα με τους κανονισμούς. Σε χαμηλά φορτία, που υπάρχει περιθώριο μέχρι το όριο των επιτρεπόμενων NO_x , τα προφίλ έγχυσης είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιούν την ειδική κατανάλωση, ενώ σε υψηλότερα φορτία, που οι εκπομπές είναι ποσοτικά μεγαλύτερες και πλησίον των ορίων των κανονισμών, τα προφίλ είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται μείωση των NO_x και συμφωνία τους με τους κανονισμούς, με πιθανότατη αύξηση της ειδικής κατανάλωσης. Τα προφίλ αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου. Το ερώτημα συνεπώς είναι κατά πόσο η κατανάλωση καυσίμου και τα NO_x μπορούν να μειωθούν περαιτέρω εκμεταλλευόμενοι τη δυνατότητα της διακοπτόμενης έγχυσης καυσίμου.

Αναφέρεται, τέλος, ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός, που περιγράφεται παραπάνω και βρίσκεται στην αγορά από το 2004, δεν είναι ο μοναδικός ηλεκτρονικός εγχυτήρας στην αγορά. Ωστόσο είναι αυτός που εξυπηρετεί και συζευγνύεται με μηχανές Sulzer RT-flex, όπως είναι και ο κινητήρας που επιλέγεται για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, και γι' αυτό περιγράφεται λεπτομερώς. Αντίστοιχος μηχανισμός ηλεκτρονικής έγχυσης και υψηλής πίεσης έχει αναπτυχθεί και από την MAN B&W, ώστε να εξυπηρετεί τις μηχανές της. Συγκεκριμένα, η MAN προσφέρει το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου PMI (Performance Measurement Indicator), για τον έλεγχο της μέγιστης πίεσης του κινητήρα σε κάθε φορτίο, παρέχοντας έναν αισθητήρα πίεσης σε κάθε κύλινδρο. Με αλγόριθμο, που ρυθμίζεται για κάθε μηχανή ξεχωριστά, υπολογίζονται αυτόματα παράμετροι φορτίου, ποσότητας και είδους καυσίμου, ώστε βρίσκεται η βέλτιστη στιγμή έναρξης της έγχυσης και ανοίγματος των βαλβίδων εξαγωγής. Για μηχανές με μηχανική αντλία εγκαθίσταται το πρόγραμμα VIT (Variable Injection Timing), ενώ για ηλεκτρονικές αντλίες καυσίμου εγκαθίσταται το πρόγραμμα Auto-tuning [34]. Η εναλλασσόμενη λειτουργία βαλβίδων εισαγωγής καυσίμου στον κύλινδρο είναι ξεχωριστό λογισμικό, που δεν είναι διαθέσιμο ακόμα για όλες τις μηχανές. (SEQ Sequential Fuel Injection)[15]. Αντίστοιχοι εγχυτήρες όπως, αυτοί της Bosch, εξυπηρετούν την αυτοκινητοβιομηχανία από το 1997.[129]

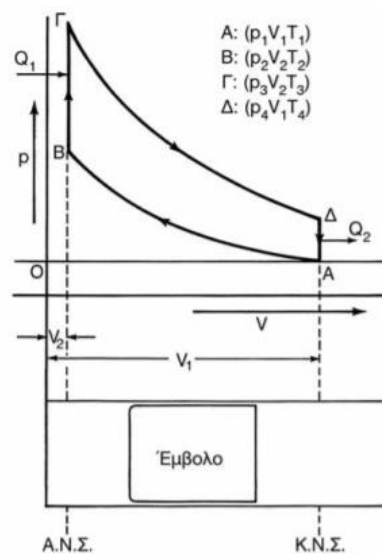
Ωστόσο, παρόλο που οι κυριότερες εταιρείες ναυτικών κινητήρων υποστηρίζουν την ηλεκτρονική έγχυση, ακόμα μικρό ποσοστό του παγκόσμιου στόλου είναι εξοπλισμένο με λογισμικό αυτομάτου ελέγχου, μιας και τα περισσότερα πλοία, καθώς και οι μηχανές τους, είναι παλιά. [72] Η πλειονότητα ωστόσο των πλοίων που χτίζονται σήμερα έχουν common rail με ηλεκτρονική έγχυση καυσίμου και ενεργοποίηση βαλβίδων εξαγωγής καυσαερίων, ελάχιστα όμως λειτουργούν με αυτόματα μεταβαλλόμενο χρονισμό βαλβίδων. Στις περισσότερες μηχανές η ρύθμιση των παραμέτρων της καύσης, ανάλογα το φορτίο, το καύσιμο κλπ, ώστε η πίεση στον κινητήρα να είναι αρκετά υψηλή, καύσιμο να μην καίγεται άσκοπα και η ειδική κατανάλωση να είναι χαμηλότερη, ρυθμίζονται από το πλήρωμα και όχι αυτόματα. Στην καλύτερη περίπτωση, οι κύλινδροι θα είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρα πίεσης και το πλήρωμα μπορεί να ακολουθήσει οδηγίες ρύθμισης παραμέτρων ανάλογα την πίεση στον κινητήρα. Ωστόσο το αποτέλεσμα εξαρτάται από τον ανθρώπινο παράγοντα, και πολύ συχνά αυτή η ρύθμιση μπορεί να παραληφθεί. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι μέθοδοι έγχυσης πολλαπλού παλμού δεν έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση και τον

έλεγχου της καύσης, παρά μόνο σε μηχανές διπλού καυσίμου, όπου μια προέγχυση εύφλεκτου καυσίμου είναι απαραίτητη για την έναυση λεπτότερων καυσίμων, όπως methanol etc.

2.3.4. Θερμοδυναμικός κύκλος κινητήρων

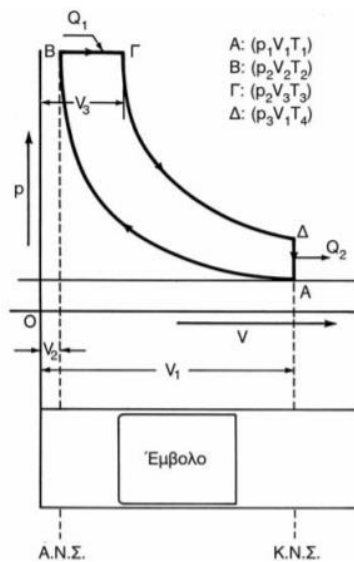
Προτού γίνει κουβέντα για την παραγωγή και μείωση των ρύπων και πώς αυτές επηρεάζονται από τη διακοπτόμενη έγχυση, είναι σημαντικό να αναλυθούν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του κινητήρα και επηρεάζουν την καύση και τα καυσαέρια.

Ο θερμοδυναμικός κύκλος των κινητήρων Diesel ομοιάζει κάπως με τους ιδανικούς πρότυπους κύκλους αέρα Otto και Diesel. Ο θερμοδυναμικός ιδανικός πρότυπος κύκλος Otto αποτελείται από μια ισεντροπική συμπίεση, από μια ισόογκη πρόσδοση θερμότητας, από μια ισεντροπική αποτόνωση του αέρα μέχρι τον αρχικό όγκο και μια ισόογκη αποβολή θερμότητας με τη συμπλήρωση του κύκλου. Ο βαθμός αποδόσεως του κύκλου, που δίνεται από τον τύπο: $n_0 = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$, όπου $\varepsilon = V_1/V_2$ είναι ο βαθμός συμπίεσεως, και $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \text{const}$, έχει σοβαρή εξάρτηση από το λόγο συμπίεσης, μικρή ομόσημη εξάρτηση από το γ , και παντελή ανεξαρτησία από την προσδιδόμενη θερμότητα της δεύτερης φάσης, και συνεπώς και από το φορτίο ($W = n_0 * Q$).



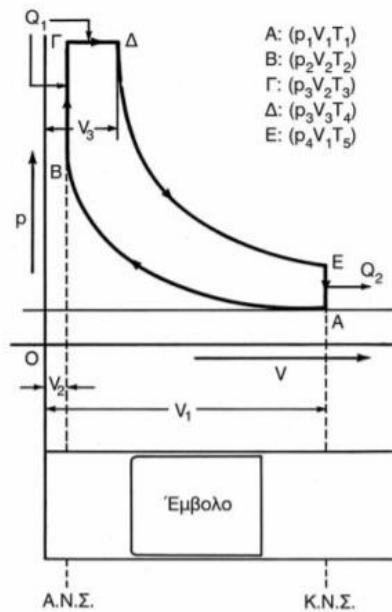
Εικόνα 23: Θερμοδυναμικός κύκλος Otto [65]

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Diesel, από την άλλη, αποτελείται από μια ισεντροπική συμπίεση του αέρα με βαθμό συμπίεσεως $\varepsilon = V_1/V_2$, μια πρόσδοση θερμότητας Q υπό σταθερή πίεση κατά το λόγο των όγκων $\alpha = V_3/V_2 =$ βαθμός αποκοπής ή διάρκεια καύσεως ή βαθμός εγχύσεως, μια ισεντροπική αποτόνωση μέχρι τον αρχικό όγκο και, τέλος, μια αποβολή θερμότητας υπό σταθερό όγκο για τη συμπλήρωση του κύκλου. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Diesel n_D δίνεται από τον τύπο: $n_D = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \left[\frac{\alpha^{\gamma}-1}{\gamma * (\alpha-1)} \right]$, έχει δηλαδή σοβαρή εξάρτηση, κατά ομόσημο τρόπο, από το βαθμό συμπίεσης, μικρή ομόσημη εξάρτηση από το γ και εξάρτηση κατά ετερόσημο τρόπο από το φορτίο, που εκφράζεται κατά ομόσημο τρόπο από το α . Σημειώνεται ότι το α αυξάνεται όσο αυξάνεται το φορτίο, η διάρκεια της έγχυσης και της καύσης υπό σταθερή πίεση, με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται η καθυστέρηση της έναρξης της καύσης τόσο μειώνεται ο βαθμός απόδοσης.



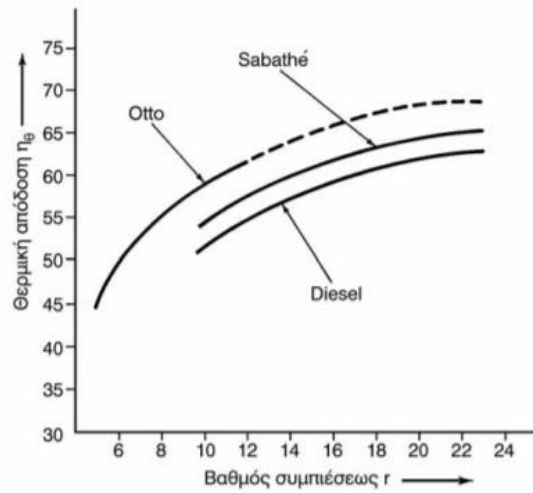
Εικόνα 24: Θερμοδυναμικός κύκλος Diesel

Τέλος, υπάρχει κι ο μικτός ιδανικός πρότυπος κύκλος αέρα, ή κύκλος Sabathe, στον οποίο και ουσιαστικά βασίζεται ο πραγματικός κύκλος των πετρελαιομηχανών. Είναι όμοιος με τους αντίστοιχους κύκλους Otto και Diesel, διαφέροντας μόνο κατά το ότι η πρόσδοση θερμότητας γίνεται κατά ένα τμήμα ισόογκα και κατά ένα τμήμα ισόθλιπτα. Η απόδοση του κύκλου αυτού δίνεται από τον τύπο: $n_s = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} * \frac{\rho * \alpha^{\gamma-1}}{(\rho-1) + \rho\gamma * (\alpha-1)}$, όπου $\rho = p_3/p_2$ είναι ο λόγος εκρήξεως και παριστάνει τη σχέση πιέσεων στο τέλος και στην αρχή της υπό σταθερό όγκο χορηγίας θερμότητας. Φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός συμπίεσης ϵ και ο βαθμός εκρήξεως ρ , και όσο μικρότερος είναι ο βαθμός εγχύσεως α , τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός απόδοσης. Μια δηλαδή απότομη εκρηκτική καύση σε μικρό χρόνο με υψηλές πιέσεις ευνοεί τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης, αρκεί βέβαια να μην παρουσιάζονται κρουστικά φαινόμενα που προκαλούν θόρυβο και φθορές και η κατασκευή να έχει την απαραίτητη αντοχή.



Εικόνα 25: Μικτός θερμοδυναμικός κύκλος Sabathe.

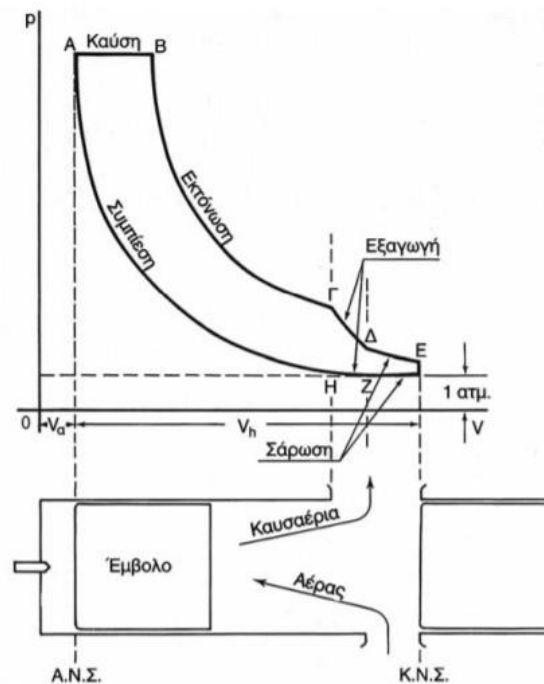
Η απόδοση του μικτού κύκλου κυμαίνεται μεταξύ ακραίων τιμών που ομοιάζουν των κύκλων Diesel και Otto. Για τον ίδιο βαθμό συμπίεσης ϵ ο θεωρητικός κύκλος Otto έχει πάντα καλύτερο βαθμό απόδοσης από τον κύκλο Diesel:



Εικόνα 26: Συγκριτική απόδοση θερμοδυναμικών κύκλων.

Στην πράξη σαφώς δεν υφίστανται οι παραπάνω ιδανικοί πρότυποι κύκλοι με πρώτη παρατήρηση ότι ο κύκλος του κινητήρα δεν είναι κλειστός, όπως οι παραπάνω πρότυποι. Οι εμβολοφόρες μηχανές εκτελούν μηχανικούς κύκλους και όχι θερμοδυναμικούς, αποτελώντας μη κυκλικές, ανοιχτού κυκλώματος και μόνιμης ροής μηχανές. Για διευκόλυνση στη μελέτη τους ωστόσο, ο μηχανικός κύκλος τους ανάγεται και προσομοιάζεται σε έναν αντίστοιχο κλειστό θερμοδυναμικός ισοδύναμο ιδανικό πρότυπο κύκλο λειτουργίας κινητήρα. Όσο περισσότερο εγκαταλείπονται οι παραδοχές για αυτόν τον ισοδύναμο κύκλο και η μελέτη γίνεται με βάση πειραματικά δεδομένα που λαμβάνονται από τη λειτουργία του εκάστοτε κινητήρα, τόσο τα αποτελέσματα της μελέτης είναι ακριβέστερα και ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα, η ανάλυση όμως γίνεται κοπιωδέστερη λόγω των πειραματικών δεδομένων και της μη καθολικής ισχύος των γενικών θεωρητικών τύπων των θεωρητικών κύκλων.

Σε γενικές γραμμές οι πραγματικοί κύκλοι των κινητήρων αντιστοιχίζονται στο μικτό θεωρητικό κύκλο. Ωστόσο σημειώνεται ότι στους κινητήρες Otto και στους ταχύστροφους κινητήρες Diesel το μεγαλύτερο μέρος της καύσης γίνεται ισόογκα, επομένως ο κύκλος προσεγγίζεται καλύτερα από τον ιδανικό κύκλο Otto, ενώ στους μεσόστροφους και βραδύστροφους κινητήρες Diesel το μεγαλύτερο μέρος της καύσης εκτελείται ισόθλιπτα, και ο κύκλος τους προσεγγίζεται καλύτερα από το θεωρητικό κύκλο Diesel. Παρακάτω φαίνεται το εξιδανικευμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα ενός 2-X κινητήρα Diesel:



Εικόνα 27: Θερμοδυναμικός κύκλος Otto σε κινητήρα.

Η αναγωγή του πραγματικού κύκλου στον αντίστοιχο θεωρητικό βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Υπάρχει πάντοτε περίσσεια αέρα και η καύση είναι τέλεια.
- Το εργαζόμενο σώμα έχει ενιαία σύνθεση και ποσότητα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου.
- Το εργαζόμενο σώμα είναι αέρας με σταθερές ειδικές θερμοχωρητικότητες και εκθέτη ισεντροπικής μεταβολής. Για την προσαρμογή στην παραδοχή αυτή τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται για μέση θερμοκρασία του κυλίνδρου.
- Η συμπίεση και η αποτόνωση είναι ισεντροπικές (αδιαβατικές και αναστρέψιμες) μεταβολές.
- Ιδανική εναλλαγή των αερίων, χωρίς ανωμαλίες και απώλειες πίεσης, κάτι που προϋποθέτει ακαριαίο άνοιγμα βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής.
- Δεν υπάρχουν μηχανικές απώλειες τριβών.
- Κατά το τέλος της εξαγωγής ο επιζήμιος όγκος είναι γεμάτος με αέρα, σε αντίθεση με την πραγματικότητα, που υπάρχει και κατάλοιπο καυσαέριο.
- Κατά το τέλος της εισαγωγής ο κύλινδρος είναι πλήρης με αέρα καταστάσεως περιβάλλοντος.

Παρατηρείται ότι στο σημείο Γ, οπότε και ανοίγει η θυρίδα εξαγωγής των αερίων, η πίεση πέφτει απότομα, μέχρις ότου ανοίξει η θυρίδα σάρωσης, που εμφυσεί αέρα σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Όταν κατά την άνοδο του εμβόλου η θυρίδα εισαγωγής κλείνει, η πίεση στον κύλινδρο, μέχρι να κλείσει και η θυρίδα εξαγωγής, είναι στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής. Λόγω του ανοίγματος της θυρίδας εξαγωγής αλλά και του σταθερού μήκους διαδρομής του εμβόλου ως το ΚΝΣ, η αποτόνωση ΒΓ είναι ατελής, διακόπτεται στον όγκο V_{Γ} και δεν υπάρχει δυνατότητα απολαβής περισσώτερου έργου από μια παρατεταμένη αποτόνωση μέχρι την πίεση του περιβάλλοντος. Πρακτικά μια πλήρης αποτόνωση είναι αφενός αδύνατη, αλλά και μη επωφελής. Μια μηχανή που θα επέτρεπε την πλήρη αποτόνωση θα έπρεπε να έχει σχεδόν τον τριπλάσιο όγκο κυλίνδρου και απαράδεκτη κατασκευαστική περιπλοκή, ενώ ταυτόχρονα θα είχε πολύ μικρή συγκέντρωση ισχύος, λόγω του πολύ μικρού όγκου αναρρόφησης και μεγάλου όγκου διαδρομής. Επιπλέον θα είχε αυξημένες απώλειες τριβών, με αποτέλεσμα η τελική ωφέλεια από την αποτόνωση να είναι μικρή. Σε κάποιες περιπτώσεις η επιπλέον αποτόνωση μπορεί να επιτευχθεί σε αεριοστρόβιλο, ο οποίος δέχεται τα καυσαέρια πίεσης ψηλότερης της ατμοσφαιρικής και τα αποτονώνει ως την ατμοσφαιρική, παράγοντας έργο που χρησιμοποιείται για την υπερπλήρωση του κινητήρα. Σε γενικές γραμμές η καθυστέρηση του ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής οδηγεί σε αυξημένο έργο, μειώνει όμως το χρόνο εναλλαγής των αερίων, με αποτέλεσμα να απαιτείται καλύτερη σάρωση του κυλίνδρου, έργο που καταναλώνεται από το ωφέλιμο του κινητήρα.

Αύξηση του έργου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μπορεί να επιτευχθεί και με αύξηση του λόγου συμπίεσης, και δεδομένου ότι η αρχική πίεση είναι η ατμοσφαιρική, αυτό αντιστοιχεί σε αυξημένες τιμές πίεσης πριν και κατά την καύση. Αυξημένη πίεση σημαίνει και αυξημένες τιμές θερμοκρασίας, επομένως η θερμότητα προσδίδεται με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Στις εμβολοφόρες ΜΕΚ ωστόσο, ενώ δεν υπάρχουν ιδιαίτεροι περιορισμοί ως προς την αυξημένη θερμοκρασία, εντούτοις υπάρχουν περιορισμοί λόγω αντοχής των υλικών και συνεπώς περιορισμοί στη μέγιστη πίεση και το βαθμό συμπίεσεως. Εξάλλου αυξημένες πιέσεις προκαλούν και αυξημένες τριβές καθώς και αυξημένες απώλειες ψύξεως, που μειώνουν το όφελος της ψηλής συμπίεσης. Μάλιστα ο ρυθμός αυξήσεως του βαθμού αποδόσεως με το βαθμό συμπίεσεως ε μειώνεται καθώς αυξάνεται το ϵ , συνεπώς μια υπερβολική προσπάθεια για την αύξηση της μέγιστης πίεσης δεν έχει νόημα.

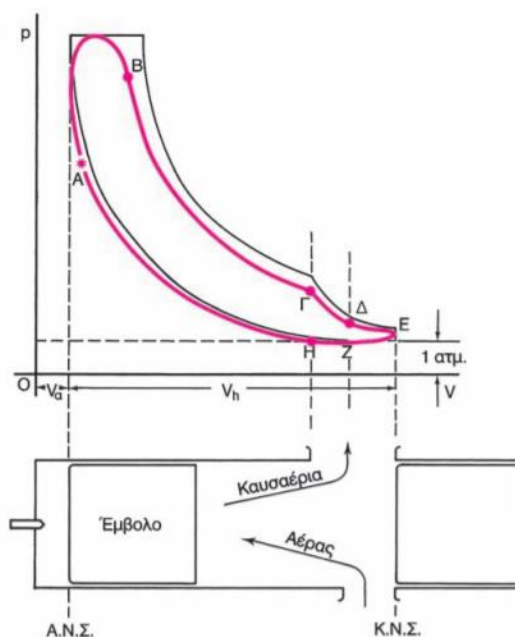
Ο βαθμός απόδοσης του ιδανικού κινητήρα Diesel, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, μειώνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο και ο βαθμός εγχύσεως a , και είναι πάντα μικρότερος αυτού του ιδανικού κινητήρα Otto. Στον πραγματικό κινητήρα Diesel ωστόσο, συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το φορτίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον πραγματικό κινητήρα λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές απώλειες, οι οποίες μειώνονται ποσοστιαίως σε σοβαρό βαθμό με την αύξηση του φορτίου. Έτσι, δεδομένου ότι οι κινητήρες Diesel επιτυγχάνουν μεγάλους βαθμούς συμπίεσεως και ότι ο πραγματικός τους κύκλος περιλαμβάνει ένα μικρό κομμάτι ισόογκης καύσης, έναντι του μικρού κομματιού ισόθλιπτης καύσης στους πραγματικούς κινητήρες Otto, οι πραγματικοί κινητήρες Diesel, που βασίζονται στον θεωρητικό κύκλο Diesel, τελικά έχουν σαφώς μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τους κινητήρες Otto, που βασίζονται στο θεωρητικό κύκλο Otto.

Τελικά αύξηση της απόδοσης σε έναν κινητήρα Diesel επιτυγχάνεται όταν ο κύκλος του προσεγγίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο από μικτό κύκλο με μεγάλο κομμάτι ισόογκης καύσης, που τείνει σε κύκλο Otto, εφόσον αυτό επιτρέπεται από την αντοχή της κατασκευής έναντι των κρουστικών φαινομένων.

Στην περίπτωση που δε θεωρήσουμε ότι για τον ισοδύναμο θεωρητικό κύκλο το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας, αλλά είναι το πραγματικό εργαζόμενο μέσο ως προς τη σύνθεση και την ποσότητά του, δηλαδή αέρας πριν την καύση, μίγμα καυσίμου αέρα κατά την καύση και καυσαερίων μετά την καύση, με μεταβλητές ειδικές θερμοχωρητικότητες, τότε προκύπτει ο ισοδύναμος πρότυπος κύκλος καυσίμου αέρα του κινητήρα. Ο κύκλος αυτός προσαρμόζει καλύτερα στην πραγματικότητα, παρότι διατηρεί κάποιες παραδοχές των θεωρητικών

κύκλων. Η καύση πάλι θεωρείται αδιαβατική υπό σταθερή πίεση ή όγκο και τέλεια, λαμβάνεται δηλαδή πλήρης χημική ισορροπία των συστατικών. Η εναλλαγή των αερίων είναι επίσης ιδανική εκτός των περιπτώσεων που γίνεται προσπάθεια καλύτερης προσέγγισης της πραγματικότητας, οπότε λαμβάνεται υπόψη κατά το πέρας της εναλλαγής των αερίων και μια ποσότητα κατάλοιπου καυσαερίου στον κύλινδρο της τάξης του 0.07, που μειώνει το βαθμό απόδοσης του κύκλου. Γενικά όσο αυξάνεται η περίσσεια αέρα και η καύση εκτελείται με περισσότερο αέρα από τη στοιχειομετρική, τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης, ωστόσο και πάλι παραμένει μικρότερος από αυτόν του αντίστοιχου ιδανικού πρότυπου κύκλου.

Ο πραγματικός κύκλος του κινητήρα προσεγγίζεται μόνο με συνεχείς μετρήσεις της πίεσης στον κύλινδρο σε κάθε θέση του εμβόλου. Ακόμα και τότε όμως ο ακριβής προσδιορισμός του κύκλου δεν είναι ευχερές καθώς απαιτείται και η μέτρηση της θερμοκρασίας ή της πυκνότητας του αερίου, κάτι που δεν είναι εφικτό, μιας και η κατανομή τους στον όγκο του μέσου δεν είναι ομοιόμορφη. Από το δυναμοδεικτικό διάγραμμα ωστόσο προκύπτει το αποδιδόμενο έργο του κινητήρα ως το εμβαδό της κλειστής καμπύλης στο διάγραμμα p-V.

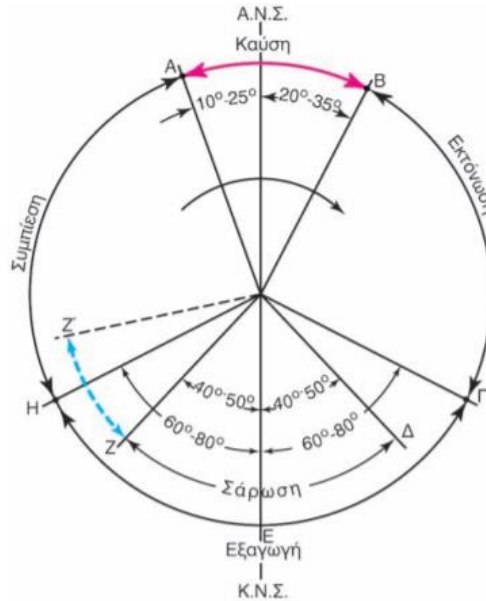


Εικόνα 28: Πραγματικός κύκλος Diesel σε κινητήρα.

Η διαδρομή AB αντιστοιχεί στην καύση, η ΒΓ στην εκτόνωση των καυσαερίων, η ΓΗ στην εξαγωγή τους, η ΔΕ στην εισαγωγή φρέσκου αέρα και την απόπλυση και η ΗΑ στη συμπίεση του νέου αέρα. Το σημείο Γ ορίζει το άνοιγμα της θυρίδας εξαγωγής, οπότε τα καυσαέρια εξέρχονται από τον κύλινδρο λόγω της υψηλής τους πίεσης σε σχέση με την ατμοσφαιρική μέχρι να αποκτήσουν πίεση ίση με αυτή της σαρώσεως, οπότε και ανοίγει η θυρίδα εισαγωγής στο σημείο Δ. Αν τα καυσαέρια δεν έχουν πίεση ίση ή μικρότερη της πίεσης σαρώσεως όταν ανοίξει η θυρίδα εισαγωγής, δε θα είναι επιτυχής η απόπλυση, αφού τα καυσαέρια θα ωθηθούν και προς τον οχετό σαρώσεως. Η σάρωση μέχρι το σημείο Z εκτελείται υπό μια σταθερή πίεση σαρώσεως, στην πραγματικότητα όμως στον κύλινδρο, λόγω απωλειών ροής, η πίεση είναι κάπου μεταξύ της πίεσης σαρώσεως και της ατμοσφαιρικής. Από το κλείσιμο της θυρίδας εισαγωγής Z μέχρι το σημείο του κλεισίματος της θυρίδας εξαγωγής H, το έμβολο ανέρχεται εκτοπίζοντας νεοεισαχθέντα αέρα προς τον οχετό εξαγωγής. Για να αποφευχθεί αυτή η απώλεια είτε ρυθμίζεται κατάλληλα ο χρονισμός των βαλβίδων εξαγωγής (αν υφίσταται τέτοιο σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου), είτε τίθενται πρόσθετες βαλβίδες ή σύρτες μετά τη θυρίδα εξαγωγής, που κλείνουν μόλις κλείσει η βαλβίδα εισαγωγής, οπότε το σημείο H μετατίθεται νορτίτερα. Το σημείο Z ορίζει το τέλος της απόπλυσης και είναι δυνατόν επίσης με κατάλληλα συστήματα, για να αποφευχθεί η απώλεια αέρα, αυτό να έπεται του σημείου κλεισίματος της θυρίδας εξαγωγής H ώστε η πλήρωση του κυλίνδρου να γίνεται τελειότερη και η αρχική πίεση συμπίεσης να είναι έως και 0.3~0.4 μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, όση είναι δηλαδή και η πίεση υπερπληρώσεως.

Αναφέρεται ότι κατά την περίοδο της αναρροφήσεως, της εισχώρησης δηλαδή του αέρα, υπάρχει συνεχής θέρμανση του αέρα, λόγω επαφής του με τα θερμά τοιχώματα του κυλίνδρου και λόγω της αναμειξέως του με το κατάλοιπο καυσαέριο. Έτσι η θερμοκρασία T_0 είναι λίγο μεγαλύτερη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ή του υπερπληρωτή συνήθως κατά 30~60° C. Η θερμοκρασιακή αυτή αύξηση κατά την αρχή της συμπίεσεως,

ενώ δεν έχει ουσιαστική σημασία στο βαθμό αποδόσεως, έχει σοβαρή επίδραση στην ισχύ του κινητήρα και στην ποιότητα της καύσης, διότι συνεπάγεται μεταβολή της μάζας του εισερχόμενου αέρα.



Εικόνα 29: Χρονισμοί ανταλλαγής αέριων μαζών.

Η φάση της συμπίεσης αρχίζει όταν κλείνει η θυρίδα εξαγωγής και δεν είναι ισεντροπική, όπως στο θεωρητικό κύκλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει απόλυτη στεγανότητα μεταξύ κυλίνδρου και ελατηρίων του εμβόλου, οπότε υπάρχει μικρή διαρροή του εργαζόμενου μέσου προς το στροφαλοθάλαμο, και στη συναλλαγή θερμότητας του εργαζόμενου μέσου με τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Κατά την αρχή της συμπίεσης υπάρχει πρόσδοση θερμότητας από τα τοιχώματα στον αέρα, ενώ προς το τέλος αφαίρεση θερμότητας, μιας και τα τοιχώματα του κυλίνδρου βρίσκονται σε μια περίπου σταθερή θερμοκρασία περί τους 250°C . Εν τέλει η πορεία μπορεί να μην είναι ισεντροπική, το συνολικό όμως έργο δε διαφέρει πολύ από αυτό της ισεντροπικής μεταβολής, καθώς η συναλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα αρχικά υποβοηθάει τη συμπίεση ενώ μετά τη δυσχεραίνει. Η τελική τιμή της πίεσης μετά τη συμπίεση είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή της ισεντροπικής μεταβολής. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής τόσο η διαφορά της πραγματικής και ισεντροπικής πίεσης μειώνεται, μιας και μειώνεται ο χρόνος των απωλειών στεγανότητας και εναλλαγής θερμότητας, ενώ η διαφορά αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται ο βαθμός συμπίεσεως, καθώς τότε γίνονται εντονότερες οι απώλειες θερμότητας προς τα τοιχώματα. Η τελική θερμοκρασία συμπίεσεως στους κινητήρες Diesel επιλέγεται έτσι ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία για την ασφαλή έναυση του καυσίμου. Σε βραδύστροφους 2-Χ κινητήρες η τιμή της κυμαίνεται στα $30-35\text{ bar}$, ενώ σε υπερπληρούμενους κινητήρες παίρνει τιμές και ως $70-120\text{ bar}$. Η θερμοκρασία συμπίεσης για να είναι επιτυχής η έναυση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 550°C . Η ασφαλής έναυση ωστόσο εξαρτάται και από την ποιότητα αναφλέξεως του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, η οποία είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι θερμοκρασία αυταναφλέξεώς του και όσο μικρότερος ο αριθμός κετανίου.

Η φάση της εκτόνωσης των καυσαερίων δεν είναι επίσης απόλυτα ισεντροπική διαδικασία, μιας και υπάρχει απώλεια θερμότητας προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου, ενώ ταυτόχρονα μικρό ποσό του καυσίμου συνεχίζει να καίγεται μέχρι και το άνοιγμα των θυρίδων εξαγωγής. Η σύνθεση του καυσαερίου μεταβάλλεται συνεχώς σύμφωνα με τις εξισώσεις της χημικής κινητικής και της χημικής ισορροπίας και ο προσδιορισμός της ακριβούς μεταβολής είναι δύσκολος.

Φαίνεται λοιπόν ότι για την επίτευξη ενός καλού βαθμού απόδοσης και κατ' επέκταση μιας χαμηλής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, πρέπει να βελτιστοποιείται ο αρχικός θεωρητικός ιδανικός πρότυπος κύκλος στον οποίο θα βασιστεί ο κύκλος του κινητήρα, να αυξηθεί κατά το δυνατό η αναστρεψιμότητα του πραγματικού κύκλου και η ομοιότητά του με τον θεωρητικό ισοδύναμο και τέλος, να μειωθούν κατά το δυνατόν οι μηχανικές απώλειες.

Στις μηχανικές απώλειες περιλαμβάνονται οι απώλειες ενέργειας στον κύλινδρο αλλά και σε όλα τα βοηθητικά μηχανήματα που λαμβάνουν ενέργεια από τη μηχανή και είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του και οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών μεταξύ κυλίνδρου και εμβόλου, που είναι και το μεγαλύτερο μέρος των μηχανικών απωλειών. Η απώλεια ενέργειας των βοηθητικών μηχανημάτων περιλαμβάνουν την ενέργεια για την κίνηση της αντλίας αποπλύσεως και του υπερπληρωτή, όπως επίσης και την ενέργεια για την αντλία

καυσίμου, ελαίου λιπάνσεως, ύδατος ψύξεως κ.λπ. Κανένας από τους παραπάνω παράγοντες δεν πρέπει να βελτιστοποιείται σε βάρος των άλλων, προκειμένου να προκύψει ένας καλός βαθμός απόδοσης.

Για τη βελτιστοποίηση του αρχικού θεωρητικού κύκλου και της αναστρεψιμότητας του αντίστοιχου θεωρητικού, σημαντικό ρόλο παίζουν η τελειότητα της καύσης και η θερμοκρασία των απαγόμενων καυσαερίων. Συνθήκες ατελούς καύσης εμφανίζονται όταν τα μόρια του καυσίμου εξέρχονται από το θάλαμο καύσης χωρίς να έχουν οξειδωθεί πλήρως και μην έχοντας αποδώσει όλη τη θερμογόνο δύναμή τους, η οποία παραμένει αναξιοποίητη. Τα κυριότερα αίτια εμφάνισης ατελούς καύσης είναι η απουσία επαρκούς περισσειας αέρα και η ανεπαρκής ανάμειξη αέρα και καυσίμου. Επίσης, ατελής είναι η καύση όταν ο χρόνος παραμονής του καυσίμου στο θάλαμο δεν είναι επαρκής. Ένδειξη ατελούς καύσης είναι η παραγωγή CO και για την αποφυγή της απαιτείται επάρκεια αέρα, καλή ανάμειξη του μείγματος αέρα-καυσίμου, αύξηση του χρόνου παραμονής του μείγματος στο θάλαμο καύσης, διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών καύσης, κ.α.

Οι μεγαλύτερες απώλειες οφείλονται συνήθως στην υψηλή θερμοκρασία των απαγόμενων καυσαερίων, που γίνονται ακόμα πιο έντονες με την παραμόρφωση του ιδανικού κύκλου λόγω αναγκαιότητας πτώσης πίεσης και εναλλαγής των αερίων (σημείο Γ). Οι απώλειες θερμών καυσαερίων απαρτίζονται από την αισθητή θερμότητα των ξηρών καυσαερίων και την αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών στα καυσαέρια. Οι απώλειες των ξηρών καυσαερίων εξαρτώνται άμεσα από την ποσότητα περισσειας αέρα, δεδομένου ότι η επιπλέον ποσότητα αέρα που δε λαμβάνει μέρος στις χημικές αντιδράσεις εγκαταλείπει το θάλαμο με υψηλή θερμοκρασία. Η θερμότητα που απαιτείται για τη θέρμανση του αέρα περιβάλλοντος μέχρι τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων αντιστοιχεί στις απώλειες θερμότητας των ξηρών καυσαερίων. Τα καυσαέρια περιέχουν επίσης ποσότητες νερού υπό τη μορφή υπέρθερμου υδρατμού, θερμοκρασίας ίσης με τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Το νερό προέρχεται από την οξείδωση του υδρογόνου που περιέχεται στο καύσιμο, καθώς και από την περιεχόμενη υγρασία τόσο στο καύσιμο όσο και στον αέρα καύσης. Ο υδρατμός που περιέχεται στα καυσαέρια απορροφά ποσό θερμότητας το οποίο αντιστοιχεί στο άθροισμα της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης του νερού συν την αισθητή θερμότητα υπερθέρμανσης ως τη θερμοκρασία εξαγωγής. Επίσης, η υγρασία του καυσίμου απορροφά και ένα έξτρα ποσό θερμότητας για την θέρμανσή του από τη θερμοκρασία εισόδου του καυσίμου μέχρι την ατμοποίηση του νερού. Οι απώλειες αυτές θερμότητας μπορούν να ανακτηθούν εν μέρει με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας στην έξοδο των καυσαερίων, και να χρησιμοποιηθούν για την προθέρμανση του αέρα καύσης ή του καυσίμου.

Παρακάτω φαίνεται η συσχέτιση του βαθμού αποδόσεως η_e με την ειδική κατανάλωση καυσίμου b_e και τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου Θ_u :

$$b_e = \frac{\dot{m}_B}{P_e} = \frac{\dot{m}_B}{n_e * \dot{m}_B * \Theta_u} = \frac{1}{n_e * \Theta_u}$$

2.4. Καύση στους κινητήρες Diesel

Από τους παραπάνω τρόπους βελτιστοποίησης της απόδοσης του κύκλου, η διακοπτόμενη έγχυση στοχεύει κυρίως σε αυτόν της βελτιστοποίησης της καύσης και προσέγγισης της αδιαβατικής φλόγας, χωρίς εκτεταμένες πιέσεις. Η καύση στον κινητήρα είναι ένα πολύ περίπλοκο φαινόμενο και η μεταβολή της πίεσεως κατά τη διάρκεια της εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ένταση των κινήσεων του αέρα και ο στροβιλισμός στο θάλαμο καύσης, τη χημική κινητική των αντιδράσεων της καύσης, τη χρονική στιγμή εγχύσεως σε συνδυασμό με το νόμο εγχύσεως, τις ιδιότητες του καυσίμου κ.λπ.

Στους κινητήρες Diesel η καύση γίνεται με φλόγα διαχύσεως και διαρκεί περίπου $40^\circ \sim 60^\circ$. Συνήθως η μέγιστη τιμή της πίεσεως πρέπει να εμφανίζεται λίγες μοίρες μετά το ANΣ ($10^\circ \sim 20^\circ$), ώστε κατά την επακολουθούσα αποτόνωση να ασκείται η μέγιστη δυνατή δύναμη στο έμβολο. Η έναρξη της καύσης ρυθμίζεται καταλλήλως σε θέση λίγο προ του ANΣ ($20^\circ \sim 30^\circ$), ώστε το αρνητικό έργο της συμπίεσεως, λόγω της ανύψωσης του εμβόλου και της αύξησης της πίεσης λόγω καύσης, να είναι μικρό. Όπως φαίνεται και από τους θερμοδυναμικούς κύκλους, η ιδανική καύση θα ήταν μία που εκτελείται αυστηρώς ισόχωρα (κύκλος Otto) και μάλιστα ακαριαία στο ANΣ. Αυτό ωστόσο δεν είναι δυνατόν, καθώς σημαίνει απότομη αύξηση της μεταβολής της πίεσεως, που προκαλεί κρουστικά φαινόμενα και καταπονεί τα εξαρτήματα της μηχανής.

Κατά την καύση υπάρχει πολύ έντονη συναλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα του κυλίνδρου, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των αερίων και της αυξημένης τιμής του συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας, που οφείλεται στην ύπαρξη της φλόγας και στην έντονη κινητική κατάσταση των αερίων. Ένα ποσοστό $15\% \sim 20\%$ της θερμότητας που παράγεται από το καύσιμο χάνεται άμεσα λόγω της ψύξης του κυλίνδρου, ενώ ένα ποσοστό 5% απάγεται εμμέσως λόγω της ψύξης του ελαίου λίπανσης, λόγω ανύψωσης της θερμοκρασίας

λόγω τριβών κ.λπ., με αποτέλεσμα τη μείωση των θερμοκρασιών του αερίου και κατ' επέκταση του έργου και του βαθμού αποδόσεως.

2.4.1. Φάσεις της καύσεως

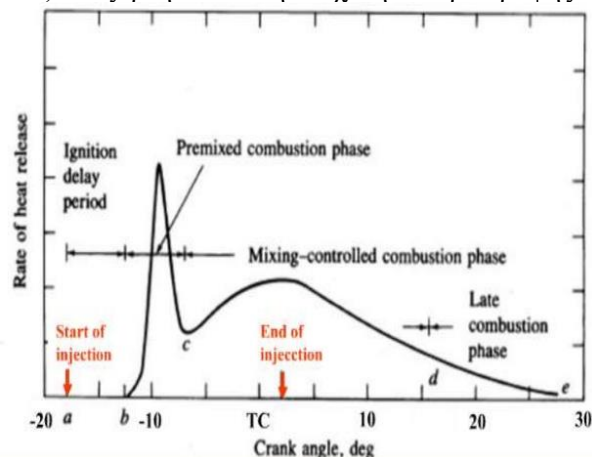
Στην καύση των κινητήρων Diesel, όπως αυτή εμφανίζεται σύμφωνα με ένα συνεχές και σύνηθες προφίλ έγχυσης, από τη στιγμή που αρχίζει να εγχέεται το καύσιμο, διακρίνονται κυρίως 3 φάσεις: η φάση της καθυστέρησης αναφλέξεως, η φάση της ανεξέλεγκτης καύσης και η φάση της ελεγχόμενης καύσης.

Κατά το στάδιο της καθυστέρησης δεν είναι εμφανής η απόκλιση της γραμμής πίεσεως από τη γραμμή συμπίεσεως χωρίς καύση. Η καθυστέρηση αυτή της αναφλέξεως οφείλεται στον απαραίτητο χρόνο που πρέπει να παρέλθει για τη φυσική (στεγανοποίηση, εξάτμιση, ανάμειξη) και χημική (διάσπαση των υδρογονανθράκων σε άλλους δραστικότερους) προετοιμασία του καυσίμου, μέχρι να γίνει η ανάφλεξη. Η διάρκεια του σταδίου αυτού είναι περίπου 1~4 ms και είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα περιστροφής. Εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του καυσίμου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και από τις τιμές της θερμοκρασίας και πίεσης στον κύλινδρο, δηλαδή από το χρονισμό της έγχυσης.

Στο στάδιο της ανεξέλεγκτης καύσης συμβαίνει μια πολύ απότομη αύξηση της πίεσης, που προκαλείται από την απότομη ανεξέλεγκτη καύση όλου του ήδη προετοιμασθέντος, στο προηγούμενο στάδιο, καυσίμου με ένα μηχανισμό διαδόσεως φλόγας προανάμειξης. Εάν η διάρκεια του σταδίου της καθυστέρησης είναι μεγάλη, τότε, λόγω της μεγάλης ποσότητας του προετοιμασμένου καυσίμου, η ανύψωση της πίεσης μπορεί να φτάσει σε απαγορευτικές τιμές και σε κρουστική καύση. Γι' αυτό μεγάλη καθυστέρηση ανάφλεξης δεν είναι επιθυμητή και μπορεί να ελαττωθεί είτε με καλύτερευση των συνθηκών καύσεως (υψηλή πίεση και θερμοκρασία, έντονος στροβιλισμός κ.λπ.) είτε με χρήση καυσίμου με χαμηλή θερμοκρασία αυταναφλέξεως (υψηλό αριθμό κετανίου).

Κατά το στάδιο της ελεγχόμενης καύσης, τα επίπεδα πίεσης, θερμοκρασίας και τύρβης είναι υψηλά, οπότε το εγχεόμενο καύσιμο βρίσκει ιδανικές συνθήκες ώστε καίγεται πρακτικά χωρίς καθυστέρηση, σύμφωνα με τον εξωτερικώς ελεγχόμενο ρυθμό εγχύσεως. Η καύση στο στάδιο αυτό είναι τυρβώδους διαχύσεως και συνεχίζεται εφόσον η ποσότητα του αέρα για ανάμειξη επαρκεί. Το στάδιο αυτό καταλήγει σε μια φάση επίκαισης, που τελειώνει με το άνοιγμα των θυρίδων εξαγωγής των καυσαερίων. Η επίκαιση ωστόσο δεν είναι επιθυμητή, καθώς αυξάνει τη θερμοκρασία στη βαλβίδα εξαγωγής των καυσαερίων και στην άνω όψη της κεφαλής του εμβόλου (θερμική καταπόνηση εξαρτημάτων).

Λόγω της σχετικά μεγάλης χρονικής διάρκειας της πρώτης φάσης και της ανεξαρτησίας του από την ταχύτητα περιστροφής, με συνέπεια την 'αύξηση' της διάρκειας της καθυστέρησης μετρημένη σε γωνία στροφάλου σε μεγάλες ταχύτητες και φορτία, υπάρχει όριο στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (μέχρι ~5000 RPM) λόγω συνθηκών της καύσεως, παρότι τα επόμενα στάδια έχουν περίπου σταθερή διάρκεια (μετρημένη σε γωνία στροφάλου) ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 30: Φάσεις της καύσης σε κινητήρα Diesel.

2.4.2. Ρευστομηχανική της καύσης

Τα περισσότερα ναυτικά καύσιμα βρίσκονται σε υγρή μορφή με το καθένα να έχει διαφορετικό ιξώδες και πυκνότητα ανάλογα τη φύση του και τη θερμοκρασία εισαγωγής του στο θάλαμο καύσης. Η θερμοκρασία ατμοποίησης ή αεριοποίησης των συνήθων υγρών καυσίμων είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας αυτανάφλεξής τους. Συνεπώς η εισαγωγή του υγρού καυσίμου στο θάλαμο καύσης, περιβάλλον με υψηλή

θερμοκρασία, προκαλεί την ατμοποίησή του παράγοντας ένα αναφλέξιμο μίγμα καυσίμου-αέρα. Η ατμοποίηση 'ελαφρών' υγρών καυσίμων, με χαμηλό σημείο ατμοποίησης, είναι μια καθαρά φυσική διεργασία, ενώ η ατμοποίηση 'βαρέων' υγρών καυσίμων συνοδεύεται και από την εμφάνιση χημικών αντιδράσεων.

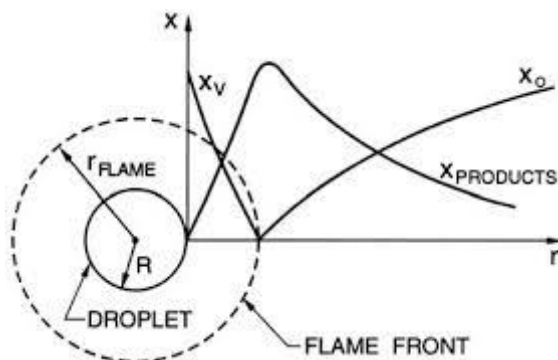
Τα υγρά καύσιμα εισάγονται στο θάλαμο καύσης αφού έχει προηγηθεί μια διεργασία 'λεπτού διαμερισμού' τους, αποσκοπώντας στην αύξηση του ρυθμού ανάμειξης και παραγωγής αέριου καυσίμου, και κατά συνέπεια του συνολικού ρυθμού καύσης. Ο διαμερισμός αυτός γίνεται μέσω διασκορπισμού του καυσίμου (atomization), που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή υγρών σταγονιδίων (droplets), μέσω της εκτόξευσής τους από λεπτά ακροφύσια. Οι ατμοί καυσίμου που δημιουργούνται μετά τη θέρμανση και την ατμοποίησή του στο θάλαμο καύσης κατά την είσοδό του σε αυτόν, αναμειγνύονται με το αέριο οξειδωτικό μέσο και αντιδρούν δημιουργώντας μια φλόγα διάχυσης που περιβάλλει το σταγονίδιο. Η καύση συνεπώς λαμβάνει χώρα σε ένα διφασικό και πολυσυστατικό μείγμα το οποίο αποτελείται από τα σταγονίδια υγρού καυσίμου και των αέριων προϊόντων της καύσης.

Δεδομένου ότι η φλόγα εμφανίζεται στη διεπιφάνεια του σταγονιδίου με τον αέρα της καύσης, για την επίτευξη ταχύτερης και τελειότερης καύσης απαιτείται η παραγωγή όσο το δυνατόν μικρότερων και περισσότερων σταγονιδίων καυσίμου. Για το λόγο αυτό στους περισσότερους κινητήρες το καύσιμο εγχέεται υπό τη μορφή νέφους σταγονιδίων (spray), προκειμένου να αυξηθεί το συνολικό εμβαδό διεπιφάνειας καυσίμου-αέρα. Λόγω της σχετικά μεγάλης πυκνότητας του υγρού καυσίμου, η δυναμική αλληλεπίδραση του δημιουργούμενου νέφους σταγονιδίων με τη ροή του αέρα καύσης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων φαινομένων ανταλλαγής ορμής και δημιουργίας τύρβης. Επίσης, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν αλληλεπιδράσεις μεταξύ σταγονιδίων (συγκρούσεις, συγχωνεύσεις) ή μεταξύ σταγονιδίων και στερεών τοιχωμάτων (πρόσκρουση, δημιουργία υγρής μεμβράνης).

Για την ανάλυση της καύσης υγρών καυσίμων γίνεται συνήθως η παραδοχή της καύσης μεμονωμένου σταγονιδίου (single droplet combustion). Η παρουσία ωστόσο μεγάλου αριθμού σταγονιδίων πρακτικά προκαλεί την εμφάνιση ποικίλων αλληλεπιδράσεων, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της φλόγας, φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζεται ως καύση νέφους σταγονιδίων (spray combustion).

2.4.2.1. Καύση μεμονωμένου σταγονιδίου

Η καύση ενός μεμονωμένου σταγονιδίου υγρού καυσίμου το οποίο εκτίθεται σε αέριο οξειδωτικό περιβάλλον αποτελεί μια σύνθετη διεργασία, η οποία χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση ποικίλων φυσικών και χημικών δεδομένων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η καύση ενός μεμονωμένου ακίνητου σφαιρικού σταγονιδίου σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης και μηδενικής βαρύτητας (απουσία φαινομένων θερμικής άνωσης):



Εικόνα 31: Κατανομή φλόγας σε καύση ακίνητου μεμονωμένου σταγονιδίου [67].

Δεδομένου ότι το σταγονίδιο είναι εκτεθειμένο σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας, παρατηρείται έντονη μεταφορά θερμότητας από την αέρια προς την υγρή φάση. Η σταδιακή θέρμανση του υγρού καυσίμου έχει σαν συνέπεια την έναρξη της ατμοποίησής του. Οι παραγόμενοι ατμοί καυσίμου, λόγω διάχυσης, κινούνται ακτινικά προς τα έξω. Στην περιοχή όπου οι συγκεντρώσεις ατμών καυσίμου και αέρα καύσης είναι κοντά στη στοιχειομετρική αναλογία ενεργοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις καύσης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φλόγας διάχυσης. Η φλόγα διάχυσης είναι μικρού πάχους, έχει σφαιρικό σχήμα και περιβάλλει το σταγονίδιο. Η εκλυόμενη θερμότητα της καύσης μεταφέρεται τόσο προς το αέριο περιβάλλον όσο και προς το σταγονίδιο, οπότε και αυξάνεται ο ρυθμός ατμοποίησής του. Τα παραγόμενα προϊόντα της καύσης μεταφέρονται, μέσω διάχυσης, τόσο προς τα έξω όσο και προς την εσωτερική περιοχή που βρίσκεται μεταξύ

της επιφάνειας του σταγονιδίου και της φλόγας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να μην η ατμοποίηση να επιταχύνεται, η καύση όμως του ατμοποιημένου καυσίμου να δυσχεραίνεται λόγω μειωμένης προσβασιμότητας σε οξυγόνο. Συνεπώς η ταχύτητα καύσης του σταγονιδίου παραμένει περίπου σταθερή στο μεγαλύτερο μέρος της.

Ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία του αναφλέξιμου μείγματος γύρω από το σταγονίδιο αντιστοιχεί σε ένα σημαντικό μέρος του συνολικά διαθέσιμου χρόνου για την ολοκλήρωση της καύσης. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός ατμοποίησης των σταγονιδίων αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον καθορισμό του συνολικού χρόνου της καύσης. Οι συνθήκες ατμοποίησης των σταγονιδίων επηρεάζουν εκτός από το συνολικό θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης της μηχανής και τις εκπομπές ρύπων. Στις μηχανές Diesel η βραδεία ατμοποίηση των σταγονιδίων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών αιθάλης και άκαυστων υδρογονανθράκων, ενώ αντίθετα, η ταχεία ατμοποίησή τους προκαλεί την αύξηση των εκπομπών NO_x , λόγω της συνεπακόλουθης έντονης αύξησης της θερμοκρασίας.

Παραπάνω έγινε αναφορά στην καύση ενός ακίνητου σταγονιδίου, στην πραγματικότητα όμως συνήθως κανένα σταγονίδιο δεν καίγεται ακίνητο στο θάλαμο καύσης, και η σχετική ταχύτητα σταγονιδίου και του περιβάλλοντος αέρα καύσης είναι μη μηδενική. Στην περίπτωση αυτή, στο ρευστομηχανικό πεδίο της αέρια φάσης που δημιουργείται γύρω από τα σταγονίδια εμφανίζονται σύνθετα ροϊκά φαινόμενα, όπως βαθμίδες πίεσης, οριακά στρώματα, αποκόλληση ροής και ομόρρους. Ταυτόχρονα παρατηρείται ροϊκή κυκλοφορία της υγρής φάσης στο εσωτερικό του σταγονιδίου, λόγω της ανάπτυξης διαμητρικών τάσεων. Τα ροϊκά αυτά φαινόμενα επηρεάζουν άμεσα τους ρυθμούς μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης, επηρεάζοντας έτσι άμεσα και το ρυθμό ατμοποίησης. Επιπλέον, ισχυρή επίδραση στα φαινόμενα αυτά έχει και η κίνηση της υποχωρούσας, λόγω ατμοποίησης, υγρής επιφάνειας του σταγονιδίου, όσο και η ακτινική κίνηση των παραγόμενων ατμών καυσίμου (ροή Stefan).

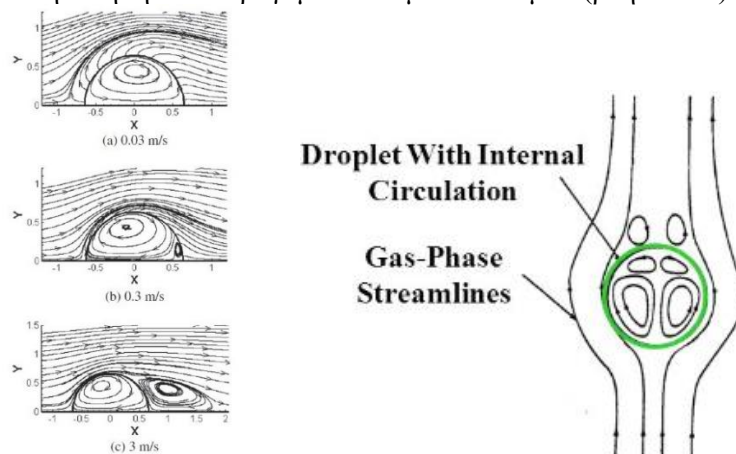
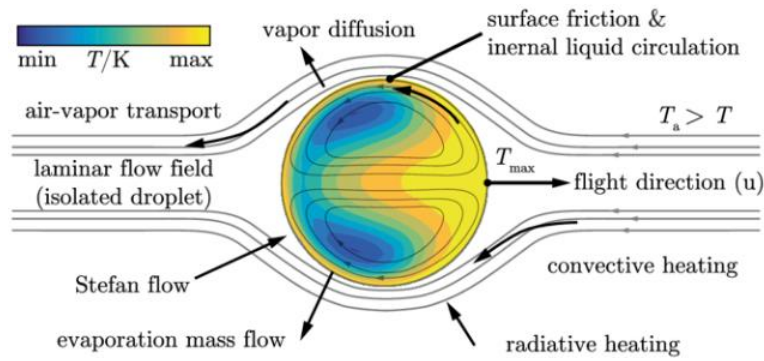


Fig. 8. Streamlines at half of the total lifetime of heptane for three free stream velocities.

Εικόνα 32: Ροϊκά πεδία κατά την καύση κινούμενου σωματιδίου [79],[80],[121].

Η σχετική ταχύτητα μεταξύ υγρής και αέριας φάσης έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή της σφαιρικής συμμετρίας του συστήματος, και οδηγεί επίσης στην αύξηση των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας και μάζας κατά μήκος του αέριου υμενίου το οποίο περιβάλλει το σταγονίδιο (film μεταξύ μετώπου φλόγας και επιφάνειας σταγονιδίου). Το υμένιο αυτό είναι ελλειψοειδές με το μεγαλύτερο μέρος του να εκτείνεται πίσω από το σταγονίδιο και μικρό μπροστά από αυτό. Στην περίπτωση που ο τοπικός αριθμός Reynolds είναι μεγάλος, παρατηρείται αποκόλληση στη ροή πίσω από το σταγονίδιο. Τα φαινόμενα της αποκόλλησης στην περίπτωση αυτή οφείλονται στη δυνατότητα κίνησης της υγρής φάσης στο εσωτερικό του σταγονιδίου και στις αναπτυσσόμενες διαμητρικές τάσεων στην επιφάνειά του. Η κίνηση του σταγονιδίου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ζώνης εσωτερικής ανακυκλοφορίας στην υγρή φάση (στρόβιλοι Hills), γεγονός που αυξάνει το ρυθμό εξέλιξης της ατμοποίησης, καθώς οδηγεί σε μείωση του χρόνου μεταφοράς μάζας και θερμότητας στην υγρή φάση, και ιδιαίτερα στο πίσω μέρος του σταγονιδίου, που η θερμοκρασία είναι μικρότερη απ' ό,τι στο μέτωπο του σημείου ανακοπής, όπου παρατηρείται και η μέγιστη θερμοκρασία, λόγω της υψηλής επάρκειας σε οξυγόνο.

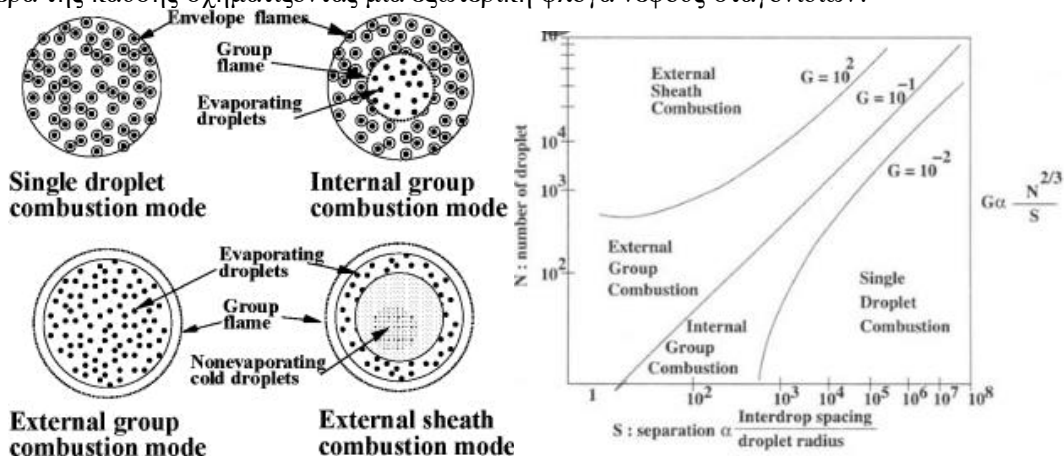


Εικόνα 33: Κατανομή θερμοκρασίας σε καίόμενο κινούμενο σωματίδιο [78][75]

Ο ρυθμός διάχυσης της στρωβιλότητας στην υγρή φάση είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το ρυθμό αγωγής θερμότητας, που με τη σειρά του είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό διάχυσης της μάζας. Από την άλλη, οι ρυθμοί μεταφοράς στην αέρια φάση είναι κατά πολύ μεγαλύτεροι αυτών της υγρής, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη και εφικτός δυνατή η ταυτόχρονη ανάλυση και συμπερίληψη όλων των φαινομένων σε μια μοντελοποίηση. Σε γενικές γραμμές όμως μπορεί να λεχθεί ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα εισαγωγής του σταγονιδίου στο θάλαμο καύσης, και πρακτικά όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση στη λεκάνη του εγχυτήρα, τόσο εντονότερα είναι τα ροϊκά φαινόμενα στην αέρια και υγρή φάση, τόσο εντονότερη η συναγωγή και τέλος, τόσο ταχύτερη η ατμοποίηση και καύση του καυσίμου.

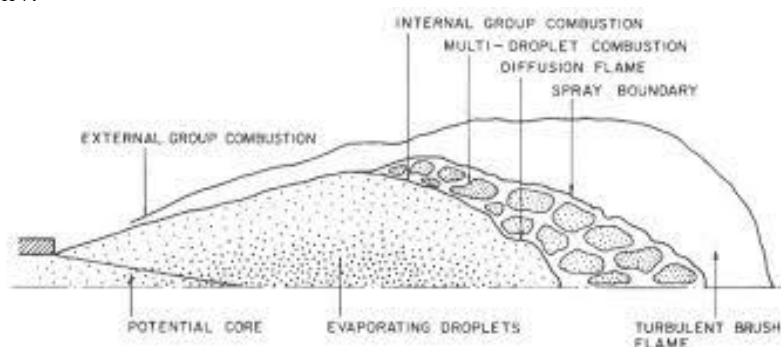
2.4.2.2. Καύση νέφους σταγονιδίων

Πρακτικά στις μηχανές εσωτερικής καύσης το καύσιμο εγχύεται υπό τη μορφή νέφους σταγονιδίων. Τα χαρακτηριστικά της καύσης νέφους σταγονιδίων διαφέρουν ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο θάλαμο καύσης. Στην περίπτωση που η μέση απόσταση των σταγονιδίων του νέφους είναι μεγάλη και ταυτόχρονα παρατηρείται υψηλός βαθμός διεύθυνσης του αέρα καύσης στο εσωτερικό του νέφους, η καύση του νέφους λαμβάνει τα χαρακτηριστικά της καύσης μεμονωμένου σταγονιδίου. Οι ατμοί καυσίμου του κάθε σταγονιδίου τροφοδοτούν τη φλόγα του και αυτό καίγεται ανεξάρτητα από τα άλλα. Αντίθετα, όταν η μέση απόσταση των σταγονιδίων ή ο ρυθμός διεύθυνσης του οξειδωτικού μέσου στο νέφος είναι μικροί, η συγκέντρωση των παραγόμενων ατμών καυσίμου γίνεται αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα να παρατηρείται τοπική ‘ψύξη’ της περιοχής που περιβάλλει κάθε σταγονίδιο και να μην είναι πλέον εφικτή η έναυση του μείγματος στο εσωτερικό του νέφους. Στην περίπτωση αυτή είτε εμφανίζονται πολλαπλές φλόγες διάχυσης οι οποίες περιβάλλουν ‘ομάδες’ σταγονιδίων (internal group combustion), είτε εμφανίζεται μια συνολική φλόγα στα εξωτερικά όρια του νέφους σταγονιδίων (external group combustion). Όταν λοιπόν τα σταγονίδια είναι λίγα και αραιά μεταξύ τους καίγονται ανεξάρτητα με το κάθε σταγονίδιο να περιβάλλεται από τη δική του φλόγα διάχυσης. Όταν το νέφος είναι πιο πυκνό, τα σωματίδια που βρίσκονται κοντά στα όρια του νέφους καίγονται ανεξάρτητα από τα άλλα, εφόσον υπάρχει επάρκεια σε οξυγόνο, ενώ οι παραγόμενοι ατμοί από τα υπόλοιπα σταγονίδια οδηγούν στην ταυτόχρονη δημιουργία μιας κύριας φλόγας εσωτερικά των εξωτερικών ορίων του νέφους. Τέλος, στην περίπτωση ενός πολύ πυκνού νέφους σταγονιδίων, η ατμοποίηση λαμβάνει χώρα σε όλο τον όγκο του νέφους, με τους παραγόμενους ατμούς να διαχέονται προς τα έξω και να αντιδρούν με τον αέρα της καύσης σχηματίζοντας μια εξωτερική φλόγα νέφους σταγονιδίων:



Εικόνα 34: Τρόποι καύσης νέφους σταγονιδίων [82][115]

Κατά την έγχυση του νέφους σταγονιδίων εμφανίζονται όλα τα παραπάνω φαινόμενα της καύσης του νέφους, μιας και η συγκέντρωση των σταγονιδίων μέσα στο θάλαμο δεν είναι σταθερή. Στην περιοχή κοντά στον εγχυτήρα η θερμοκρασία είναι χαμηλή και η συγκέντρωση των σταγονιδίων μεγάλη ενώ υπάρχει ποικιλία φυσικών φαινομένων που επηρεάζουν το μέγεθος των σταγονιδίων. Το μέγεθός τους εξαρτάται από την ατμοποίησή τους και τις συγκρούσεις μεταξύ τους, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν είτε συγχώνευση (coalescence), είτε τον περαιτέρω κατακερματισμό τους (shattering). Στην περιοχή αυτή συμβαίνει μόνο η ατμοποίηση του καυσίμου καθώς η θερμοκρασία αλλά και η έλλειψη οξυγόνου δεν επιτρέπουν την καύση του. Οι παραγόμενοι ατμοί διαχέονται προς την εξωτερική μεριά του νέφους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας εσωτερικής φλόγας η οποία περιβάλλει τα ατμοποιούμενα σταγονίδια. Στα όρια του νέφους των σταγονιδίων και μακριά από τον εγχυτήρα αναπτύσσονται μικρότερες φλόγες γύρω από ομάδες σταγονιδίων (multi-droplet combustion), ενώ οι διαχόμενοι ατμοί γύρω από τις ομαδικές καύσεις δημιουργούν μια εξωτερική φλόγα διάχυσης μεγάλου πάχους (external group combustion), η οποία περιβάλλει εξωτερικά το νέφος των σταγονιδίων. Η συνολική δομή της αναπτυσσόμενης φλόγας νέφους σταγονιδίων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό σημαντικές λειτουργικές παραμέτρους, όπως η σταθεροποίηση της φλόγας, ο ρυθμός καύσης και η παραγωγή ρύπων.



Εικόνα 35: Καύση σταγονιδίων εγχόμενων σε κινητήρα [81]

2.4.2.3. Διασκορπισμός σταγονιδίων

Το πρώτο στάδιο της διεργασίας της καύσης υγρών καυσίμων χαρακτηρίζεται από τα φαινόμενα διασκορπισμού (atomization) και διασποράς (dispersion) του υγρού καυσίμου στο ρεύμα του αέρα καύσης, τα οποία καθορίζουν το συνολικό εμβαδό της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης καθώς και το βαθμό της διασποράς του καυσίμου στον αέρα καύσης. Αυτά με τη σειρά τους παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας (ατμοποίηση, μοριακή διάχυση), που καθορίζουν το ρυθμό της καύσης του καυσίμου.

Ο όρος ‘διασκορπισμός’ σταγονιδίων χρησιμοποιείται για την περιγραφή της φυσικής διεργασίας αποσύνθεσης μιας αρχικά συνεχούς δέσμης υγρού σε ένα μεγάλο αριθμό σταγονιδίων μικρής διαμέτρου. Στο θάλαμο καύσης ο διασκορπισμός επιδιώκεται προκειμένου, με την αύξηση της επιφάνειας του υγρού, να επιταχυνθεί η μεταφορά θερμότητας και μάζας, και ταυτόχρονα να αναμειχθεί καλύτερα το καύσιμο με τον αέρα καύσης. Όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια του σταγονιδίου τόσο μεγαλύτερος και ο ρυθμός ατμοποίησής του, ωστόσο ανά μονάδα όγκου ο ρυθμός ατμοποίησης αυξάνεται με τη μείωση της διαμέτρου του σταγονιδίου. Συνεπώς για την ταχύτερη καύση ενός όγκου καυσίμου επιδιώκεται ψιλός διασκορπισμός του σε σταγονίδια μικρής διαμέτρου. Στα συμβατικά συστήματα καύσης υγρών καυσίμων η διάμετρος των παραγόμενων σταγονιδίων είναι περίπου 10~100 μm . Το μέγεθος των παραγόμενων σταγονιδίων επηρεάζει τόσο την απόδοση της συνολικής εγκατάστασης καύσης όσο και τη σύσταση των εκπεμπόμενων ρύπων. Η τελική κατανομή μεγέθους των υγρών σταγονιδίων καθορίζεται από μια σειρά φυσικών μηχανισμών, όπως η πρωτογενής διάσπαση (primary break-up) του υγρού, η δευτερογενής διάσπαση (secondary break-up) και η πιθανή συγχώνευση (coalescence) λόγω των συγκρούσεων των σταγονιδίων.

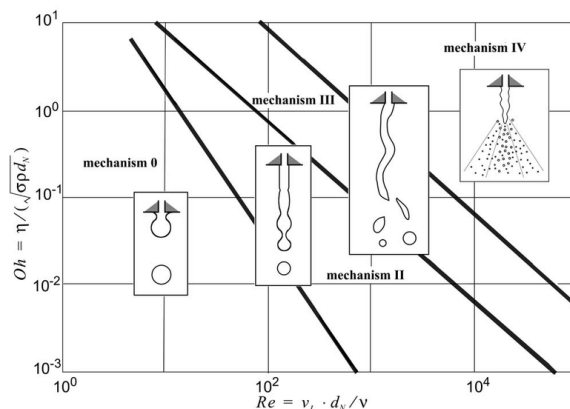
Ο διασκορπισμός βασίζεται στη φυσική διεργασία της διάσπασης τμημάτων υγρού από τη διεπιφάνεια υγρού-αερίου, στην οποία αναπτύσσονται επιφανειακά κύματα, των οποίων το πλάτος αυξάνεται πολύ γρήγορα όταν παρατηρείται μη μηδενική ταχύτητα ολίσθησης. Η ενίσχυση των επιφανειακών κυμάτων οδηγεί στην ταχεία απόλεια της ευστάθειας του συστήματος, τη διάσπαση της επιφάνειας και τελικά την αποσύνθεση της υγρής δομής σε επιμέρους σταγονίδια. Η διεργασία του διασκορπισμού πραγματοποιείται ευκολότερα όταν το υγρό βρίσκεται υπό τη μορφή υγρής δέσμης (liquid jet) ή υγρής μεμβράνης (liquid sheet), μιας και τότε το εμβαδό της επιφάνειας είναι μεγάλο και η επιφανειακή ενέργεια υψηλή, οπότε το σύστημα είναι πιο ασταθές και επιρρεπές στην αποσύνθεση. Στην περίπτωση ύπαρξης βαρυτικού πεδίου ή εμφάνισης τριχοειδούς

πίεσης λόγω της επιφανειακής τάσης του υγρού, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν και φαινόμενα απόσβεσης των κυματισμών και δυσχέρειας της διάσπασης.

Μακροσκοπικά, η αναπτυσσόμενη διφασική ροή κοντά στο ακροφύσιο χαρακτηρίζεται από την περιοχή του υγρού πυρήνα (liquid core), την περιοχή πυκνής ροής και την περιοχή αραιής ροής. Ο υγρός πυρήνας αποτελείται από μεγάλα στοιχεία υγρού που είναι σχετικώς ευσταθή, καθώς η ανταλλαγή ορμής με την αέρια φάση είναι περιορισμένη. Πιο μακριά από το ακροφύσιο και προς τα όρια του υγρού πυρήνα, λόγω των φαινομένων ανάμειξης, παρατηρείται μείωση της κατ' όγκο συγκέντρωσης της υγρής φάσης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αστάθειες στον υγρό πυρήνα, που προκαλούν την αποσύνθεσή του και την εμφάνιση ινών και σταγονιδίων. Η περιοχή αυτή είναι η περιοχή της πυκνής ροής και διέπεται από ένα εύρος μεγεθών, σχημάτων και ταχυτήτων σταγονιδίων. Στη συνέχεια η περαιτέρω μείωση της κατ' όγκο συγκέντρωσης της υγρής φάσης στην περιοχή αραιής ροής οδηγεί στη μείωση του μέσου μεγέθους των σταγονιδίων, τα οποία πλέον λαμβάνουν σφαιρικό σχήμα και τα χαρακτηριστικά μιας συμβατικής ροής νέφους σταγονιδίων.

Λειτουργικές παράμετροι όπως η ταχύτητα της δέσμης, η διάμετρος, η τραχύτητα και το σχήμα του ακροφυσίου, το επίπεδο τύρβης εντός και εκτός του ακροφυσίου, τα ροϊκά χαρακτηριστικά της αέριας φάσης, φαινόμενα σπηλαιώσης κ.α. επηρεάζουν την εξέλιξη του διασκορπισμού. Λόγω της υψηλής πίεσης στη λεκάνη του κοινού συλλέκτη καυσίμου η διαφορά πίεσης, όταν ανοίγει ο ακροφύσιο, είναι μεγάλη με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του καυσίμου και την ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων σε αυτό. Κατά την έξοδο του καυσίμου από το ακροφύσιο, αυτό στενεύει και οι ροϊκές γραμμές του υγρού πλησιάζουν μεταξύ τους προκειμένου να διατηρηθεί η ορμή και η μάζα, με αποτέλεσμα την περαιτέρω επιτάχυνση του καυσίμου στο σημείο αυτό. Η αυξημένη αυτή ταχύτητα σημαίνει και την πτώση της πίεσης, όπως υπαγορεύει η εξίσωση του Bernoulli, η οποία μπορεί να πέσει και κάτω από το όριο ατμοποίησης του καυσίμου στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται φυσαλίδες σπηλαιώσης και η διάσπαση του spray υποβοηθάται ήδη από το εσωτερικό του ακροφυσίου. Οι φυσικές ιδιότητες του καυσίμου που επηρεάζουν άμεσα το φαινόμενο του διασκορπισμού είναι η πυκνότητα, η επιφανειακή τάση και η συνεκτικότητα. Η επιφανειακή τάση είναι ιδιαίτερα σημαντική μιας και εκφράζει την αντίσταση του υγρού στη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας, και συνεπώς την αντίσταση του υγρού στο διασκορπισμό του. Η συνεκτικότητα, από την άλλη, επιδρά στην αντίσταση της υγρής δέσμης ή του υγρού φιλμ προς τη δημιουργία ασταθειών στην έκτασή του, ιδιαίτερα όσο βρίσκεται κοντά στο ακροφύσιο, με αποτέλεσμα την έναρξη του διασκορπισμού σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτό, όπου όμως οι συνθήκες (μικρότερη ταχύτητα κ.λπ.) δεν ευνοούν τη διάσπαση σε σταγονίδια μικρής διαμέτρου. Για τη μείωση της καθυστέρησης του διασκορπισμού λόγω συνεκτικότητας του καυσίμου συχνά γίνεται προθέρμανση αυτού, ώστε να μειωθεί η συνεκτικότητά του.

Με βάση τα παραπάνω το φαινόμενο του διασκορπισμού περιγράφεται από τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds, Weber και Ohnesorge. Ο αριθμός Re_d βασίζεται στην ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ του σταγονιδίου και του αερίου περιβάλλοντος. Ο αριθμός We εκφράζει το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο αυξάνεται το μέτρο των εξωτερικών δυνάμεων που παραμορφώνουν το σταγονίδιο προς τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης, που τείνουν να διατηρήσουν το σχήμα του σταγονιδίου. Όσο ο αριθμός We είναι μικρότερος της μονάδας το σταγονίδιο θεωρείται ότι δεν αποκλίνει ιδιαίτερα από τη σφαίρα. Τέλος, ο αριθμός Oh εκφράζει το λόγο των δυνάμεων συνεκτικότητας στο εσωτερικό του σταγονιδίου προς τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης: $Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re_d} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot D}}$, όπου σ εκφράζει την επιφανειακή τάση, μ τη συνεκτικότητα του αερίου, D η διάμετρος των σταγονιδίων και ρ η πυκνότητα του αερίου.








Εικόνα 36: Διάσπαση έγχυσης σε επιμέρους σταγονίδια ανάλογα την ταχύτητα και το ιξώδες της [83]

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται οι βασικοί τρόποι πρωτογενούς διασκορπισμού δέσμης υγρού που διέρχεται από διασκορπιστή πίεσης, συναρτήσει των αριθμών Oh και Re_d . Φαίνεται ότι ο μηχανισμός 4, ο μηχανισμός δηλαδή του διασκορπισμού, επιτυγχάνεται ιδανικά σε περιπτώσεις υψηλού αριθμού Re, δηλαδή για υψηλές ταχύτητες του υγρού jet και για σταγονίδια μεγάλης διαμέτρου, και υψηλού αριθμού Oh, δηλαδή για υψηλές τιμές της συνεκτικότητας του αέρα. Η αύξηση της συνεκτικότητας του αέρα επιτυγχάνεται με υψηλές τιμές πίεσης μέσα στο θάλαμο καύσης. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για ένα θεωρητικά άπειρα μικρό αριθμό Oh, δηλαδή για ρίψη δέσμης σε κενό, επικρατεί ο μηχανισμός 0, δηλαδή πλήρως σφαιρικά σταγονίδια, αλλά με μηδενικό διασκορπισμό. Ο μηχανισμός 0 (μηχανισμός Rayleigh) απαντάται σε περιπτώσεις χαμηλής ταχύτητας jet και συνεκτικότητας αέρα, οπότε η δέσμη διασκορπίζεται λόγω της δημιουργίας ασταθών επιφανειακών κυμάτων μεγάλου μήκους μέσω της επίδρασης της επιφανειακής τάσης (μικρή συνεκτικότητα μ και μεγάλη επιφανειακή τάση σ). Οι μηχανισμοί 2 και 3, δηλαδή συμμετρικών και μη-συμμετρικών κυματισμών αντίστοιχα, απαντώνται σε περιοχές μεσαίων τιμών του αριθμού Re και Oh. Για τη μετάβαση στην περιοχή 2 απαιτείται μια αύξηση στην ταχύτητα του jet. Η αύξηση αυτή της ταχύτητας επηρεάζει σημαντικά τον αριθμό $We = \frac{\rho_g * D * v_j^2}{\sigma}$, ο οποίος καταδεικνύει την αύξηση των εξωτερικών δυνάμεων που δέχεται η δέσμη και αυξάνεται σημαντικά. Βγαίνει συνεπώς το συμπέρασμα ότι ο διασκορπισμός στις περιοχές 2 και 3 οφείλεται κυρίως στην επίδραση των αεροδυναμικών δυνάμεων που δέχεται η δέσμη και απαντάται κυρίως για αριθμούς $We_j > 40$. Τέλος, η περιοχή 4, που είναι ο τέλειος και ακαριαίος διασκορπισμός κοντά στην περιοχή της οπής εξόδου του ακροφύσιου, απαντάται σε υψηλούς αριθμούς Oh για υψηλές ταχύτητες jet και μεγάλους αριθμούς Re, και οφείλεται στην επίδραση της πολύ μεγάλης τιμής της συνεκτικότητας του αερίου, της υψηλής του πίεσης και αντίστοιχα της χαμηλής συνεκτικότητας του υγρού.

Τα σταγονίδια που κινούνται σε ένα αέριο ρεύμα είναι δυνατόν να αποσυντεθούν περαιτέρω σε μικρότερα σταγονίδια μέσω του μηχανισμού του δευτερογενούς διασκορπισμού (secondary atomization), ο οποίος λαμβάνει χώρα μακριά από το ακροφύσιο και διαφέρει από τον πρωτογενή διασκορπισμό, που συμβαίνει κοντά στο ακροφύσιο. Ο δευτερογενής διασκορπισμός οφείλεται είτε στη χρονική μεταβολή των δυνάμεων που επιδρούν στο σταγονίδιο είτε στη σύγκρουσή του με άλλο σταγονίδιο ή επιφάνεια. Η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια του σταγονιδίου οφείλεται στη σχετική ταχύτητα μεταξύ του σταγονιδίου και του περιβάλλοντος αερίου και είναι εξαιρετικά ανομοιόμορφη μιας και το πεδίο ταχύτητας του αερίου είναι επίσης ανομοιόμορφο λόγω ύπαρξης τύρβης. Επιπροσθέτως της εξωτερικής ανομοιόμορφης πίεσης, στο εσωτερικό του σταγονιδίου διαμορφώνεται σταδιακά ένα ροϊκό πεδίο υγρής φάσης. Οι ανομοιομορφίες αυτές εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης οδηγούν στην παραμόρφωση του σχήματος του σταγονιδίου. Στην περίπτωση που μια απότομη αλλαγή στο μέτρο των αεροδυναμικών εξωτερικών δυνάμεων δεν είναι εφικτό να αντισταθμιστεί από μια αντίστοιχη μεταβολή των συνεκτικών δυνάμεων του υγρού, η παραμόρφωση του σταγονιδίου είναι δυνατόν να λάβει μεγάλες διαστάσεις και να καταλήξει σε περαιτέρω αποσύνθεσή του σε σταγονίδια μικρότερης διαμέτρου.

Τα χαρακτηριστικά του δευτερογενούς διασκορπισμού καθορίζονται επίσης από τα τις σχετικές τιμές των δυνάμεων που συνδέονται με τη συνεκτικότητα, την επιφανειακή τάση και την αδράνεια, με σημαντικότερο κριτήριο την τιμή του αριθμού We, που, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εκφράζει τη σχέση των εξωτερικών δυνάμεων προς τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης. Ο δευτερογενής διασκορπισμός μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την τελική μορφή του jet και το μέγεθος των σταγονιδίων. Λόγω των υψηλών σχετικών ταχυτήτων αέρας και υγρής φάσης που επικρατούν κοντά στο ακροφύσιο, ο κύριος μηχανισμός διάσπασης που παρατηρείται είναι καταστροφικός (catastrophic breakup) και ο πλοκαμοειδής (stripping breakup), ενώ, όσο μεγαλώνει η απόσταση από το ακροφύσιο και η διάμετρος και η ταχύτητα του σταγονιδίου μειώνονται, επικρατούν οι υπόλοιποι μηχανισμοί. Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές μορφές δευτερογενούς διασκορπισμού σε αντιστοιχία με τον αριθμό We:

| Category | | Weber Number |
|-----------------------|--|--------------|
| Vibrational breakup |  | ~ 12 |
| Bag breakup |  | < 20 |
| Bag/ streamer breakup |  | < 50 |
| Stripping breakup |  | < 100 |
| Catastrophic breakup |  | > 100 |

Εικόνα 37: Μηχανισμοί διάσπασης σταγονιδίων[84].

Στην περίπτωση της κυστοειδούς διάσπασης (bag breakup) οι δυνάμεις που κυριαρχούν είναι οι αεροδυναμικές, ενώ οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης και συνεκτικότητας αντιστέκονται και επιβραδύνουν αντίστοιχα τη διάσπαση του σταγονιδίου. Καθώς το σταγονίδιο κινείται μέσα στην αέρια φάση, λόγω αυξημένης πίεσης το σφαιρικό του σχήμα πλατύνεται, ενώ το υγρό στην περιφέρεια του δίσκου ‘παρασύρεται’ προς τα πίσω από τη σχετική ροή της αέριας φάσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ‘δαχτυλιδιού’ περιφερειακού υγρού και μια προπορευόμενη φούσκα με σταδιακά μειούμενο πάχος που τελικά διαλύεται σε σταγονίδια. Στην περίπτωση της διάσπασης με δημιουργία στήμονα, η ταχύτητα είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα η πίεση στο σημείο πρόσπτωσης στο κέντρο της κύστης να είναι επίσης αυξημένη ώστε δημιουργείται ροή ρευστού από τις άκρες της κύστης προς το κέντρο και αξονική ροή στο κέντρο του δακτυλίου. Στην πλοκαμοειδή απόσχιση (shear-stripping breakup) η ταχύτητα είναι τόσο μεγάλη ώστε η πίεση στο κέντρο του σταγονιδίου υπερνικάει τις δυνάμεις τριβής στην περιφέρεια, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ακολουθούστος ασκού. Λόγω όμως της έντασης του φαινομένου, πριν καν την ολοκλήρωση της πλάτυνσης του σταγονιδίου, ήδη μέρη του υγρού της περιφέρειας αποσχίζονται από το κυρίως σώμα δημιουργώντας λωρίδες, με αποτέλεσμα, η δημιουργία περιφερειακού δαχτυλιδιού, που θα υποστήριζε την κύστη, να επιβραδύνεται. Οι αδρανειακές δυνάμεις υπερνικούν τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης και οι αρχικές λωρίδες επιμηκύνονται κατά μήκος της φοράς κίνησης και οι άκρες τους διασπώνται σε σταγονίδια. Το σταγονίδιο χάνει έτσι σημαντικό μέρος της ποσότητάς του, η διάμετρος του μειώνεται, όπως επίσης και ο πραγματικός αριθμός We, με αποτέλεσμα η περαιτέρω διάσπασή του να συμβαίνει σύμφωνα με τους μηχανισμούς ταλαντωτικής ή κυστοειδούς διάσπασης (vibrational, bag breakup).[68]

2.4.2.4. Ακροφύσια διασκορπισμού

Για τη δημιουργία νέφους σταγονιδίων απαιτείται η χρήση κατάλληλων διασκορπιστών (atomizer) ή ακροφυσίων διασκορπισμού (atomizing nozzle), μιας και ακροφύσια που πετυχαίνουν ψιλό διασκορπισμό επιταχύνουν την ατμοποίηση και καύση του καυσίμου, ενώ ακροφύσια που παράγουν σταγονίδια μεγαλύτερης διαμέτρου καταφέρνουν την καλύτερη διείσδυσή τους στο θάλαμο καύσης και μεγαλύτερη ομοιομορφία μείγματος [69]. Τα ακροφύσια, μεταξύ άλλων, πρέπει να είναι ικανά να διασκορπίζουν την υγρή δέσμη σε ένα εύρος ταχυτήτων ροής, να παράγουν ομοιόμορφο κατά το δυνατόν νέφος σταγονιδίων παρόμοιου μεγέθους, να έχουν μικρή κατανάλωση ενέργειας και μικρή πιθανότητα απόφραξης και αστοχίας. Η ποικιλία των ακροφυσίων διασκορπισμού, που έχουν αναπτυχθεί, είναι μεγάλη και η λειτουργία τους βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας στο υγρό. Η προσδιδόμενη ενέργεια μπορεί να έχει τη μορφή κινητικής ενέργειας της υγρής φάσης, κινητικής ενέργειας της αέριας φάσης, μηχανικής ενέργειας, ηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Τα ακροφύσια διαχωρίζονται, ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς ενέργειας στο υγρό σε:

- Διασκορπιστές πίεσης (pressure atomizers), η λειτουργία των οποίων βασίζεται στη μετατροπή της πίεσης του υγρού σε κινητική ενέργεια με σκοπό την επίτευξη υψηλής σχετικής ταχύτητας καυσίμου και αερίου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι διασκορπιστές δέσμης (jet atomizers), οι διασκορπιστές συστροφής (swirl atomizers) και οι διασκορπιστές συστρεφόμενης δέσμης (jet swirl atomizers). Σε συμβατικούς κινητήρες Diesel επικρατεί η χρήση διασκορπιστών πίεσης.

- Πνευματικούς διασκορπιστές (pneumatic atomizers), στους οποίους η ενέργεια παρέχεται στο υγρό μέσω ενός ρεύματος αερίου. Συνήθως για την ενίσχυση του διασκορπισμού γίνεται χρήση ρευμάτων αερίου είτε υψηλής ταχύτητας και χαμηλής παροχής είτε χαμηλής ταχύτητας και υψηλής παροχής.
- Μηχανικούς διασκορπιστές (mechanical atomizers), στους οποίους το υγρό επιταχύνεται μέσω ενός μηχανικού επενεργητή, όπως π.χ. ενός περιστρεφόμενου δίσκου.
- Ηχητικούς διασκορπιστές (ultrasonic atomizers), ηλεκτροστατικούς διασκορπιστές (electrostatic atomizers) και πιεζοηλεκτρικούς διασκορπιστές (piezoelectric atomizers), που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις εξειδικευμένων εφαρμογών.

Ταυτόχρονα, ανάλογα το σχήμα του spray που σχηματίζεται, οι διασκορπιστές χωρίζονται σε ακροφύσια συμπαγούς και κοίλου κώνου. Στην πρώτη περίπτωση η μάζα του υγρού είναι συγκεντρωμένη στον άξονα του ακροφυσίου, επιτυγχάνεται μεγάλη διείσδυση στο θάλαμο καύσης και γι' αυτό χρησιμοποιείται και σε κινητήρες Diesel. Στη δεύτερη περίπτωση το spray κινείται απομακρυνόμενο από τον άξονα του ακροφυσίου, αφήνοντάς τον κενό, με αποτέλεσμα τον ψιλότερο και ευρύτερο διασκορπισμό του spray. Τα ακροφύσια αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως σε αεριοστροβίλους, καυστήρες, κ.λπ.

2.4.3. Χημική κινητική της καύσης

Η χημική κινητική της καύσης είναι εξαιρετικά περίπλοκη, καθώς οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι πολλές και με μεγάλη εξάρτηση από την πίεση και τη θερμοκρασία. Εξάλλου οι αντιδράσεις διαφέρουν και με τη χρήση διαφορετικών καυσίμων. Αυτός ο πολυπαραγοντισμός, που διέπει την καύση, και η ευαισθησία του αποτελέσματός της είναι που καθιστούν τη μελέτη της και κατ' επέκταση και την προσομοίωσή της εξαιρετικά δύσκολη να αποδοθεί με ακρίβεια. Αυτός ο πολυπαραγοντισμός και η αστάθεια όμως του συστήματος είναι που ωθεί στην περαιτέρω μελέτη με στόχο τη μείωση των ρύπων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριοι και σημαντικότεροι μηχανισμοί καύσης και χημικής κινητικής που διέπουν την καύση υδρογονανθράκων.

2.4.3.1. Αυτανάφλεξη υγρών καυσίμων

Στην έναυση του μείγματος καύσης σημαντικότατο ρόλο παίζει η θερμοκρασία αυτανάφλεξης, όπως προαναφέρθηκε. Πρόκειται για μέγεθος χαρακτηριστικό του καυσίμου, που ωστόσο επηρεάζεται από τα φαινόμενα μεταφοράς μέσω διάχυσης και συναγωγής σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυσίμου, και είναι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτανάφλεξης για το συγκεκριμένο καύσιμο. Η τάση προς αυτανάφλεξη των καυσίμων υδρογονανθράκων σχετίζεται άμεσα με το μοριακό τους μέγεθος και με τον αριθμό των πλευρικών αλυσίδων των μορίων τους, έτσι ώστε υδρογονάνθρακες μικρού μοριακού μεγέθους να παρουσιάζουν περιορισμένη τάση προς αυτανάφλεξη, ενώ υδρογονάνθρακες μεγάλης διακλαδιζόμενης αλυσίδας να εξαρτώνται από τη δομή της αλυσίδας τους. Τα καύσιμα με μοριακή δομή ευθείας αλυσίδας (κανονικά αλκάνια) εμφανίζουν υψηλότερη αντιδραστικότητα από αυτά με διακλαδιζόμενη αλυσίδα (ισομερή), μιας και ο αυξημένος αριθμός ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους μειώνει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης.

Ο μηχανισμός της αυτανάφλεξης των υγρών καυσίμων εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων, όπως είναι το μέγεθος και η γεωμετρία του συστήματος, ο λόγος αέρα καύσης, η ποιότητα της ανάμειξης του μείγματος, η πίεση, ο χρόνος καθυστέρησης της ανάφλεξης, η χημική δομή του καυσίμου, οι επιφανειακές αντιδράσεις, κ.α. Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν αν η έναυση θα είναι θερμική ή χημικής αλυσίδας, που είναι οι δύο βασικοί μηχανισμοί έναυσης. Συνήθως, στην περίπτωση μεγαλομοριακών αλκανίων, τα οποία βρίσκονται σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 800K, η σύνθετη χημική κινητική οδηγεί στην εμφάνιση του φαινομένου έναυσης δύο σταδίων κατά το οποίο η θερμική έναυση προηγείται από έναν παλμό πίεσης και θερμοκρασίας, ο οποίος αποκαλείται 'ψυχρή φλόγα'.

Η θερμική έναυση προϋποθέτει την επιταχυνόμενη αύξηση της θερμοκρασίας του καυσίμου μείγματος, εφόσον αυτό βρίσκεται ήδη σε υψηλή θερμοκρασία είτε έχει υποστεί αδιαβατική συμπίεση, σε σημείο που ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας είναι σταθερά μεγαλύτερος από το ρυθμό απώλειας θερμότητας προς το περιβάλλον. Ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ ο ρυθμός απωλειών αυξάνεται γραμμικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η έναυση να εξαρτάται από το ρυθμό απωλειών θερμότητας. Όσο η ευθεία απώλειας θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι κάτω από την εκθετική καμπύλη αύξησης του ρυθμού παραγωγής της, η θερμοκρασία θα αυξάνεται εκθετικά μέχρις ότου εμφανιστούν τα πρώτα χαρακτηριστικά της καύσης και σηματοδοτηθεί η έναυση. Αν ο ρυθμός απωλειών θερμότητας υπερβαίνει την εκθετική καμπύλη σε μια περιοχή θερμοκρασιών, οι καμπύλες δηλαδή έχουν δύο

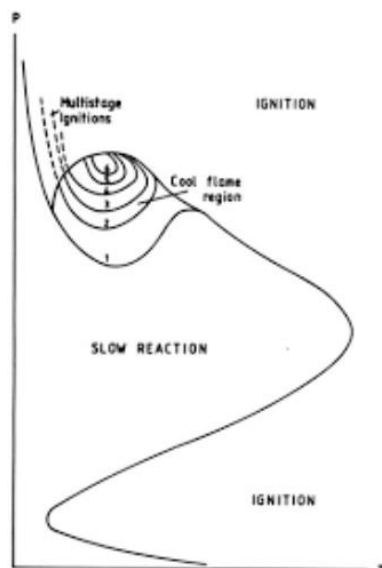
κοινά σημεία, τότε το πρώτο σημείο τομής τους είναι ευσταθές σημείο ισορροπίας, με την έννοια ότι οποιαδήποτε διαταραχή της θερμοκρασίας οδηγεί πίσω στο σημείο αυτό και δεν επιτρέπει την έναυση, ενώ το δεύτερο είναι σημείο ασταθούς ισορροπίας, με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από αυτή της ισορροπίας να οδηγεί στην έναυση του μείγματος. Η θερμική έναυση ωστόσο παρατηρείται συνήθως σε μονοβηματικές αντιδράσεις και δε χαρακτηρίζει την έναυση των συνήθων καυσίμων, στην οποία λαμβάνουν χώρα ενδιάμεσες αλυσιδωτές αντιδράσεις, που προκαλούν μια σύνθετη θερμοχημική συμπεριφορά.

Συνεπώς στα συνήθη καύσιμα και στην περίπτωση εμφάνισης αλυσιδωτών αντιδράσεων με ταυτόχρονη παραγωγή ενδιάμεσων ελευθέρων ριζών είναι δυνατόν να εμφανιστεί έναυση ακόμα και σε συνθήκες σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας, μέσω του μηχανισμού έναυσης χημικής αλυσίδας. Στο μηχανισμό αυτό ο ρυθμός παραγωγής των χημικών ενώσεων -φορέων των αντιδράσεων διακλάδωσης αλυσίδας υπερβαίνει το ρυθμό κατανάλωσής τους, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του συνολικού αριθμού αντιδράσεων. Ωστόσο για την ενεργοποίηση των αντιδράσεων έναρξης αλυσίδας συνήθως απαιτείται η ύπαρξη μιας εξωτερικής πηγής θερμότητας.

Η ανάφλεξη των περισσότερων υδρογονανθράκων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 850 K λαμβάνει συνήθως χώρα σε ένα στάδιο, ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες είναι δυνατόν να συμβεί και σε δύο στάδια, ιδιαίτερα σε μείγματα πλούσια σε καύσιμο. Το πρώτο στάδιο έναυσης περιλαμβάνει το φαινόμενο της ψυχρής φλόγας, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη μέτρια αύξηση της πίεσης σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας, που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του μείγματος στους 850 K περίπου. Η πορεία εξέλιξης του πρώτου σταδίου χαρακτηρίζεται από το χρόνο επαγωγής, κατά τον οποίο αυξάνεται η συγκέντρωση των ελευθέρων ριζών έως μια κρίσιμη τιμή, όπου ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας από τις εξώθερμες αντιδράσεις γίνεται ίσος με το ρυθμό απωλειών θερμότητας. Η θερμοκρασία τότε και η συγκέντρωση των ελευθέρων ριζών αυξάνονται απότομα δημιουργώντας την επανομαζόμενη ψυχρή φλόγα. Στη συνέχεια η θερμοκρασία ελαττώνεται πάλι μέχρι μια κρίσιμη τιμή, που αντιστοιχεί σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας σε υψηλότερη θερμοκρασία. Η τάση ψύξης του συστήματος αντισταθμίζεται από την έκλυση θερμότητας των χημικών αντιδράσεων. Ο χρόνος επαγωγής, στην περίπτωση ανάφλεξης δύο σταδίων, αντιστοιχεί στο χρόνο καθυστέρησης χημικής ανάφλεξης, ο οποίος εξαρτάται από τις αντιδράσεις ψυχρής φλόγας και αντιπροσωπεύει την ολοκλήρωσή τους σε σχέση με την έναρξη των γρηγορότερων εξώθερμων αντιδράσεων υψηλής θερμοκρασίας. Όσο υψηλότερη είναι η αρχική θερμοκρασία του θαλάμου τόσο μικρότερος είναι και ο χρόνος επαγωγής.

Το κύριο χαρακτηριστικό της ψυχρής φλόγας είναι η επιβράδυνση των αντιδράσεων αποσύνθεσης του καυσίμου όταν η θερμοκρασία αυξηθεί σε σημείο που παρατηρούνται αντιδράσεις αποσύνθεσης των ενώσεων-φορέων των αντιδράσεων διακλάδωσης αλυσίδας και ενίσχυση των αντιδράσεων τερματισμού αλυσίδας, λόγω της μείωσης της ενέργειας ενεργοποίησής τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Από τη μία έτσι εμποδίζεται η υπέρμετρη και απότομη αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας στο θάλαμο καύσης, ενώ ταυτόχρονα το μείγμα και ο θάλαμος προετοιμάζονται για την ταχύτερη καύση κατά την κύρια έναυση(???). Το ποσό του καυσίμου που καίγεται κατά την εμφάνιση της ψυχρής φλόγας είναι μικρό και η θερμοκρασία δεν αυξάνεται πάνω από 150 K, ωστόσο η εμφάνισή της κατά την καθυστέρηση έναυσης είναι προτιμότερη από την απουσία της.

Παρακάτω φαίνεται ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα έναυσης υδρογονανθράκων:



Εικόνα 38: Περιοχές θερμοκρασίας και πίεσης στις οποίες εμφανίζεται ψυχρή φλόγα [70].

Φαίνεται ότι σε χαμηλές τιμές θερμοκρασίας και πίεσης δεν παρατηρείται έναυση μιας και η χαμηλή πίεση μειώνει τις πιθανότητες σύγκρουσης των μορίων. Ωστόσο εμφανίζονται αργές αντιδράσεις παραγωγής ελεύθερων ριζών, οι οποίες όμως κινούνται προς τα τοιχώματα, όπου αντιδρούν, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σταθερών ενώσεων (αντιδράσεις τερματισμού αλυσίδας). Η κίνηση των ελεύθερων ριζών προς τα τοιχώματα γίνεται με διάχυση, φαινόμενο που ευνοείται σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και πυκνότητας. Όταν η τιμή της πίεσης αυξηθεί άνω του πρώτου ορίου ανάφλεξης, παρατηρείται αυτανάφλεξη, καθώς μειώνεται ο ρυθμός διάχυσης των ελευθέρων ριζών προς τα τοιχώματα και γίνεται μικρότερος του ρυθμού παραγωγής τους. Το πρώτο όριο ανάφλεξης εξαρτάται από τις χημικές αντιδράσεις διακλάδωσης αλυσίδας αλλά και από το μέγεθος του δοχείου και τη φύση των τοιχωμάτων του. Η περαιτέρω αύξηση της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα τη διακοπή του φαινομένου της έναυσης, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαφορετική εξάρτηση των αντιδράσεων διακλάδωσης και τερματισμού αλυσίδας από την πίεση και τη θερμοκρασία. Το τρίτο όριο ανάφλεξης οφείλεται στον ανταγωνισμό των εξώθερμων χημικών αντιδράσεων, οι οποίες επιταχύνονται λόγω των συγκρούσεων μεταξύ των μορίων, που ευνοούνται από την υψηλή πίεση, και των απωλειών θερμότητας διαμέσου των τοιχωμάτων. Κοντά στο τρίτο όριο η συμπεριφορά της έναυσης υδρογονανθράκων χαρακτηρίζεται από τις αντιδράσεις οξείδωσης χαμηλής θερμοκρασίας, οι οποίες συνοδεύονται από εμφάνιση περιοδικών ψυχρών φλογών, έναυσης πολλαπλών σταδίων κ.λπ.

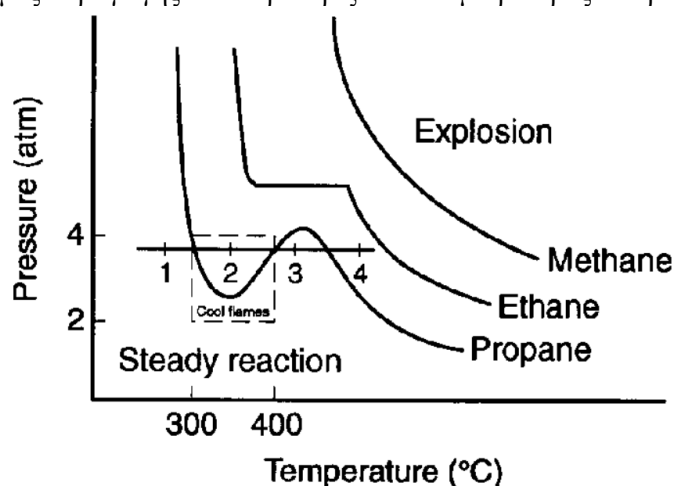
2.4.3.2. Βασικός μηχανισμός αλυσιδωτών αντιδράσεων

Οι αντιδράσεις καύσης ξεκινούν συνήθως με τη δημιουργία, σε χαμηλή θερμοκρασία, μίας ή περισσότερων εξαιρετικά αντιδραστικών χημικών ενώσεων, των ελευθέρων ριζών, οι οποίες αποτελούν το σημείο εκκίνησης για μια σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν στη δημιουργία των τελικών προϊόντων. Για τη δημιουργία των ελευθέρων ριζών απαιτείται ο χρόνος επαγωγής, που αναφέρθηκε παραπάνω. Οι αλυσιδωτές αντιδράσεις παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών του συντελεστή ρυθμού αντίδρασης και μεγάλη εξάρτηση από την πίεση και τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα ο ακριβής υπολογισμός της τάξης και του ρυθμού της συνολικής αντίδρασης να είναι δύσκολος.

Οι αλυσιδωτές αντιδράσεις χωρίζονται σε:

- Αντιδράσεις έναρξης αλυσίδας (chain initiation): στις οποίες δημιουργούνται ελεύθερες ρίζες από σταθερές ενώσεις,
- Αντιδράσεις διάδοσης αλυσίδας (chain propagation): στις οποίες ένα σταθερό μόριο αντιδρά με μια ελεύθερη ρίζα δίνοντας ένα άλλο σταθερό μόριο και μια άλλη ρίζα, και διατηρώντας το συνολικό αριθμό των ριζών σταθερό,
- Αντιδράσεις διακλάδωσης αλυσίδας (chain branching): στις οποίες μια ελεύθερη ρίζα αντιδρά με ένα σταθερό μόριο δίνοντας δύο ή περισσότερες ρίζες και επιταχύνοντας κατά πολύ τη διαδικασία της καύσης,
- Αντιδράσεις τερματισμού αλυσίδας (chain termination): στις οποίες δύο ή περισσότερες ελεύθερες ρίζες αντιδρούν δίνοντας ένα τουλάχιστον σταθερό μόριο.

Ο γενικότερος μηχανισμός καύσης σε χαμηλές θερμοκρασίες, σύμφωνα με τους Yang & Grey και πάνω στον οποίο βασίστηκαν αρκετές μελέτες, αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια, το καθένα από τα οποία έχει χαμηλότερη ενέργεια ενεργοποίησης από το προηγούμενό του. Πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία η αντίδραση του καυσίμου με το οξυγόνο οδηγεί στη δημιουργία ελεύθερων ριζών μέσω αντιδράσεων έναρξης αλυσίδας, οι οποίες στη συνέχεια καταναλώνονται μέσω της αντίδρασης τερματισμού αλυσίδας, των οποίων η ενέργεια ενεργοποίησης μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Στο στάδιο αυτό είναι δυνατόν να εμφανιστεί το φαινόμενο της ψυχρής φλόγας. Οι εξώθερμες αυτές αντιδράσεις έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και την έναρξη της καύσης υψηλής θερμοκρασίας, γεγονός που οδηγεί στην ενεργοποίηση της αντίδρασης διακλάδωσης αλυσίδας και στην αύξηση του ρυθμού παραγωγής ελεύθερων ριζών. Τέλος, η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας ενεργοποιεί τις αντιδράσεις τερματισμού της οξειδωτικής, εφόσον ο ρυθμός παραγωγής ελεύθερων ριζών είναι μικρότερος του ρυθμού κατανάλωσής τους.



Εικόνα 39: Εμφάνιση ψυχρής φλόγας ανάλογα με το καύσιμο [71]

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω η διαδικασία της οξειδωτικής είναι διαφορετική σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα οι οξειδωτικές αντιδράσεις να διαχωρίζονται σε αυτές των υψηλών ($T > 1000$ K), ενδιάμεσων ($800 \text{ K} < T < 1000 \text{ K}$) και χαμηλών θερμοκρασιών ($T < 800 \text{ K}$), με τα όρια αυτά να είναι ενδεικτικά, μιας και η περιοχή ενεργοποίησης της κάθε αντίδρασης επηρεάζεται από τις συνθήκες πίεσης και τη χημική δομή του καυσίμου. Οι ελεύθερες ρίζες που δημιουργούνται από τις αντιδράσεις υψηλών θερμοκρασιών είναι πιο αντιδραστικές από αυτές των χαμηλών θερμοκρασιών, γι' αυτό και η καύση με αρχικές συνθήκες υψηλότερης θερμοκρασίας εκτελείται και περατώνεται περισσότερο εκρηκτικά και ταχύτερα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στις αντιδράσεις οξειδωτικής υψηλών θερμοκρασιών κυριαρχούν οι ενώσεις των ελευθέρων ριζών H, HO και HO₂ με τα μόρια του καυσίμου και τη διαμόρφωση αλκυλικών ριζών, οι οποίες διακλαδίζονται σε απλούστερες. Αντίθετα, οι αντιδράσεις χαμηλής θερμοκρασίας χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία ενδιάμεσων ημι-σταθερών ενώσεων, οι οποίες, αυξανόμενης της θερμοκρασίας, οδηγούν σε αντιδράσεις διακλάδωσης, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της εξέλιξης των κινητικών φαινομένων (εκφυλισμένη διακλάδωση αλυσίδας-degenerate branching chain reactions). Ωστόσο με περαιτέρω μικρή αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρούνται αντιδράσεις αποσύνθεσης των ενώσεων-φορέων της διακλάδωσης αλυσίδας με παράλληλη ενίσχυση των αντιδράσεων τερματισμού αλυσίδας και παραγωγή αλκενίων ή κυκλικών αιθέρων ταυτόχρονα με υδροξύλιο ή υδροϋπεροξειδίο (HO₂). Είναι δυνατόν τότε να παρατηρηθεί Αρνητικός Συντελεστής Θερμοκρασίας (ΑΣΘ) του ρυθμού αντίδρασης, που είναι και η κύρια χαρακτηριστική ιδιότητα των ψυχρών φλογών.

2.4.3.3. Οξείδωση κορεσμένων υδρογονανθράκων σε υψηλές θερμοκρασίες

Η διεργασία καύσης κορεσμένων υδρογονανθράκων ακολουθεί τρία διαδοχικά βασικά στάδια χημικών αντιδράσεων:

1. Ταχεία κατανάλωση του αρχικού καυσίμου και δημιουργία ακόρεστων υδρογονανθράκων, κυρίως αλκενίων, και υδρογόνου με μικρή έως ελάχιστη έκλυση θερμότητας. Ένα πολύ μικρό μέρος του υδρογόνου οξειδώνεται σε νερό.
2. Οξείδωση των παραγόμενων ακόρεστων υδρογονανθράκων σε μονοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο. Το υδρογόνο οξειδώνεται σε νερό.

3. Οξειδωση του μονοξειδίου του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα με ταυτόχρονα μεγάλη έκλυση θερμότητας.

Η οξειδωση κορεσμένων υδρογονανθράκων μεγάλης ανθρακικής αλυσίδας ξεκινά με αντιδράσεις έναρξης αλυσίδας οι οποίες οδηγούν στην παραγωγή ελεύθερων ριζών (R' , R'') ή αλκυλίων (R) και ατόμων υδρογόνου (H). Επειδή οι δεσμοί μεταξύ ατόμων άνθρακα είναι ισχυρότεροι από τους δεσμούς ατόμων άνθρακα και υδρογόνου, οι αντιδράσεις παραγωγής μικρών αλκυλίων (R' , R'') είναι συχνότερες από αυτές παραγωγής ατομικού υδρογόνου. Από τις αντιδράσεις αυτές ωστόσο, το ατομικό υδρογόνο αντιδρά με το διαθέσιμο οξυγόνο δίνοντας ελεύθερες ρίζες OH , O και H . Όταν δημιουργηθούν οι απαραίτητες ελεύθερες ρίζες, μόρια του αρχικού καυσίμου αντιδρούν με αυτές δίνοντας αλκύλια (R) και είτε νερό, είτε υδροξύλιο (OH), είτε μοριακό υδρογόνο, είτε, σε περίπτωση αντίδρασης με μικρό αλκύλιο, αλκάνιο μικρότερης ανθρακικής αλυσίδας από το αρχικό καύσιμο, το οποίο σε μια τελική αντίδραση με υδροξύλιο θα δώσει αλκύλιο και νερό. Το στάδιο αυτό κατανάλωσης του αρχικού καυσίμου και μετατροπή του σε μίγμα ελεύθερων ριζών αλκυλίων, υδροξυλίων και υδρογόνου εξελίσσεται με αρκετά γρήγορο ρυθμό και δεν επηρεάζει ουσιαστικά το ρυθμό εξέλιξης της καύσης.

Στη συνέχεια, τα παραγμένα αλκύλια διασπώνται δίνοντας αλκένια και ατομικό υδρογόνο, είτε αλκένια (C_nH_{2n}) και μικρότερα αλκύλια, τα οποία όμως κάποτε δίνουν επίσης αλκένια και ατομικό υδρογόνο. Τα αλκένια που παράγονται είναι συνήθως μικρής ανθρακικής αλυσίδας, μιας και πολλά αρχικά μακρομόρια έχουν διασπαστεί σε μικρότερα αλκύλια ή σε μικρότερα αλκάνια κατά την πρώτη φάση παραγωγής των ριζών και πολλά αλκύλια έχουν υποβιβαστεί σε αλκύλια μικρότερου μήκους προτού καταλήξουν σε αλκένια. Αναφέρεται ότι, σύμφωνα με το μηχανισμό Lindemann, σε χαμηλές πιέσεις η παραγωγή αλκενίων και υδρογόνου εξαρτάται κυρίως από τη διάσπαση των παραφίνων και παραφινικών ριζών σε μικρότερες, ενώ σε υψηλότερες πιέσεις η παραγωγή των προϊόντων βασίζεται στην άμεση μετατροπή των αλκυλίων σε αλκένια και υδρογόνο. [74]

Τα αλκένια αυτά οξειδώνονται περαιτέρω, δημιουργώντας ενδιάμεσες ελεύθερες ρίζες, οι οποίες συντελούν στην παραγωγή CO και H_2 . Συγκεκριμένα, τα αλκένια αντιδρούν είτε με ατομικό οξυγόνο δίνοντας αλκύλιο μικρότερης ανθρακικής αλυσίδας και φορμύλιο (HCO), είτε με μοριακό οξυγόνο δίνοντας μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο. Τα αλκύλια αυτά μετατρέπονται σε αλκένια με τον πιο πάνω μηχανισμό έως ότου τελικά δώσουν μονοξείδιο του άνθρακα. Το φορμύλιο αντιδρά με υδρογόνο δίνοντας φορμαλδεϋδη (H_2CO), η οποία οξειδώνεται τελικά σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό [73].

Το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο είναι πολύ σημαντικές χημικές ενώσεις και καθοριστικές για το ρυθμό εξέλιξης της αντίδρασης. Η χημική αντίδραση οξειδωσης του CO λαμβάνει χώρα με αργό ρυθμό, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες, δίνοντας ατομικό οξυγόνο, το οποίο με την παρουσία νερού δίνει υδροξύλιο (OH). Το μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας και η μεγαλύτερη παραγωγή CO_2 γίνεται μέσω της αντίδρασης του CO με υδροξύλιο (OH), δίνοντας CO_2 και υδρογόνο. Το υδροξύλιο παράγεται κυρίως από την αντίδραση του ατομικού υδρογόνου με το μοριακό οξυγόνο δίνοντας και ατομικό οξυγόνο, το οποίο είτε στην αντίδρασή του με νερό είτε με μοριακό υδρογόνο δίνει OH . Από πειραματικά δεδομένα φαίνεται ότι ο ρυθμός παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα είναι ανάλογος με τη συγκέντρωση του CO , τη δεύτερη ρίζα της συγκέντρωσης του νερού και την τέταρτη ρίζα της συγκέντρωσης του οξυγόνου.

Το υδρογόνο που έχει παραχθεί κατά τα πρώτα στάδια μετατροπής του αρχικού καυσίμου σε αλκύλια και έπειτα σε αλκένια αντιδρά με οξυγόνο για να δώσει υδροξύλιο και ατομικό οξυγόνο σε θερμοκρασίες κοντά στους $600^\circ C$. Ωστόσο, σε χαμηλότερες πιέσεις ευεργετείται η σύνθεση μοριακού υδρογόνου και οι ελεύθερες ρίζες καταστρέφονται στα τοιχώματα. Σε λίγο μεγαλύτερες πιέσεις, το μοριακό αυτό υδρογόνο διασπάται σε ατομικό ή αντιδρά με οξυγόνο και δίνει ατομικό υδρογόνο και υδροϋπεροξείδιο, το οποίο είναι σχετικά αδρανές και καταστρέφεται σε συγκρούσεις με τα τοιχώματα, ενώ σε ακόμα υψηλότερες πιέσεις το HO_2 αντιδρά με μοριακό υδρογόνο δίνοντας υδροξύλιο και ατομικό υδρογόνο, είτε με CO , δίνοντας CO_2 και OH . Εφόσον έχει παραχθεί επαρκής ποσότητα ελεύθερων ριζών O και OH , το μοριακό υδρογόνο αντιδρά με αυτές δίνοντας ατομικό H , OH και νερό.

Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι καθ' όλη την καύση συμμετέχουν και παίζουν καθοριστικό ρόλο το υδρογόνο και το υδροξύλιο. Ωστόσο, αρχικά για την έναρξη της καύσης και τον υποβιβασμό των αλκανίων σε παραφινικές ρίζες και έπειτα σε αλκένια σημαντικότερο ρόλο παίζουν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Για την παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα από τα παραγμένα αλκένια σημαντικότερο ρόλο παίζει η επάρκεια σε οξυγόνο, ενώ, τέλος, για την καύση του μονοξειδίου CO , εφόσον αυτό έχει σχηματιστεί μη αφήνοντας υπολοιπούμενες ολεφίνες, το νερό είναι το σημαντικότερο για την επιτυχή ολοκλήρωση της διεργασίας.

2.4.3.4. Μηχανισμοί παραγωγής οξειδίων του αζώτου NO_x.

Τα άτομα αζώτου που αντιδρούν προς την παραγωγή οξειδίων προέρχονται είτε από μόρια του καυσίμου, αν αυτό περιέχει άζωτο, είτε, συνηθέστερα, από το άζωτο που περιέχεται στον αέρα. Στη συνηθέστερη αυτή περίπτωση, το NO₂ δημιουργείται από την αντίδραση του NO με το HO₂, δίνοντας υδροξύλιο, ενώ η τελική του ποσότητα δεν ξεπερνάει το 30% της τελικής ποσότητας των NO. Τα μονοξειδία δημιουργούνται μέσω τριών βασικών μηχανισμών: το θερμικό μηχανισμό (ή μηχανισμό Zel'dovich) και τον ταχύ μηχανισμό (ή μηχανισμό Fenimore).

Ο θερμικός μηχανισμός κυριαρχεί σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας στην περιοχή των καυσαερίων, οπότε το μοριακό νάτριο αρχικά αντιδρά με ατομικό οξυγόνο δίνοντας μονοξείδιο του αζώτου (NO) και ατομικό νάτριο, το οποίο στη συνέχεια αντιδρά με μοριακό οξυγόνο ή υδροξύλιο δίνοντας NO και ατομικό υδρογόνο ή οξυγόνο αντίστοιχα. Ο ρυθμός εξέλιξης του μηχανισμού καθορίζεται κυρίως από την αρχική διάσπαση του μορίου αζώτου, αντίδραση με αρκετά υψηλή ενέργεια ενεργοποίησης, και σε θερμοκρασίες άνω των 1800 K. Δευτερευόντως ο μηχανισμός αυτός εξαρτάται από την επάρκεια του μίγματος σε οξυγόνο, που αντιδρά με ατομικό άζωτο, έτσι ώστε μίγματα πτωχά σε καύσιμο και πλούσια σε αέρα να επιτρέπουν τη δημιουργία NO. Αναφέρεται ότι περίπου το 80%~95% του NO των κινητήρων είναι θερμικό.

Ο ταχύς μηχανισμός παραγωγής NO (prompt NO) είναι σημαντικός σε περιπτώσεις μίγματος πλουσίου σε καύσιμο και λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του θερμικού μηχανισμού. Εστιάζεται σε αντιδράσεις μεταξύ του αζώτου και των ελευθέρων ριζών που προέρχονται από το καύσιμο και για το λόγο αυτό εμφανίζεται σε περιοχές κοντά στη φλόγα. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται από μια πληθώρα αντιδράσεων για τις οποίες απαιτούνται ατομικό οξυγόνο και υδρογόνο καθώς και ελεύθερες ρίζες καυσίμου CH και CH₂. Ο ρυθμός εξέλιξης του μηχανισμού αυτού εντείνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αφού τότε αυξάνεται η παραγωγή ελεύθερων ριζών O, CH και CH₂.

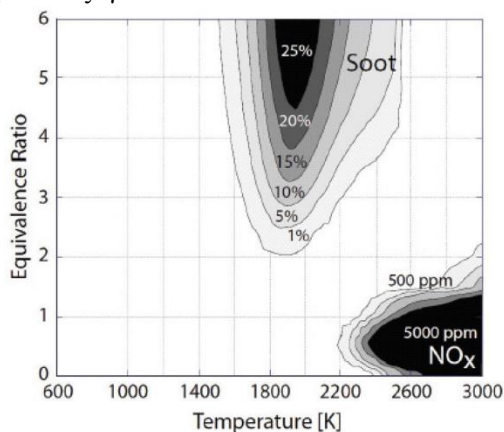
Από τα παραπάνω φαίνεται ότι οι προσπάθειες για δημιουργία συνθηκών που πιθανόν να μειώναν την παραγωγή των οξειδίων του αζώτου είναι αντικρουόμενες για τον κάθε μηχανισμό και είναι δύσκολο να προβλεφθεί ποια αλλαγή συνθήκης πίεσης ή θερμοκρασίας και τι βαθμού θα επηρέαζε θετικά την τελική παραγωγή NO. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο ποσοστό NO είναι θερμικό, οι προσπάθειες για μείωση της τελικής ποσότητας ξεκινάν από τη μείωση αυτού μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Εξάλλου, η αυξημένη θερμοκρασία τους προκαλεί μείωση της απόδοσης και καταπονεί θερμικά τα εξαρτήματα του κινητήρα.

2.4.3.5. Μηχανισμός παραγωγής σωματιδίων αιθάλης (soot)

Οι κύριες πρόδρομες ενώσεις για το σχηματισμό της αιθάλης είναι οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες που σχηματίζονται σε μίγματα πλούσια σε καύσιμο κατά τη φάση δημιουργίας αλκυλίων και αλκενίων. Οι κυκλικές ενώσεις είναι εξαιρετικά ευσταθείς, σε αντίθεση με τα μακρομόρια μη διακλαδισμένης αλυσίδας, που είναι ασταθή και αναφλέξιμα, με αποτέλεσμα να οξειδώνονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες [75]. Η διαμόρφωση πρωτογενών σωματιδίων αιθάλης προκύπτει από τη φυσική και χημική συνένωση αυτών των κυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων. Η περαιτέρω θρόμβωση των πρωτογενών σωματιδίων και ο εμπλουτισμός τους με αρωματικούς υδρογονάνθρακες έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους τους και η αφυδρογόνωσή τους την αύξηση του ποσοστού ατόμων άνθρακα στο μόριό τους. Στη συνέχεια η έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και σε περίσσεια οξυγόνου για επαρκές χρονικό διάστημα επιτρέπει την οξείδωσή τους και τη μείωση του μεγέθους τους έως την εξαφάνισή τους, εφόσον υπάρχει αρκετός χρόνος.

Η ποσότητα αιθάλης που παράγεται κατά την καύση εξαρτάται από ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, όπως η χημική δομή του καυσίμου, η συγκέντρωση του καυσίμου, η πίεση, η θερμοκρασία, ο διαθέσιμος χρόνος για την ολοκλήρωση της οξείδωσης, το επίπεδο της τυρβώδους ανάμειξης κ.α. Σε γενικές γραμμές, η δημιουργία αιθάλης ευνοείται σε μίγματα πλούσια σε καύσιμο και, αν υφίστανται ευνοϊκές συνθήκες, η ταχύτητα δημιουργίας και επέκτασή τους είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς αποκτούν διάμετρο έως και 10μm σε περίπου 10ms. Η παραγωγή των σωματιδίων συμβαίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 1200 K και 2000 K, καθώς κάτω από τους 1200 K δεν υπάρχουν αρκετές ελεύθερες ρίζες για το σχηματισμό σωματιδίων, ενώ πάνω από τους 2000 K οι ελεύθερες ρίζες οξειδώνονται. Επιπλέον, όσο πιο μικρή και ταχύστροφη είναι η μηχανή τόσο μειωμένος θα είναι ο αντικειμενικός χρόνος οξείδωσης και αυξημένο το ποσοστό τους [76]. Φαίνεται, επίσης, ότι όσο πιο γρήγορα δημιουργηθούν, τόσο περισσότερο χρόνο θα έχουν να οξειδωθούν, γεγονός που καταδεικνύει ότι μια μεγάλη καθυστέρηση έναυσης έχει αρνητικά αποτελέσματα και στην παραγωγή soot. Ωστόσο, η οξείδωσή τους μέχρι το τέλος της καύσης αυξάνει τη θερμοκρασία των καυσαερίων και πιθανώς τα θερμικά NO.

Στην προσπάθεια ταυτόχρονης μείωσης και των NO_x και των soot, έχουν αναπτυχθεί χάρτες θερμοκρασίας (T) και περιεκτικότητας καυσίμου -αέρα (φ) στους οποίους σχηματίζονται ισόποσες καμπύλες σχηματισμού NO_x και soot, όπως ο παρακάτω. Είναι σαφές ότι τα soot σχηματίζονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές περιεκτικότητες καυσίμου σε αέρα, ενώ σε πιο ψηλές θερμοκρασίες τα soot οξειδώνονται. Σε χαμηλότερες περιεκτικότητες καυσίμου στον αέρα, το οξυγόνο είναι αρκετό ώστε τα soot να μη σχηματιστούν καν. Αντίθετα, σε περιοχές με μεγάλη περιεκτικότητα σε οξυγόνο και ψηλές θερμοκρασίες η καύση συμβαίνει απότομα και με μεγάλη περιεκτικότητα σε αέρα περιβάλλοντος, ώστε το άζωτο της ατμόσφαιρας να σχηματίσει οξείδια με το οξυγόνο.



Εικόνα 40: Χάρτης T-φ παραγωγής NO_x και soot [60].

2.5. Τρόποι μείωσης NO_x

Σε γενικές γραμμές και κατά τη λειτουργία του κινητήρα οι βασικές αιτίες παραγωγής NO_x στους κινητήρες είναι η υψηλή τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης στο θάλαμο καύσης κατά τη διαδικασία της καύσης, τα αυξημένα φορτία της μηχανής, ο ακατάλληλος λόγος αέρα καυσίμου κατά την καύση, η υψηλή θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα υπερπλήρωσης στο θάλαμο καύσης, η αυξημένη θερμοκρασία του χιτωνίου του κυλίνδρου λόγω ελλιπούς ψύξης του, σχετικά ψηλή θερμοκρασία του νερού ψύξης του χιτωνίου, η κακή ποιότητα καυσίμου, κ.λπ. Με δεδομένα τα μηχανικά προβλήματα και τη γνώση της χημικής και φυσικής της καύσης έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη μεθόδων μείωσης των NO_x.

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι αρκετοί και διακρίνονται στις προσπάθειες μείωσης παραγωγής τους και σε αυτές μείωσης του ποσοστού τους στα εκπεμπόμενα καυσαέρια εφόσον αυτά έχουν παραχθεί. Η διακοπτόμενη έγχυση καυσίμου, που είναι και το βασικό θέμα της παρούσας εργασίας, είναι μια μέθοδος μείωσης NO_x, που ανήκει στην πρώτη κατηγορία, και θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο. Η βασική ανάλυση της φυσικής και χημικής κινητικής της καύσης, που έγινε παραπάνω, αλλά και το σύνολο των μελετών που γίνονται στο θέμα της μείωσης των NO_x βοηθούν στην πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς του ζητήματος και των παραγόντων που το επηρεάζουν. [117]

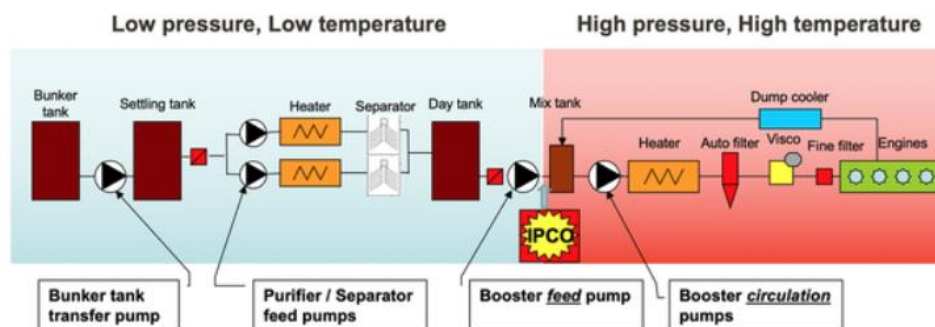
2.5.1. Εισαγωγή νερού στο θάλαμο καύσης

Η εισαγωγή νερού στο θάλαμο καύσης αποσκοπεί στη βελτίωση της θερμικής απόδοσης της καύσης, στη μείωση των παραγόμενων ρύπων και στην καλύτερη εσωτερική ψύξη του κινητήρα. Η αυξημένη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας που απορροφά το νερό κατά την ατμοποίησή του έχει σαν αποτέλεσμα μια μειωμένη έκλυση θερμότητας κατά την καύση και κατά συνέπεια την τοπική μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης. Η μειωμένη μέγιστη θερμοκρασία έχει, με τη σειρά της, σαν αποτέλεσμα τη μείωση των παραγόμενων θερμικών NO_x. Παράλληλα η αυξημένη συγκέντρωση νερού επιταχύνει τις αντιδράσεις οξείδωσης CO σε CO₂ μέσω της παραγωγής OH και η μείωση των NO_x εντείνεται. Η καθυστέρηση της καύσης, που προκαλείται λόγω της απορρόφησης θερμότητας από το νερό και τη μειωμένη θερμοκρασία, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου προανάμειξης του καυσίμου και την επίτευξη τελειότερης καύσης. Με τον τρόπο αυτό, η μειωμένη ενέργεια λόγω της κατώτερης θερμογόνου αξίας του καυσίμου αντισταθμίζεται, ενώ το μειονέκτημα της αυξημένης τιμής της μέγιστης πίεσης λόγω της καθυστερημένης καύσης προανάμειξης παραμένει, αλλά δε θεωρείται αποτρεπτικό.

Η εισαγωγή του νερού στο θάλαμο καύσης μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους: την εισαγωγή του στο καύσιμο και τη δημιουργία γαλακτώματος καυσίμου, την εισαγωγή του στον αέρα καύσης ή την άμεση έγχυσή του στο θάλαμο καύσης με ειδικό εγχυτήρα. [87]

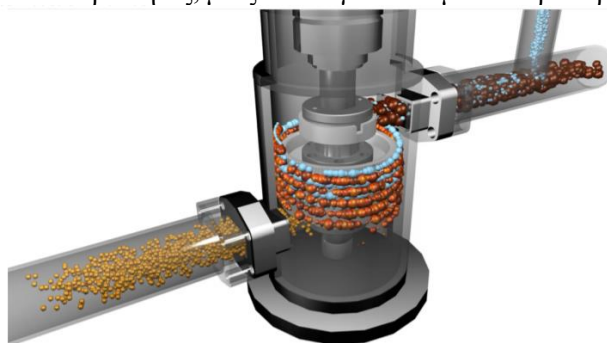
2.5.1.1. Γαλακτωματοποίηση καυσίμου /Water-In-Fuel Emulsion (WIF)[87]

Η μέθοδος γαλακτωματοποίησης του καυσίμου έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί κάποια τροποποίηση στη λειτουργία ή τα μηχανικά στοιχεία της μηχανής και η τροποποίηση του καυσίμου βαραίνει τους προμηθευτές του. Παρενθετικά αναφέρεται ότι αυτό είναι θετικό από την πλευρά της ναυτιλίας, δεδομένου ότι δεν απαιτούνται επιπλέον έξοδα για την εφαρμογή της μεθόδου, είναι όμως και περιοριστικό, μιας και η παραγωγή και η προμήθεια τέτοιων καυσίμων είναι σχετικά απαιτητική και δεν προωθείται από τους προμηθευτές καυσίμων. Παρότι έχει αποδειχθεί ότι τα γαλακτώματα καυσίμων είναι αποδοτικά και ευεργετικά για την καύση, η παραγωγή τους είναι απαιτητική και θα άλλαζε τις ισορροπίες της οικονομίας. Στην περίπτωση που η γαλακτωματοποίηση συμβαίνει εν ώρα λειτουργίας απαιτείται εξοπλισμός για τη μηχανική ανάδευση καυσίμου και νερού, η οποία δε δεσμεύει πολύ χώρο, αλλά και η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων φρέσκου νερού με μέσα αφαλάτωσης.



Εικόνα 41: Σύστημα έγχυσης γαλακτώματος καυσίμου [89].

Το γαλάκτωμα καυσίμου αποτελείται από δύο υγρές φάσεις που δεν αναμιγνύονται μεταξύ τους και η μία βρίσκεται διασκορπισμένη, υπό μορφή σφαιρικών σταγονιδίων, στην έκταση της άλλης. Ο διασκορπισμός και η ανάμιξη των δύο υγρών γίνεται με μεθόδους υψηλής ενέργειας υπό την παρουσία ουσιών που επηρεάζουν τις επιφανειακές ιδιότητές τους και περιλαμβάνουν: μηχανική ανάδευση, ομογενοποίηση σε υψηλές πιέσεις και υπερηχητικές ταλαντώσεις, με τις τελευταίες να μην είναι ευνοϊκές για τη μείωση των NO_x συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Τα γαλακτώματα καυσίμων είναι αρκετά ασταθή θερμοδυναμικά συστήματα, καθώς μετά από κάποια χρονική περίοδο, σταγονίδια της ίδιας υγρής φάσης συγκρουόμενα μεταξύ τους συνενώνονται, δημιουργούν θρομβώσεις και τελικά το κάθε υγρό δημιουργεί μεγάλους ενιαίους όγκους. Προκειμένου το καλά αναδευμένο γαλάκτωμα να διατηρήσει τα μικρά σταγονίδια καθ' όλο τον όγκο του, τοποθετούνται ουσίες που μειώνουν την επιφανειακή τάση μεταξύ καυσίμου και νερού. Μη-ιοντικές τέτοιες ουσίες κάνουν, επιπλέον, το καύσιμο λιγότερο διαβρωτικό και ανθεκτικό στην ψύξη. Η εξαιρετικά μεγάλη σημαντικότητα της διατήρησης της λεπτής διασποράς του νερού σε όλη την έκταση του καυσίμου, προκειμένου η μηχανή να λειτουργήσει χωρίς βλάβες, είναι και ο αποτρεπτικός παράγοντας για την ευρεία υιοθέτηση της μεθόδου αυτής. Ωστόσο, στην περίπτωση χρήσης αναδευτήρα εν ώρα λειτουργίας, τέτοιες επιφανειοδραστικές ουσίες δεν είναι απαραίτητες, μιας και το γαλάκτωμα δεν προλαβαίνει να διαχωριστεί. [91]



Εικόνα 42: Γαλακτωματοποιητής καυσίμου [89].

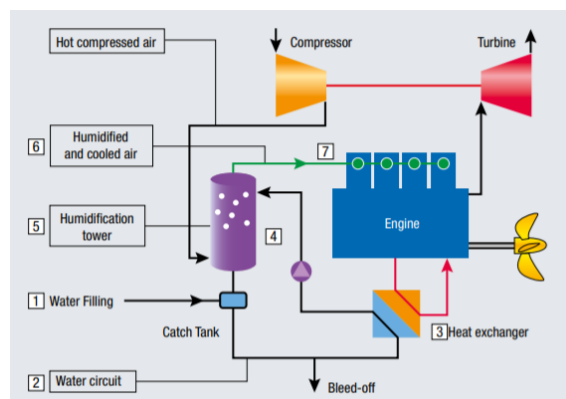
Το βασικό χαρακτηριστικό και πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, που τη διαχωρίζει από τις άλλες της κατηγορίας της, είναι η διενέργεια μικρο-εκρήξεων κατά την ατμοποίηση των σταγονιδίων του νερού. Το νερό

φτάνει στο στάδιο υπερθέρμανσής του πιο γρήγορα από το καύσιμο, με αποτέλεσμα η απότομη αεριοποίησή του να υποβοηθά το διασκορπισμό του καυσίμου και τη δημιουργία μικρών σταγονιδίων εντός του αέρα καύσης. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, μια λεπτή διασπορά του καυσίμου στον αέρα καύσης και σε όλη την έκταση του θαλάμου οδηγεί σε μια τελειότερη καύση με υψηλότερη απόδοση. Σαφώς, όσο λεπτότερος είναι ο διασκορπισμός του νερού στο αρχικό γαλακτώμα, τόσες περισσότερες και ευρέως διασκορπισμένες θα είναι οι εκρήξεις κατά την καύση και τόσο καλύτερη η ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα καύσης. Ωστόσο υπάρχει ένα κάτω όριο στο ιδανικό μέγεθος των σταγονιδίων νερού, αφού μικρότερα σταγονίδια προκαλούν και εκρήξεις μικρότερης έντασης. [88]

Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση γαλακτώματος καυσίμου μπορεί να επιφέρει έως και 45% μείωση των εκπεμπόμενων NO_x , λόγω της μειωμένης θερμοκρασίας στο θάλαμο καύσης, και την εκτεταμένη παραγωγή OH , εξαιτίας της παρουσίας νερού. Το ποσοστό μείωσης NO_x δεν είναι αρκετά μεγάλο για να εξυπηρετήσει τους σκοπούς των πιο πρόσφατων κανονισμών, ωστόσο, η μέθοδος αυτή σε συνεργασία με μια πιλοτική έγχυση καθαρού καυσίμου προ της έγχυσης γαλακτώματος, που βοηθάει την έναυση του γαλακτώματος και μειώνει την καθυστέρηση της έναυσης, έχει δώσει εξαιρετικά αποτελέσματα [90]. Επιπλέον πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η υψηλή μείωση της περιεκτικότητας των καυσαερίων σε σωματίδια αιθάλης έως και 81% εξαιτίας της καλύτερης ανάμιξης του καυσίμου λόγω των μικρο-εκρήξεων. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αμφιλεγόμενη επίδρασή της στην ισχύ και το έργο της μηχανής, στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, καθώς και στην παραγωγή CO και HC . Προσπάθειες έχουν γίνει για την επίτευξη των στόχων Tier III με συνδυασμό έγχυσης γαλακτώματος και πιλοτικής έγχυσης [90]. Παρότι οι περισσότερες μελέτες κλίνουν σε θετικά συμπεράσματα σχετικά με την ισχύ και την ειδική κατανάλωση, τα μη εγγυημένα αποτελέσματα αποτρέπουν τη ναυτιλία από την υιοθέτησή της.

2.5.1.2. Χρήση υγρού αέρα υπερπληρώσεως/Humid Air Motor (HAM) [85][86]

Κατά τη μέθοδο αυτή ο αέρας του υπερπληρωτή, πριν την είσοδό του στο θάλαμο καύσης, αναμιγνύεται και κορεννύεται με ατμό. Ο ατμός αυτός προέρχεται από θαλασσινό νερό, το οποίο θερμαίνεται με χρήση θερμότητας από το νερό ψύξης του κινητήρα, τα καυσαέρια και, κυρίως, τον αέρα υπερπληρώσεως, προτού αυτός αναμιχθεί με τον ατμό. Ο αέρας υπερπληρώσεως, μετά τον υπερπληρωτή διέρχεται από το κελί ψύξης του, που εκτός από τη θέρμανση του θαλασσινού νερού βοηθάει και στον κορεσμό της υγρασίας που υπάρχει στην ποσότητά του από το περιβάλλον. Κατά την ένωση του αέρα με τον ατμό, τα δύο στοιχεία αναμιγνύονται με διάχυση και ο αέρας απορροφά τους ατμούς. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία του αέρα υπερπλήρωσης, τόσο μεγαλύτερη και ποσότητα ατμών που μπορεί να απορροφήσει. Το εναπομένον αλάτι απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα, ενώ στη συνέχεια το μίγμα αέρα ατμών διέρχεται και από φίλτρο που δεσμεύει πιθανά σταγονίδια υγρασίας, ούτως ώστε ούτε αλάτι, ούτε σταγονίδια να εισέλθουν στο θάλαμο καύσης.



Εικόνα 43: Σύστημα έγχυσης υγρού αέρα καύσης [86]

Με τη μέθοδο αυτή μειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης, που είναι και η κύρια αιτία παραγωγής θερμικών NO_x , καθώς με την εισαγωγή νερού στον αέρα επιτυγχάνεται αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του μίγματος, με αποτέλεσμα επίτευξη μικρότερης θερμοκρασίας για την έκλυση ίδιου ποσού θερμότητας και ενέργειας. Έτσι, επιτυγχάνεται μείωση της παραγωγής NO_x έως και 40% χωρίς τη χρήση θερμότητας από το ψυκτικό υγρό της μηχανής ή των καυσαερίων και έως 65% με τη χρήση τους. Η αρχή κατά την οποία το νερό βοηθάει στη μείωση της παραγωγής NO_x είναι παρόμοια με αυτή της μεθόδου γαλακτωματοποίησης του καυσίμου, με τη διαφορά ότι σε τούτη τη μέθοδο η ποσότητα του νερού που εισάγεται στο θάλαμο καύσης είναι μεγαλύτερη, ενώ δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στο χρονοισμό της

έγχυσης. Δευτερεύοντα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι το μειωμένο κόστος λόγω χρήσης άφθονου θαλασσινού νερού, η ευκολία εφαρμογής του μηχανισμού, η μειωμένη κατανάλωση ελαίου λίπανσης, η λειτουργία του σε συνεργασία με ένα εύρος καυσίμων χαμηλής και υψηλής περιεκτικότητας σε θείο και τα μικρά κόστη συντήρησης. Σαν μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι η θερμότητα της μηχανής που χρησιμοποιείται για την ατμοποίηση του θαλασσινού νερού αφαιρείται από αυτή που προορίζεται για θέρμανση νερού για άλλες χρήσεις στο πλοίο, το υψηλό αρχικό κόστος του μηχανισμού καθώς και η σύζευξή του με τη μηχανή. Ο μηχανισμός αυτός εισήχθη στην αγορά το 1999 με την τοποθέτησή του σε ένα πλοίο, και το 2001 σε άλλα τρία, και μετρά πάνω από 100,000 ώρες λειτουργίας. Το υψηλό αρχικό του κόστος ωστόσο και η μικρή δειγματοληψία αποτελεσμάτων της λειτουργίας του δυσκολεύουν την πρόβλεψη και την εγγύηση της οικονομικής του επιτυχίας, με αποτέλεσμα την περιορισμένη υιοθέτησή του από τους παγκόσμιους στόλους.

2.5.1.3. Άμεση έγχυση νερού/Direct Water Injection (DWI)

Η μέθοδος της άμεσης έγχυσης καυσίμου στο θάλαμο καύσης υλοποιείται με έναν δεύτερο εγχυτήρα στην κεφαλή του κυλίνδρου, είτε με μια δεύτερη βαλβίδα έγχυσης στον ψεκαστήρα καυσίμου. Η απαίτηση για μια τόσο ριζική αλλαγή στο σύστημα έγχυσης, που ουσιαστικά συνιστά αλλαγή της μηχανής και χρήση υλικών ανθεκτικότερων στη διάβρωση, αλλά και την τοποθέτηση αντλίας νερού υψηλής πίεσης, είναι εμπόδιο όχι μόνο στην ευρεία υιοθέτηση της μεθόδου, αλλά και στη διεξαγωγή έρευνας και πειραμάτων για περαιτέρω εξέλιξή της. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυνατότητα έγχυσης μεγαλύτερης ποσότητας νερού στο θάλαμο καύσης και η έγχυσή του με ρυθμιζόμενο χρονισμό, ανεξάρτητα από την έγχυση του καυσίμου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να γίνει έγχυση νερού ακριβώς τη χρονική στιγμή αύξησης της θερμοκρασίας, ώστε η μέγιστη θερμοκρασία του θαλάμου να είναι μειωμένη και αντίστοιχα και το ποσοστό παραγόμενων θερμικών NOx. Η ρίψη νερού στον προθερμασμένο θάλαμο προκαλεί την ταχεία και απότομη ατμοποίησή του αυξάνοντας την πίεση και το αποδιδόμενο έργο και ψύχοντας τα εξαρτήματα της μηχανής. Ωστόσο, κάποιες μελέτες έχουν δείξει ότι η ρίψη νερού προ του άνω νεκρού σημείου ANΣ, με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας, επιφέρει μεγαλύτερη μείωση των NOx, παρά την πιθανή αύξηση καθυστέρησης της έναυσης. [93][95] Η Wartsila, που είναι και η μόνη κατασκευαστική εταιρεία που υποστηρίζει ένα τέτοιο σύστημα, αναφέρει ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση των NOx έως και 50-60% σε υψηλά φορτία με μικρή αύξηση στην ειδική κατανάλωση, ενώ σε χαμηλότερα φορτία μελέτες δείχνουν ότι η ειδική κατανάλωση δεν αυξάνεται. Πειραματική λειτουργία συστήματος άμεσης έγχυσης έγινε πρώτη φορά σε πλοίο το 1999. Σχετικά με τη μείωση των σωματιδίων αιθάλης τα αποτελέσματα είναι απογοητευτικά συγκριτικά με τη χρήση γαλακτωμάτων καυσίμων. [94] Φαίνεται ότι αυτή η μέθοδος δεν μπορεί μόνη της να καλύψει τις απαιτήσεις της εποχής, ωστόσο σε συνεργασία με σύστημα EGR τα αποτελέσματά της είναι ευοίωνα. [92]

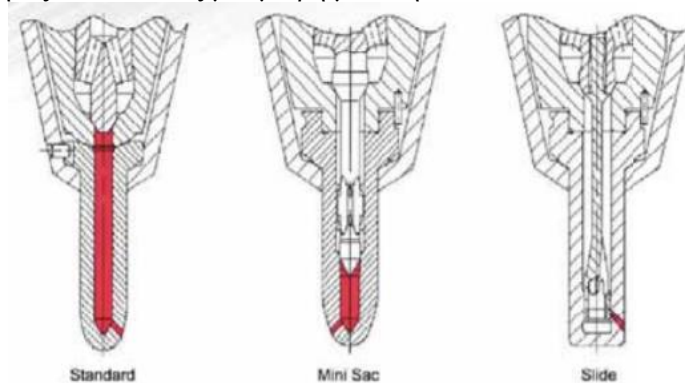
2.5.2. Τροποποιήσεις στο εσωτερικό της μηχανής/Internal Engine Modifications(IEM)

Οι τροποποιήσεις που μπορούν να γίνουν στο εσωτερικό και στη λειτουργία των κινητήρων προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές NOx είναι αρκετές, με τις περισσότερες να αποσκοπούν είτε στη βελτίωση της καύσης, στη γεωμετρία του θαλάμου καύσης, στο βαθμό συμπίεσης της καύσης, στο στροβιλισμό του μίγματος, είτε στην καλύτερη πλήρωση του θαλάμου με αέρα καύσης μέσω βελτιστοποιήσεων των ψυκτικών μέσων του αέρα υπερπληρώσεως, είτε στη βελτίωση της έγχυσης του καυσίμου με αύξηση της πίεσης του καυσίμου, βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των ακροφυσίων, έλεγχο του ρυθμού της έγχυσης του καυσίμου και της βαλβίδας καυσαερίων μέσω ηλεκτρονικού κυκλώματος και συστήματος CRS. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η εκτεταμένη μελέτη που απαιτείται για την εφαρμογή τους σε κάθε μηχανή ξεχωριστά και η δυσκολία εφαρμογής τους σε ήδη υπάρχουσες και εγκατεστημένες μηχανές.

2.5.2.1. Βαλβίδες Ολίσθησης/Slide Valves

Οι βαλβίδες ολίσθησης είναι μια προσπάθεια μείωσης της διαρροής καυσίμου προς το θάλαμο καύσης όταν η έγχυση έχει θεωρητικά τελειώσει. Οι συμβατικές βαλβίδες διαθέτουν έναν μικρό σωλήνα, που εκτείνεται από τη βαλβίδα έγχυσης έως το ακροφύσιο εισαγωγής στο θάλαμο καύσης. Ο σωλήνας αυτός είναι γεμάτος με καύσιμο, το οποίο, μετά το θεωρητικό πέρας της έγχυσης, σταλάζει στο θάλαμο καύσης σταγόνες καυσίμου, που, είτε δεν καίγονται εύκολα διαβρέχοντας τα εξαρτήματα της μηχανής, μιας και η θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης δεν είναι ακόμα αρκετά υψηλή, είτε σταλάζουν στο θάλαμο κατά την εκτόνωση, οπότε καίγονται αυξάνοντας τη θερμοκρασία και την παραγωγή NOx. Σε κάθε περίπτωση η ειδική κατανάλωση

καυσίμου είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη. Ο σχεδιασμός των βαλβίδων ολίσθησης αποσκοπεί στη μείωση του όγκου αυτού του σωλήνα και συνεπώς στον εκμηδενισμό του όγκου καυσίμου που κινδυνεύει να στάξει απρογραμματίστα στο θάλαμο καύσης. Η χρήση βαλβίδων ολίσθησης έχει σαν αποτέλεσμα και τη μείωση της έκλυσης θερμότητας και συνεπώς μια μικρή μείωση των NO_x .



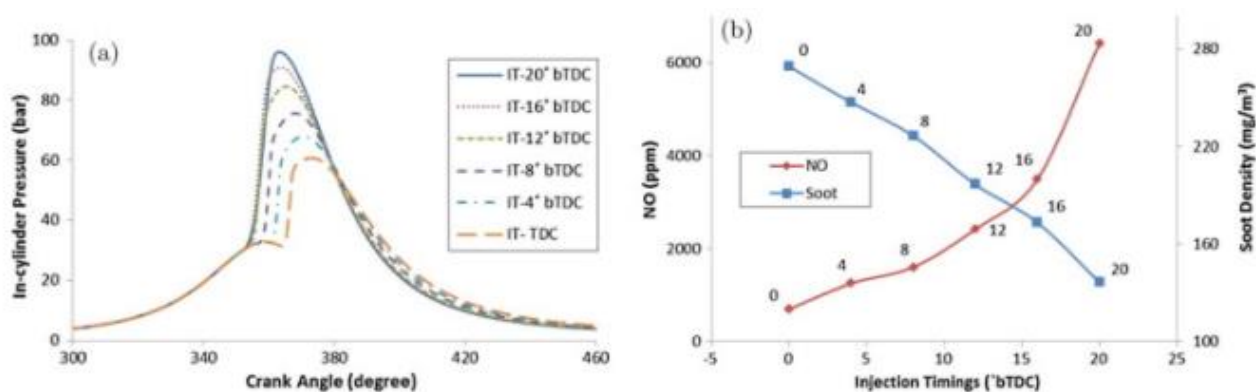
Εικόνα 44: Βαλβίδα ολίσθησης [96]

Το μεγάλο πλεονέκτημα των βαλβίδων ολίσθησης είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, με τη μείωση των NO_x να αποτελεί παράπλευρο πλεονέκτημα. Ωστόσο, η ευρεία αποδοχή και χρήση τέτοιων βαλβίδων από το 2000 και μετά ήγειρε νέες μελέτες για τον καλύτερο σχεδιασμό των βαλβίδων με επίκεντρο τη μείωση των NO_x . Οι κατασκευαστικές εταιρείες υιοθέτησαν τη χρήση ακροφυσίων με περισσότερες τρύπες, για καλύτερη διασπορά του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, και με έγχυση σε κατάλληλη γωνία, ώστε να αποφεύγεται η διαβροχή της κεφαλής του πιστονιού ή των τοιχωμάτων του κυλίνδρου, φαινόμενο που προκαλεί καθυστέρηση στην έναυση και τελικά απότομη και κρουστική καύση με καταπόνηση των εξαρτημάτων της μηχανής. Τα ακροφύσια αυτά, σχεδιασμένα να αυξάνουν την περιδίνηση του μίγματος, μειώνουν τη συγκέντρωση του καυσίμου στο σημείο της έγχυσης και μειώνουν τη μέγιστη τοπική θερμοκρασία.

Η χρήση τέτοιων βαλβίδων είναι εξαιρετικά διευρυμένη από το 2000 και ύστερα, μιας και η αλλαγή των ακροφυσίων και η τοποθέτηση των βαλβίδων είναι εύκολη και δε χρειάζεται να γίνει καν σε περίοδο dry dock του πλοίου, ενώ οι νέες μηχανές κατασκευάζονται εξ αρχής με τις νέες βαλβίδες. Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι με τη χρήση τέτοιων βαλβίδων και ακροφυσίων μπορεί να επιτευχθεί μείωση των NO_x έως κι 30% [97], ποσοστό που δεν καλύπτει τους νέους κανονισμούς, ενώ μειωμένα φαίνονται τα αποτελέσματα σε περίπτωση λειτουργίας της μηχανής σε χαμηλά φορτία [98]. Η χρήση τους ωστόσο είναι σίγουρα υποβοηθητική στην αποτελεσματικότητα άλλων μεθόδων και γενικότερα στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της μηχανής.

2.5.2.2. Καθυστερημένη έγχυση/Retarded Injection

Η έγχυση του καυσίμου που ξεκινάει σε γωνία στροφάλου ύστερη από αυτή της συμβατικής έγχυσης ήταν μια μέθοδος ευρεία διαδεδομένη μεταξύ των ετών 1987-1998 στην προσπάθεια μείωσης των NO_x . Όταν το καύσιμο εγχέεται σχετικά νωρίς, η θερμοκρασία είναι χαμηλή και ο χρόνος καθυστέρησης της έναυσης αυξάνεται, με αποτέλεσμα την καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου και τη μετέπειτα κρουστική καύση του με αυξημένη πίεση, θερμοκρασία και παραγωγή NO_x . Η καλύτερη ανάμιξη που προκαλεί η καθυστέρηση της έναυσης έχει επίσης σαν αποτέλεσμα τη νωρίτερη εμφάνιση της μέγιστης πίεσης και συνεπώς τη διεύρυνση της χρονικής περιόδου κατά την οποία τα καυσαέρια βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Με την καθυστέρηση της έγχυσης, μειώνεται ο χρόνος καθυστέρησης έναυσης, η έναρξη της καύσης συμβαίνει σε σχετικά χαμηλή πίεση, η μέγιστη θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής σε αυτή μειώνονται, όπως ομοίως και τα NO_x . Η μέθοδος αυτή μπορεί να επιφέρει μείωση των NO_x έως και 30%, ωστόσο, όταν δε συνδυάζεται με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης της καύσης, παρουσιάζει αύξηση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και στα σωματίδια αιθάλης, λόγω της ελλιπούς ανάμιξης καυσίμου-αέρα. [99]



Εικόνα 45: Εξάρτηση ρύπων από την έναρξη της έγχυσης [103].

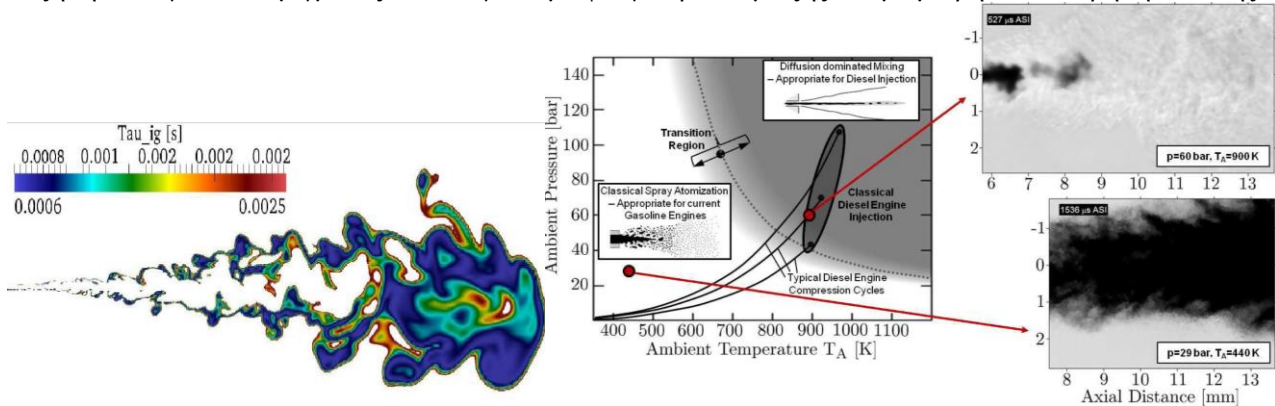
Το μεγάλο αυτό μειονέκτημα οδήγησε σε περισσότερες μελέτες, που σχετίζονται με το χρονισμό της έγχυσης και πυροδότησε τις μελέτες της επίδρασης της διακοπόμενης έγχυσης στην καύση. Αρχικά έγιναν προσπάθειες μείωσης της ειδικής κατανάλωσης και της καθυστέρησης έναυσης μέσω της αύξησης του συντελεστή συμπίεσης και της αύξησης της πίεσης του εγχυόμενου καυσίμου. Επιπροσθέτως επιχειρήθηκε η αύξηση της πίεσης του αέρα υπερπληρώσεως, η μείωση της διαμέτρου των οπών των ακροφυσίων, η μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω τριβών, η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα καύσης, κ.λπ. [101] Τελικά, μια μείωση κατά 30% στα NO_x χωρίς την αύξηση στην ειδική κατανάλωση φαίνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί, εφόσον η διάρκεια της έγχυσης είναι μικρή, ούτως ώστε η καύση να είναι τοποθετημένη σε κατάλληλο σημείο του κύκλου και η απόδοση να είναι αυξημένη. [100] Η καθυστερημένη έγχυση δεν αποτελεί πλέον βασική μέθοδο μείωσης των NO_x , σε συνδυασμό όμως με έναν αυξημένο συντελεστή συμπίεσης και μια αυξημένη θερμοκρασία αέρα καύσης στην αρχή της έγχυσης, που μειώνουν την καθυστέρηση έναυσης, ένας λεπτός διασκορπισμός σταγονιδίων καυσίμου, ένα πρώιμο κλείσιμο των βαλβίδων εισαγωγής (Miller timing) αλλά και με μεθόδους έγχυσης νερού κ.α., μπορεί να επιτύχει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

2.5.2.3. Αυξημένη πίεση έγχυσης καυσίμου/High-pressure of Fuel Injection

Η αυξημένη πίεση του καυσίμου κατά την έγχυση οδηγεί στη μείωση της περιόδου της έγχυσης και στην αύξηση της ταχύτητας του καυσίμου κατά την είσοδό του, εφόσον θεωρηθεί ότι η συνολική ποσότητα έγχυσης είναι σταθερή. Η μέθοδος αυτή έχει καλά αποτελέσματα όταν συνδυαστεί με καθυστέρηση στην έναρξη της έγχυσης. Η καθυστέρηση της έναρξης της έγχυσης έχει το πλεονέκτημα της ανάπτυξης μειωμένης θερμοκρασίας και NO_x , ενώ ταυτόχρονα ο χρόνος παραμονής σε υψηλές θερμοκρασίες καύσης είναι περιορισμένος. Υπάρχει ωστόσο και το μειονέκτημα της ατελούς καύσης, λόγω της κακής ανάμιξης του καυσίμου. Το μειονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται με τη μέθοδο αυξημένης πίεσης έγχυσης, η οποία προκαλεί ακαριαία την ατμοποίηση του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με κατάλληλα ακροφύσια διασκορπισμού, διασκορπίζοντας τη φλόγα και επιταχύνοντας την καύση. Ταυτόχρονα, η αυξημένη πίεση του καυσίμου αλλά και το πρώιμο πέρας της έγχυσης μειώνει κι άλλο την καθυστέρηση της έναυσης, τοποθετώντας την καύση σε αποδοτικό σημείο του κύκλου. Η μικρή διάρκεια της έγχυσης και η ταχύτητα ατμοποίησης έχουν σαν αποτέλεσμα την απότομη καύση και την ακόμα μικρότερη παραμονή του μίγματος σε υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγωγή NO_x έως και 35%. Για την αποφυγή της κρουστικής έναυσης συνήθως λαμβάνει χώρα και μια προ-έγχυση (pilot injection) για τη σταδιακή αύξηση της πίεσης. [102]

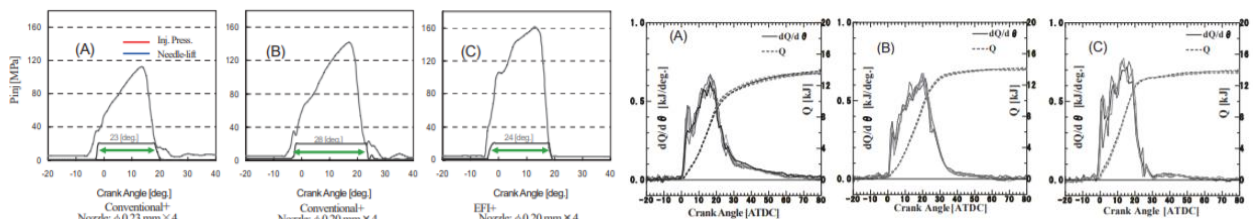
Αναφέρεται ότι, στην περίπτωση έγχυσης υψηλής πίεσης, ο διασκορπισμός του καυσίμου δεν ακολουθεί τις διεργασίες του πρωτεύουσας και δευτερεύουσας διάσπασης σε μικρότερα σταγονίδια και έπειτα της εξάτμισης του καυσίμου. Σε υψηλές πιέσεις η επιφανειακή τάση εκμηδενίζεται, καθώς η αλληλεπίδραση των μορίων της υγρής και της αέριας φάσης στη διεπιφάνειά τους γίνονται συμμετρικές. Η προκύπτουσα δύναμη προς το υγρό γίνεται ίση με αυτή προς το αέριο και η διάσπαση καταστέλλεται. Η ανάμειξη του πυκνού καυσίμου με τον αέρα συνεπώς βασίζεται κυρίως στην τύρβη, ενώ βασικό ρόλο παίζουν και οι υψηλές παράγωγοι μεταβολής της πυκνότητας κατά τον όγκο του μίγματος, που καταδεικνύουν την κυριαρχία φαινομένων διάχυσης. Το μίγμα σε αυτή την περίπτωση λαμβάνει τη μορφή πυκνού jet μη-διαχωρισμένης υγρής-αέριας φάσης και όχι σταγονιδίων καυσίμου διασκορπισμένων στην αέρια φάση. Κατά τον όγκο του μίγματος παρουσιάζονται υπερκριτικές περιοχές πίεσης λόγω της μείωσης της ταχύτητας του ήχου σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και της υψηλής ταχύτητας του καυσίμου. Η συμπίεστικότητα του μίγματος, που προκαλείται, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κυμάτων πίεσης που αποσταθεροποιούν το εγχέομενο

καύσιμο και το αναμιγνύουν με τον αέρα καύσης. Στην έκταση του jet διακρίνονται δύο μηχανισμοί ανάμιξης. Ο πυκνός πυρήνας έχει μεγάλη διαφορά πυκνότητας με την αέρια φάση, με αποτέλεσμα να εντείνονται τα φαινόμενα διάχυσης και η ανάμιξη του καυσίμου, καθώς η υγρή συμπιεζόμενη φάση αποκόβεται από τον κεντρικό υγρό πυρήνα και κινούμενη ταχύτατα στην αέρια φάση αυξάνει το επίπεδο της τύρβης στο θάλαμο. Μακρύτερα από τον κεντρικό πυκνό πυρήνα η πυκνότητα και η ταχύτητα του καυσίμου μειώνεται, τα υπερηχητικά φαινόμενα ροής πυκνής υγρής φάσης σε αέρια φθίνουν, και η ανάμιξη ακολουθεί τις πιο συμβατικές αρχές της υποηχητικής ροής αέριας φάσης σε αέρια. Η ανάμιξη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του μίγματος που καίγεται με φλόγα προανάμιξης και με μικρή καθυστέρηση έναυσης.



Εικόνα 46: Jet καυσίμου υψηλής πίεσης [104].

Η συνδυασμένη χρήση ακροφυσίων μικρής διαμέτρου και συστήματος έγχυσης ηλεκτρονικά ελεγχόμενου καυσίμου φέρει τα καλύτερα αποτελέσματα, μιας και είναι εφικτό να ρυθμιστεί η αυξημένη πίεση της έγχυσης και το πέρας της έγχυσης ώστε η καύση να περατωθεί το συντομότερο δυνατό με αυξημένη αποδοτικότητα και μικρή παραγωγή NO_x, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Η συμβατική έγχυση (A) έχει χαμηλό ρυθμό έκλυσης θερμότητας που περατώνεται νωρίς, με αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγωγή NO_x, λόγω σύντομης έκθεσης των καυσαερίων σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και την αυξημένη ειδική κατανάλωση, λόγω μικρού εμβαδού ρυθμού έκλυσης θερμότητας, καθώς και την αυξημένη παραγωγή soot λόγω της κακής διασποράς του καυσίμου. Η συμβατική έγχυση με μειωμένη διάμετρο ακροφυσίων (B) έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης έγχυσης αλλά και της διάρκειας της έγχυσης. Το εμβαδό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας αυξάνεται μειώνοντας την ειδική κατανάλωση, αυξάνεται όμως και η διάρκεια αυξημένης έκλυσης θερμότητας και συνεπώς η παραγωγή NO_x. Η ηλεκτρονικά ελεγχόμενη έγχυση με μειωμένη διάμετρο ακροφυσίων τέλος (C), έχει σαν αποτέλεσμα την αυξημένη πίεση έγχυσης και τη μειωμένη διάρκεια έγχυσης με την οποία επιτυγχάνεται αυξημένη έκλυση θερμότητας και μειωμένη ειδική κατανάλωση. Η παραγωγή NO_x είναι αμφίροπη μιας και οι θερμοκρασίες στο θάλαμο είναι εξαιρετικά υψηλές, όμως ο χρόνος παραμονής σε αυτές είναι χαμηλός.



Εικόνα 47: Συγκριτικά αποτελέσματα NO_x και έκλυσης θερμότητας σε συμβατική (A), συμβατική με αυξημένη ταχύτητα (B) και ηλεκτρονική έγχυση υψηλής πίεσης (C) [105].

2.5.2.4. Αυξημένος συντελεστής συμπίεσης/Increased Compression Ratio

Αύξηση του συντελεστή συμπίεσης μπορεί να επιτευχθεί είτε με υπερπλήρωση του θαλάμου καύσης με αέρα αυξημένης πίεσης, ώστε να επιτυγχάνεται αύξηση της μέγιστης πίεσης του κυλίνδρου, είτε με την αύξηση του ύψους του κυλίνδρου και της διαδρομής του εμβόλου, ώστε ο πραγματικός συντελεστής συμπίεσης να είναι αυξημένος [111]. Στην τελευταία περίπτωση είναι σημαντική η μικρή ταχύτητα κίνησης του εμβόλου, προκειμένου να υπάρχει αρκετός χρόνος για την επαρκή ανταλλαγή των αερίων της καύσης. Με την αύξηση του συντελεστή συμπίεσης επιτυγχάνονται αυξημένες πιέσεις και θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης και συνεπώς, παρότι η απόδοση αυξάνεται, ταυτόχρονα αυξάνονται και τα NO_x. Μείωση των NO_x με

ταυτόχρονη μείωση της ειδικής κατανάλωσης κατά την αύξηση του συντελεστή συμπίεσης μπορεί να επιτευχθεί σε συνδυασμό με μια καθυστερημένη έναρξη έγχυσης καυσίμου και ενός αυξημένου ρυθμού έγχυσης. Ο αυξημένος συντελεστής συμπίεσης μειώνει την καθυστέρηση έναυσης και αυξάνει την πίεση και τη θερμοκρασία της καύσης αντισταθμίζοντας την αυξημένη ειδική κατανάλωση που προκύπτει λόγω της καθυστερημένης έγχυσης (retarded injection). Φαίνεται ότι από ένα σημείο και μετά, όσο αυξάνεται ο συντελεστής συμπίεσης τόσο μειώνονται τα NO_x. Ωστόσο υπάρχει περιορισμός στην αύξηση αυτή λόγω κατασκευής και αντοχής της μηχανής και η υιοθέτηση της μεθόδου απαιτεί αλλαγές στα εξαρτήματά της [107] [108]. Η Wartsila, παραδείγματος χάρη, αντικαθιστά τα πιστόνια που είναι σχεδιασμένα για πίεση καύσης στα 10 bar, με άλλα ανθεκτικά στα 16.5 bar. [102]

2.5.2.5. Μείωση του χρόνου επικάλυψης των βαλβίδων εξαγωγής καυσαερίων και εισαγωγής αέρα υπερπληρώσεως/Internal EGR, Miller timing cycle

Με τη μείωση της περιόδου επικάλυψης των δύο βαλβίδων η απόπλυση των καυσαερίων δεν είναι τέλεια, με αποτέλεσμα την παραμονή στο θάλαμο καύσης σημαντικής ποσότητας καυσαερίων, που δρουν ως αδρανή αέρια κατά την καύση και τον σχηματισμό των NO_x. Υπό παρόμοια αρχή λειτουργεί και η μέθοδος μείωσης NO_x με την ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR), όπου όμως εκεί η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι μειωμένη. Η μέθοδος μειωμένης επικάλυψης βαλβίδων, αν δε συνδυαστεί με κατάλληλο σχεδιασμό ακροφυσίων και θαλάμου καύσης, κατάλληλη πίεση και σχηματισμό έγχυσης, επιφέρει αύξηση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και στην παραγωγή σωματιδίων αιθάλης. Έρευνες γίνονται πάνω στο συνδυασμό αυτής της μεθόδου με την άμεση έγχυση νερού στο θάλαμο καύσης πριν την καύση ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη ψύξη των εναπομεινάντων καυσαερίων και του θαλάμου. [123]

Μείωση των NO_x είναι δυνατόν να επιτευχθεί και με ακόμα μία, αντίθετη, τροποποίηση στο χρονισμό των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής αερίων, που βασίζεται στον κύκλο λειτουργίας Miller και την προσπάθεια μείωσης της αρχικής θερμοκρασίας συμπίεσης. Με τη μείωση της αρχικής θερμοκρασίας συμπίεσης, δεδομένου ότι αυτή δεν ξεπερνάει ένα ελάχιστο όριο κάτω από το οποίο η καύση γίνεται κρουστικά λόγω καθυστέρησης έναυσης, επιτυγχάνεται μεταφορά ολόκληρου του κύκλου σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, αφήνοντας το περιθώριο για αύξηση της πίεσης καύσης, που δεν ξεπερνάει τα κρουστικά όρια, και με θετικά αποτελέσματα στην αποδοτικότητα του κύκλου. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα μειώνεται, με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερο καύσιμο για την ίδια αύξηση της πίεσης, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται μικρότερη αρχική πίεση για την πλήρωση του κινητήρα με την ίδια μάζα αέρα. [110] Στους τετράχρονους κινητήρες ο κύκλος Miller επιτυγχάνεται είτε με το νωρίτερο άνοιγμα είτε με το αργότερο κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής του αέρα καύσης, είτε με τη συνολική μεταφορά του διαστήματος εισαγωγής αέρα καύσης σε νωρίτερες γωνίες στροφάλου έως και ολοκληρωτικά κάτω του ΚΝΣ. Στους δίχρονους κινητήρες δεν υπάρχει αυτή η ευελιξία, καθώς δεν υπάρχουν βαλβίδες εισαγωγής αέρα καύσης, και ο κύκλος Miller προσεγγίζεται μόνο με την καθυστέρηση του κλεισίματος της βαλβίδας εξαγωγής καυσαερίων. Με την καθυστέρηση του κλεισίματος της βαλβίδας εξαγωγής επιτυγχάνεται καλύτερη απόπλυση καυσαερίων και καλύτερη ψύξη του θαλάμου καύσης, καθώς μέρος του νεοεισαχθέντα αέρα απόπλυσης λειτουργεί σαν μέσο ψύξης του θαλάμου. Η προκύπτουσα σχετικά πιο χαμηλή μέγιστη θερμοκρασία καύσης μειώνει την παραγωγή των NO_x.

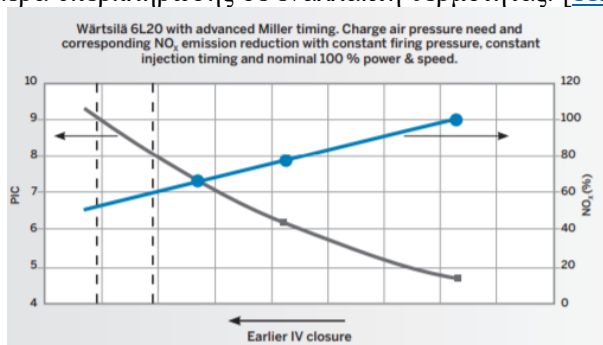
Ωστόσο, λόγω της εκτεταμένης εκροής νεοεισαχθέντα αέρα πληρώσεως, απαιτείται αύξηση της πίεσής του για να αντισταθμιστεί η απώλεια μάζας. Χωρίς τη χρήση υπερπληρωτή μειώνεται η πίεση καύσης του κύκλου και ο βαθμός απόδοσής του. Όσο αυξάνεται η διάρκεια της εξαγωγής, τόσο μειώνεται η μέγιστη πίεση καύσης στο θάλαμο καύσης, λόγω του μειωμένου βαθμού συμπίεσης, ενώ αντίστοιχα μειώνεται και η μέγιστη θερμοκρασία καύσης και η παραγωγή των NO_x. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, που την καθιστά ανίκανη να λειτουργήσει μόνη της, είναι το μειωμένο έργο και η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου που δημιουργούνται λόγω του χαμηλού συντελεστή συμπίεσης. Μπορεί να επιτευχθεί μείωση των NO_x έως και 45%, με ταυτόχρονη όμως αύξηση της ειδικής κατανάλωσης κατά 2.6%. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να βελτιωθούν με την ταυτόχρονη χρήση συστήματος υπερπλήρωσης δύο σταδίων και κατάλληλη ανακυκλοφορία καυσαερίων με μείωση έως και 50% στα NO_x με σταθερή κατανάλωση καυσίμου. [109]

2.5.2.6. Υπερπλήρωση δύο σταδίων/Two-stage Turbocharger

Η υπερπλήρωση δύο σταδίων εφαρμόζεται σε συνεργασία με το χρονισμό Miller για τετράχρονους κινητήρες Diesel, ενώ τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου για δίχρονους κινητήρες έχουν μελετηθεί μόνο

στο επίπεδο κάποιων λίγων ερευνών και προσομοιώσεων.[109] Στους τετράχρονους κινητήρες, όπως υπαγορεύει ο κύκλος Miller, η βαλβίδα εισαγωγής αέρα σάρωσης ανοίγει και κλείνει νωρίτερα, με αποτέλεσμα την πλήρωση του θαλάμου με αυξημένη μάζα αέρα. Το ωφέλιμο έργο που χάνεται από την πρόωμη διακοπή της εκτόνωσης των καυσαερίων εντός του θαλάμου καύσης χρησιμοποιείται εν μέρει κατά την εκτόνωσή τους στους υπερπληρωτές, οι οποίοι εκτονώνουν αέρα χαμηλότερης θερμοκρασίας στο θάλαμο καύσης. Οι υπερπληρωτές πρέπει να είναι ικανοί να εφοδιάζουν το θάλαμο καύσης με αρκετά μεγάλη πίεση, ώστε να γίνει επαρκής απόπλυση καυσαερίων και ψύξη του θαλάμου. Έτσι, ενώ με το χρονισμό Miller επιτυγχάνεται χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση του κύκλου, με την υπερπλήρωση επιτυγχάνεται 'επαναφορά' της πίεσης σε κανονικά ή ψηλότερα επίπεδα, με αποτέλεσμα η μείωση της απόδοσης και η αύξηση της ειδικής κατανάλωσης, λόγω του χρονισμού Miller, να αντισταθμίζονται. Συνολικά η συνεργασία των μεθόδων επιφέρει μειώσεις στα NO_x χωρίς αυξημένη ειδική κατανάλωση. [113]

Πειράματα της Wartsila σε τετράχρονο κινητήρα με χρονισμό Miller και υπερπλήρωση δύο σταδίων ολοκληρώθηκαν το 2007, δείχνοντας ότι όσο νωρίτερο είναι το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής του αέρα καύσης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος πίεσης και ο απαιτούμενος βαθμός υπερπλήρωσης, αλλά τόσο χαμηλότερα είναι και τα NO_x. Αναφέρεται ότι είναι εφικτό να επιτευχθεί μείωση έως και 40% των NO_x σε πλήρες φορτίο, χωρίς μείωση της απόδοσης ή του έργου του κινητήρα και με μείωση της ειδικής κατανάλωσης έως 2%. Σύμφωνα με άλλη έρευνα τα αντίστοιχα ποσοστά ανέρχονται στο 30% και 8,7%[113]. Το πρόβλημα εκκίνησης και επιτάχυνσης της μηχανής, καθώς και της λειτουργίας της σε χαμηλά φορτία, λόγω εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας, καθυστέρησης έναυσης και κρουστικής καύσης, που παρουσιάζεται, μπορεί να αντιμετωπιστεί με ρύθμιση και έλεγχο του χρονισμού της βαλβίδας εισαγωγής αέρα (Variable Inlet Closing), δυνατότητα που παρέχει η ABB από το 2012 με το σύστημα VCM (Valve Control Management)[110], ή με αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα υπερπλήρωσης σε εναλλάκτη θερμότητας. [112]

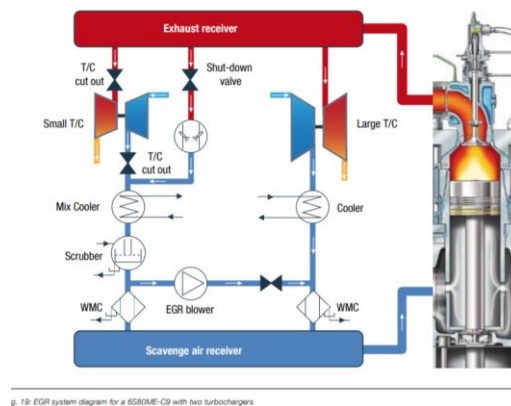


Εικόνα 48: Επίδραση του Miller timing στην παραγωγή των NO_x.

2.5.3. Ανακυκλοφορία καυσαερίων/ Exhaust Gas Recirculation (EGR)

Η μέθοδος αυτή, εμπνευσμένη από την αυτοκινητοβιομηχανία, τέθηκε σχετικά πρόσφατα υπό το πρίσμα των ερευνών για δίχροτους ντιζελοκινητήρες, αλλά κέρδισε γρήγορα έδαφος με την πρώτη πειραματική εγκατάσταση σε πλοίο να γίνεται το 2010.[118]

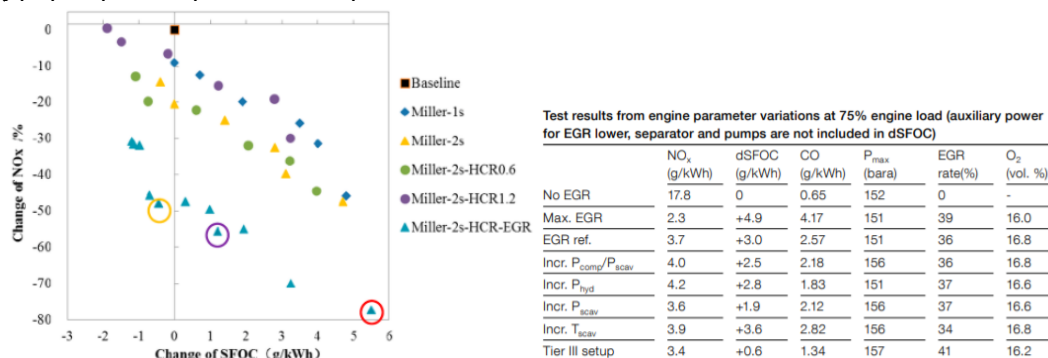
Η μέθοδος της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων υλοποιείται με εισαγωγή στο θάλαμο καύσης μέρους, έως και 40% περίπου, των καυσαερίων που εξέρχονται από αυτόν. Αφότου έχουν ψυχθεί επαρκώς και καθαριστεί, εισέρχονται στο θάλαμο καύσης και, κατά τη διάρκεια της καύσης, όντας αδρανή αέρια και με αυξημένη ειδική θερμοχωρητικότητα συγκριτικά με το φρέσκο αέρα (c_{pO_2} , $c_{pN_2} < c_{pCO_2}$, c_{pH_2O}), απορροφούν θερμότητα, εμποδίζοντας την εκτεταμένη αύξηση της θερμοκρασίας καύσης. Ταυτόχρονα, το ποσοστό του οξυγόνου στον αέρα υπερπλήρωσης είναι μειωμένο και κατ' επέκταση μειωμένο είναι και το ποσοστό των NO_x που δημιουργούνται όταν αυτός αποκτά υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 49: Διάγραμμα ανακυκλοφορίας καυσαερίων (MAN B&W) [118].

Με την ανακυκλοφορία καυσαερίων, ένα μέρος της ποσότητας οξυγόνου και αζώτου στο θάλαμο καύσης αντικαθίσταται από αδρανή αέρια, οπότε οι συγκρούσεις των αντιδρώντων είναι μειωμένες ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχει αλλαγή στη συνολική πίεση καύσης. Η θερμοκρασία είναι μειωμένη, καθώς η θερμότητα απορροφάται από τα καυσαέρια και τελικά επιτυγχάνεται μείωση της παραγωγής των NO_x έως και 50%. [102]

Στην πράξη, για την επίτευξη των παραπάνω συνθηκών, απαιτούνται αρκετές παράπλευρες ρυθμίσεις. Προκειμένου τα καυσαέρια να έχουν αυξημένη πίεση και μειωμένη θερμοκρασία κατά την είσοδό τους, ώστε να μην υπάρξει μείωση της απόδοσης του κύκλου, απαιτείται αυξημένο έργο από τις ψυκτικές μηχανές και τους υπερπληρωτές, κάτι που βρίσκει δυσκολίες στην εφαρμογή, μιας και το έργο που αποδίδει ο αεριοστρόβιλος στον υπερπληρωτή είναι μειωμένο, λόγω της μειωμένης ποσότητας των καυσαερίων που διέρχονται απ' αυτόν. Δεδομένου ότι η ενέργεια του αεριοστρόβιλου μειώνεται έως και 40%, η ειδική κατανάλωση καυσίμου παρουσιάζεται αυξημένη. [102][118] Η μικρή μείωση που παρατηρείται στην έκλυση θερμότητας λόγω της απομάκρυνσης από την τέλεια καύση, είναι μικρή αλλά μπορεί να αντισταθμιστεί με μια υψηλή πίεση έγχυσης καυσίμου. [118] Προσομοιώσεις που έγιναν σε έρευνα [109] ταυτόχρονης εφαρμογής EGR, Miller timing, υπερπλήρωσης δύο σταδίων και αύξησης του γεωμετρικού συντελεστή συμπίεσης έδειξαν ότι τα NO_x προκύπτουν σαφώς μειωμένα με μια όμως ανεπίτρεπτη αύξηση στην ειδική κατανάλωση σε ποσοστά ανακυκλοφορίας άνω των 20%, ενώ η συμφωνία με τους κανονισμούς δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς μια μικρή αύξηση στην ειδική κατανάλωση.



Εικόνα 50: Επίδραση της ανακυκλοφορίας καυσαερίων στην ειδική κατανάλωση και τους ρύπους [109],[118]

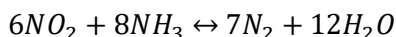
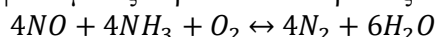
Πριν την εισαγωγή των καυσαερίων στον υπερπληρωτή απαιτείται ο καθαρισμός τους από τα αυξημένα σωματίδια αιθάλης που περιλαμβάνουν, διαφορετικά τα σωματίδια αυτά θα επικαθίσουν στα τοιχώματα του κυλίνδρου και θα μολύνουν το έλαιο λίπανσης αυξάνοντας το κινηματικό ιξώδες του, αλλά και στις σωληνώσεις του συστήματος μειώνοντας την αποδοτικότητα των αντλιών. Παράλληλα η ύπαρξη οξειδίων του θείου στα καυσαέρια επιδεινώνει τη φθορά της μηχανής διαβρώνοντας τα εξαρτήματά της. Συνεπώς ο καθαρισμός των καυσαερίων είναι απαραίτητος και γίνεται με ηλεκτροστατικούς καταλύτες και κατάλληλα φίλτρα που προορίζονται για τα σωματίδια αιθάλης, ενώ η απομάκρυνση των οξειδίων του θείου γίνεται με αποστράγγιξή τους σε υγρούς καθαριστές (wet scrubbers). Η αναμενόμενη μελλοντική αύξηση της χρήσης καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο πρόκειται να είναι ευνοϊκή για την διεύρυνση της υιοθέτησης συστήματος EGR. [86], χωρίς να αποκλείεται και η χρήση του σε μηχανές καύσης βαρέων καυσίμων υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, μιας και αποδεικνύεται ότι μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση από αυτά έως και 98% των SO_x και έως 92% των soot. [118]

Τελικά, φαίνεται ότι ένα σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων υψηλής πίεσης με κατάλληλες ρυθμίσεις ή σε συνεργασία με άλλες μεθόδους μπορεί να ικανοποιήσει τους πιο πρόσφατους κανονισμούς μείωσης NO_x με μικρή αύξηση στην ειδική κατανάλωση. Τα βασικά προβλήματα που επιβαρύνουν αυτούς που επιλέγουν αυτή τη μέθοδο είναι η εκτεταμένη διάβρωση που υφίσταται το ψυγείο των καυσαερίων, η αντλία καυσαερίων και οι σωληνώσεις, η αυξημένη χρήση νερού για το φιλτράρισμα από SO_x, καθώς και η διαχείριση των απόνερων του φιλτραρίσματος αυτού. Η πορεία των απόνερων παρακολουθείται αυστηρά από το 2018, με τις σχετικές οδηγίες του IMO, και η επεξεργασία του σε κατάλληλα συστήματα WTS (Water Treatment Systems) πρέπει να προηγείται της ρίψης τους στη θάλασσα, ενώ και η απόρριψη των κατάλοιπων τους γίνεται υπό περιορισμούς.[116][118]

2.5.4. Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή NO_x/ Selective Catalytic Reduction (SCR)

Η παρούσα μέθοδος είναι μία από τις δύο επίσημες εφαρμογές μείωσης NO_x στην οποία αναφέρεται ρητά ο IMO, από το 2011[119], με σχετικές οδηγίες και απαιτήσεις λειτουργίας, τους οποίους αναθεωρεί εκ νέου το 2017, απαιτώντας καταγραφή περισσότερων στοιχείων σχετικών με τη λειτουργία του καταλύτη [120]. Θεωρείται η πιο αποδοτική των υπαρχουσών μεθόδων με ικανότητα μείωσης των NO_x έως και 90% και είναι η μοναδική κυρίαρχη που καταλέγεται στις επισήμως λεγόμενες δευτερεύουσες μεθόδους (secondary methods), μεθόδους δηλαδή που δεν απαιτούν αλλαγές στο εσωτερικό της μηχανής, ούτε έγκριση από τον κατασκευαστή της. Οι SCR βρίσκουν από το τέλος της δεκαετίας του '70 εφαρμογή σε μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας, αλλά πρώτη πειραματική εφαρμογή στη ναυτιλία το 1989.[118]

Η μείωση των NO_x με αυτή τη μέθοδο συμβαίνει με την έγχυση αμμωνίας ή ουρίας στα καυσαέρια του κινητήρα σε θερμοκρασίες 320°-420° C. Το μίγμα καυσαερίων-αμμωνίας, περνώντας από καταλύτη, αντιδρά μετατρέποντας τα οξείδια του αζώτου σε άζωτο και νερό, χωρίς να παράγει κάποιον δευτερεύοντα ρύπο που απαιτεί επεξεργασία, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Όσο αυξάνεται το ποσοστό της αμμωνίας που εγχέεται στα καυσαέρια, τόσο αυξάνεται και το ποσοστό των οξειδίων που μετατρέπονται σε άζωτο. Ωστόσο με την αύξηση της αμμωνίας αυξάνεται και η διαρροή της μη αντιδράσασας αμμωνίας που διαφεύγει στο περιβάλλον μαζί με το άζωτο και τα λοιπά αέρια (NH₃ slip). Μεγάλες ποσότητες αμμωνίας στα διαφεύγοντα αέρια είναι ανεπιθύμητες, όχι μόνο επειδή η αμμωνία συνιστά ρυπογόνα και διαβρωτική ένωση από μόνη της, αλλά και επειδή κατά την ψύξη των καυσαερίων υπάρχει κίνδυνος αντίδρασής της με οξείδια του θείου SO₃, που περιέχονται στα καυσαέρια, και σχηματισμού θειικού αμμωνίου που επικάθεται στα τοιχώματα και μειώνει την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας. Η MAN B&W[118], όπως και η Wartsila[124][125], λύνουν το πρόβλημα της κατάλληλης ποσότητας εγχόμενης αμμωνίας, ρυθμίζοντάς την από υπολογιστή ανάλογα με την ποσότητα των NO_x που παράγονται στο συγκεκριμένο φορτίο. Η σχέση του φορτίου της μηχανής και των παραγόμενων NO_x προκύπτει αρχικά από πειράματα στη συγκεκριμένη μηχανή και η σχέση ανατροφοδοτείται διαρκώς με δεδομένα από τις επί τόπου μετρήσεις των NO_x σε κάθε φορτίο. Ο ISO προτείνει διάλυμα περιεκτικότητας ουρίας 40% για ναυτιλιακές εφαρμογές.

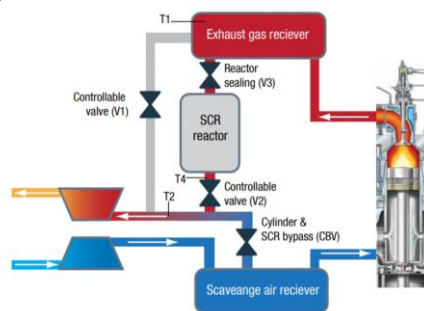
| NO _x emissions at the four IMO engine load points | | | | | |
|--|------|------|------|-------|-------|
| | 25 % | 50 % | 75 % | 100 % | Cycle |
| Tier III | | | | | |
| g/kWh | 2.9 | 3.1 | 2.9 | 2.5 | 2.8 |

Εικόνα 51: Παραγωγή NO_x με χρήση SCR σε διαφορετικά φορτία (IMO limit: 3.4)

Ο όγκος του καταλύτη που χρησιμοποιείται έχει δευτερεύοντα ρόλο στη λειτουργία της μεθόδου. Σαφώς όσο μεγαλύτερος είναι ο καταλύτης τόσο αυξάνονται οι αντιδράσεις αναγωγής. Ωστόσο ίδια αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με μικρή αύξηση στο ποσοστό αμμωνίας του μίγματος και χρήση καταλύτη έως και μισού όγκου μικρότερου, αλλά με ταυτόχρονη αύξηση της ποσότητας αμμωνίας που διαφεύγει ανεπεξέργαστη. Συνεπώς το επιτρεπόμενο όριο της διαρρέουσας αμμωνίας είναι αυτό που καθορίζει την επιλογή του μεγέθους του καταλύτη που θα εγκατασταθεί στο πλοίο.

Η απαιτούμενη θερμοκρασία στον καταλύτη καθορίζεται από την περιεκτικότητα του καυσίμου και των καυσαερίων σε θείο. Σε υψηλές περιεκτικότητες θείου των καυσαερίων, όταν η θερμοκρασία δεν είναι αρκούντως υψηλή, υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας θειικού αμμωνίου, που μπλοκάρει τους πόρους του καταλύτη και μειώνει την αποδοτικότητά του. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα σε θείο, τόσο αυξημένη πρέπει να είναι και η θερμοκρασία του μίγματος που θα εισέλθει στον καταλύτη. Προκύπτει

επομένως το πρόβλημα λειτουργίας σε χαμηλά φορτία, οπότε η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι μειωμένη. Στους δίχρονους αργόστροφους κινητήρες, που η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν είναι αρκούντως μεγάλη, ο καταλύτης τοποθετείται πριν τον αεριοστροβίλο, με το συνεπακόλουθο μειονέκτημα της μικρής μείωσης του έργου του. Επειδή σε υπάρχοντα πλοία συνήθως δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος για την τοποθέτηση αυτή, η εγκατάσταση του SCR σε αργόστροφους κινητήρες βρίσκει εφαρμογή μόνο σε νεόκτιστα πλοία, ενώ σε τετράχρονους μεσόστροφους κινητήρες ο SCR είναι ευρεία διαδεδομένος. Μάλιστα, μελέτες της MAN δείχνουν ότι σε λειτουργία δίχρονων κινητήρων της σε μειωμένα φορτία, η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν είναι αρκούντως υψηλή ούτε με την τοποθέτηση του καταλύτη πριν τον υπερπληρωτή. Στην περίπτωση αυτή, έχει αναπτύξει ένα σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων, κατά το οποίο μέρος των καυσαερίων, αφού διέλθει από τον αντιδραστήρα αναμιγνύεται με τον αέρα υπερπλήρωσης, του οποίου η πίεση παραμένει σταθερή, μειώνοντας το ποσοστό περιεκτικότητάς του σε οξυγόνο και τελικά παράγοντας καυσαέρια αυξημένης θερμοκρασίας. Για την αύξηση του έργου του υπερπληρωτή, που χρειάζεται κατά την εκκίνηση ή την επιτάχυνση του κινητήρα, υπάρχει δυνατότητα άμεσης διοχέτευσης των καυσαερίων στον υπερπληρωτή. Η Wartsila αντίθετα, λύνει το πρόβλημα της μειωμένης θερμοκρασίας καυσαερίων, θεωρώντας ότι, όσο ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε λειτουργία εντός NECAs και SECAs, ο κινητήρας λειτουργεί με ελαφρύ καύσιμο LSFO χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, οπότε οι θερμοκρασίες μπορούν να είναι αρκετά υψηλές με το SCR σε λειτουργία, ενώ σε περιοχές εκτός NECAs λειτουργεί με βαρύ καύσιμο HFO, το SCR είναι ανενεργό και τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας, ώστε περνώντας από το σύστημα να μην αφήνουν καταλύματα που όταν το SCR ενεργοποιηθεί θα αντιδρούσαν με την ουρία. Έτσι διασφαλίζεται ότι ο καταλύτης δε θα μπλοκάρει.[124] [122]



Εικόνα 52: Διάγραμμα συστήματος με καταλύτη SCR [118].

Το βασικό μειονέκτημα της κατά τ' άλλα αποδοτικότερης και απλής μεθόδου αυτής είναι η δυσκολία στην εγκατάσταση σε υπάρχοντα πλοία, λόγω μεγάλου όγκου και βάρους του εξοπλισμού, καθώς και τα σχετικά αυξημένα αρχικά αλλά και λειτουργικά κόστη. Σε νέες μηχανές μειωμένης παραγωγής NO_x έχει επιτευχθεί η δημιουργία καταλύτη, ενσωματωμένου στο σιγαστήρα καυσαερίων, χωρίς σημαντική αύξηση του όγκου του (30%-60% αύξηση του βάρους του), για οικονομία χώρου[124]. Στις περιπτώσεις ύστερης τοποθέτησης καταλύτη σε υπάρχουσες μηχανές, προτιμάται η τοποθέτησή του προ του αεριοστροβίλου, οπότε η πίεση είναι μεγαλύτερη και ο απαιτούμενος όγκος καταλύτη μειωμένος, αλλά αυτό δεν είναι πάντα χωροταξικά εφικτό.[102] Η δεξαμενή ουρίας συνήθως τοποθετείται στη γάστρα και μπορεί να αντικαταστήσει ενίοτε και κάποια δεξαμενή έρματος, μιας και καταλαμβάνει έως και 200 m³. Στα έξοδα λειτουργίας, εκτός από την προμήθεια ουρίας, προστίθενται και τα υψηλά κόστη συντήρησης του αντιδραστήρα, όταν και εφόσον ο κινητήρας λειτουργεί με βαρύ καύσιμο. Τα βαριά καύσιμα παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες σωματιδίων αιθάλης, τα οποία περιέχουν αλκαλικά οξείδια μετάλλων ή φωσφορικά οξείδια, που δηλητηριάζουν τον καταλύτη και τον καθιστούν ανενεργό. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού μπορεί να γίνει χρήση απορροφητήρα αιθάλης. Εφόσον επιλεγεί η χρήση ελαφρύτερου καυσίμου λειτουργίας, που είναι όμως ακριβότερο, τα έξοδα συντήρησης μειώνονται.

Εν κατακλείδι, παρότι φαίνεται ότι ο SCR μπορεί να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις του παρόντος και του άμεσου μέλλοντος, οι έρευνες δε σταματούν εδώ, μιας και πάντα θα γίνεται προσπάθεια για εύρεση τρόπων μείωσης NO_x και SFOC πιο οικονομικών και λειτουργικών. Εξάλλου μία και μόνο λύση δύσκολα μπορεί να εξυπηρετεί επαρκώς και με μέγιστη αποδοτικότητα όλες τις εφαρμογές,[123] και αυτό αποδεικνύεται και με τα μεγάλα ποσοστά πλοίων που λειτουργούν χωρίς καμία εφαρμογή τεχνικής μείωσης NO_x. Αναφέρεται σε στοιχεία από μετρήσεις έως το 2016, ότι μόνο το 11.4% των κινητήρων ισχύος 20-1000 kW και το 43.5 % των κινητήρων μεγαλύτερης ισχύος λειτουργούν με SCR και ένα μικρό ποσοστό EGR, ενώ ο υπόλοιπος πληθυσμός δε χρησιμοποιεί καμία εγκατεστημένη μέθοδο μείωσης ρύπων.[133] Παρακάτω φαίνονται συγκεντρωτικά τα προσεγγιστικά ποσοστά μείωσης NO_x που μπορούν να επιτύχουν οι βασικότερες μέθοδοι, καθώς και τα προσεγγιστικά κόστη τους.

| Measure | Ship type | Small Vessel | Medium Vessel | Large Vessel | |
|--|--|------------------|---------------|---------------|-----|
| | | (€/tonne NOx) | (€/tonne NOx) | (€/tonne NOx) | |
| | Basic IEM (2 stroke slow speed only) | New | 12 | 9 | 9 |
| | Basic IEM (2 stroke slow speed only), young engines ⁷ | Retrofit | 12 | 9 | 9 |
| | Basic IEM (2 stroke slow speed only), older engines | Retrofit | 60 | 24 | 15 |
| | Basic IEM (2 stroke slow speed only), young and older engines | Retrofit | | | |
| | NO_x | | | | |
| | Advanced IEM | New ⁸ | 98 | 33 | 19 |
| | Direct water injection | New ⁹ | 411 | 360 | 345 |
| | Humid air motors | New | 268 | 230 | 198 |
| | Humid air motors | Retrofit | 306 | 282 | 263 |
| | SCR outside SO ₂ ECA ¹⁰ | New | 740 | 563 | 526 |
| | SCR outside SO ₂ ECA | Retrofit | 809 | 612 | 571 |
| | SCR inside SO ₂ ECA | New | 543 | 424 | 398 |
| | SCR inside SO ₂ ECA | Retrofit | 613 | 473 | 443 |
| | SCR, Ships using MD | New | 413 | 332 | 313 |
| | SCR, Ships using MD | Retrofit | 483 | 381 | 358 |
| | SCR, all areas and ships | Retrofit | | | |
| | SCR, all areas and ships | New | | | |
| Basic IEM (Slide Valves) | -20% | | | | |
| Advanced IEM | -30% | | | | |
| Direct water injection | -50% | | | | |
| Humid Air Motor | -70% | | | | |
| Exhaust Gas Recirculation (ships originally using RO but switching to MD (accounting for SO ₂ & PM reductions)) | -35% | | | | |
| Exhaust Gas Recirculation (ships originally using MD) | -35% | | | | |
| Selective Catalytic Reduction | -90% | | | | |

Εικόνα 53: Εκτιμώμενη οικονομική απόδοση βασικών μεθόδων μείωσης NO_x [196].

3. Έγχυση καυσίμου πολλαπλού παλμού

Η επίδραση της διακοπτόμενης έγχυσης καυσίμου στην παραγωγή των NO_x και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου αποτελεί το κύριο αντικείμενο μελέτης στη συνέχεια. Πρόκειται για μια πρωτεύουσα μέθοδο περιορισμού των NO_x που αφορά αποκλειστικά στη λειτουργία και τον κύκλο της μηχανής και επηρεάζει την ισχύ και την απόδοσή της. Αναφέρεται ότι η μέθοδος αυτή υποστηρίζεται απαραίτητως από σύστημα ηλεκτρονικής έγχυσης και μελετάται από τα τέλη της δεκαετίας του '70, χωρίς όμως να βρίσκει εφαρμογή, μιας και δεν υπήρχε ούτε τεχνολογική υποστήριξη, αλλά ούτε και κατάλληλη νομοθεσία που να απαιτεί ή να προωθεί την υιοθέτησή της.[126]

Η συνολική μάζα καυσίμου που εγχέεται σε κάθε κύκλο διαιρείται σε επιμέρους παλμούς έγχυσης, που μεταξύ τους διαχωρίζονται από διαστήματα μηδενικής έγχυσης. Η έναρξη της κάθε έγχυσης είναι μεταβλητή, ενώ επίσης μεταβλητά είναι και το μέρισμα της μάζας της κάθε έγχυσης. Η πίεση του εγχέομένου καυσίμου, που ουσιαστικά, με δεδομένα τα παραπάνω, καθορίζει τη διάρκεια της κάθε έγχυσης, είναι ακόμα μια μεταβλητή. Αν συνυπολογίσει κανείς και την επιπρόσθετη ελευθερία του αριθμού των παλμών που μπορούν να συμβούν, γίνεται αντιληπτή η πολυπαραγοντικότητα του προβλήματος. Κάθε μία από τις παραπάνω μεταβλητές επηρεάζει και καθορίζει την έναρξη και την εξέλιξη της καύσης, την πίεση και τη θερμοκρασία του θαλάμου κάθε στιγμή, και τελικά την απόδοση του κινητήρα και την παραγωγή NO_x. Οι μεταβλητές αυτές ρυθμίζονται ηλεκτρονικά, εφόσον και αν υπάρχει σύστημα υψηλής πίεσης καυσίμου με ηλεκτρονικό έλεγχο. Πέραν του CRS η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί εξτρά εξοπλισμό για την υλοποίησή του, οι πολλοί βαθμοί ελευθερίας του όμως καθιστούν δύσκολη τη μελέτη και τη ρύθμισή του ώστε να εξάγονται τα επιθυμητά αποτελέσματα σε κάθε φορτίο. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που ακόμα η μέθοδος αυτή δεν είναι ευρέως διαδεδομένη στη ναυτιλία, παρά την διάθεση των CRS στο εμπόριο από το 2004.

Μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες μηχανών ήδη προσφέρουν την επιλογή ρύθμισης του κινητήρα τους σε τέτοια προφίλ έγχυσης. Ωστόσο η συμπεριφορά της διακοπτόμενης έγχυσης και των μεταβλητών της είναι ακόμα υπό έρευνα, μιας και πρακτικά οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος είναι άπειροι. Οι υπάρχουσες μελέτες δείχνουν ότι η μείωση των NO_x που μπορεί να επιτευχθεί είναι μεγάλη, με ταυτόχρονη μείωση της ειδικής κατανάλωσης, ωστόσο προβλέπεται ότι τα νέα αυστηρότερα όρια ρύπων του Tier III δεν μπορούν να επιτευχθούν με την εφαρμογή μόνο αυτής της μεθόδου. Παρόλα αυτά, επειδή η μέθοδος δεν απαιτεί ακριβό ή βαρύ εξοπλισμό και υλοποιείται μόνο με μια καλή ρύθμιση του CRS, αξίζει να μελετηθεί ακόμα κι αν τελικά αποδειχθεί ότι δεν μπορεί να σταθεί μόνη της στον Tier III υπό καμία συνθήκη.

3.1. Προέγχυση καυσίμου/pilot injection

Από τις πρώτες μελέτες που έγιναν στο θέμα της πολλαπλής έγχυσης είναι αυτή της έγχυσης διπλού παλμού, με τον πρώτο παλμό έγχυσης να περιλαμβάνει μικρότερο ποσοστό της ολικής μάζας από το δεύτερο κύριο παλμό. Το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από τρεις μεταβλητές: το χρόνο έναρξης της πρώτης έγχυσης (Start of Pilot Injection), το ποσοστό επί της ολικής μάζας της πρώτης έγχυσης και από το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ των δύο εγχύσεων (Dwelling Time). Πειραματικές και μοντελοποιημένες μελέτες έχουν δείξει ότι οι προεγχύσεις καυσίμου σε κατάλληλο χρόνο και dwell timing μπορούν να μειώσουν το χρόνο καθυστέρησης έναυσης καθώς και το ρυθμό αύξησης της πίεσης στην αρχή της καύσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου της μηχανής, επιτρέποντας έτσι την αύξηση της απόδοσης του κύκλου χωρίς την εμφάνιση κρουστικών φαινομένων, αλλά και τη βελτίωση της καύσης καυσίμων με χαμηλό αριθμό κετανίου, αυτών δηλαδή με μικρή αναφλεξιμότητα.

Παρότι τα παραπάνω συμπεράσματα είναι κοινώς αποδεκτά και αποδεδειγμένα, οι τιμές για τις οποίες εμφανίζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα σχετικά με το θόρυβο, τα NO_x, την ειδική κατανάλωση καυσίμου και τα soot, καθώς και ο τρόπος επιρροής των μεταβλητών στα αποτελέσματα αυτά δε βρίσκει σύμφωνες όλες τις έρευνες. Αυτή η ασυμφωνία υποδηλώνει τη μεγάλη εξάρτηση των αποτελεσμάτων από παράγοντες, όπως είναι οι αρχικές συνθήκες, η γεωμετρία του θαλάμου καύσης, η ταχύτητα και οι στροφές της μηχανής, το καύσιμο κ.α., και την ανάγκη για εξειδικευμένες έρευνες σε κάθε μηχανή και κατάσταση λειτουργίας ξεχωριστά.[127] Η πλειονότητα των ερευνών σχετικά με το θόρυβο της μηχανής καταλήγουν στο ότι σχετίζεται με το ρυθμό αύξησης της πίεσης (Maximum of in-cylinder Pressure Rise Rate/MPPR), καθώς απότομη αύξηση της πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ταλαντωτικών φαινομένων στη μηχανή και την παραγωγή θορύβου[128], ενώ συσχετίσιμη του υπάρχει και με το ρυθμό μεταβολής παραγωγής θερμότητας (Rate Of Heat

Release/ROHR). Όσο μικρότεροι οι ρυθμοί αυτοί, τόσο λιγότερος είναι και ο θόρυβος, ενώ μικρότερες είναι και οι μέγιστες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας, οδηγώντας σε μικρότερη παραγωγή NO_x.

Η έρευνα [150] μελετά την επίδραση του διπλού παλμού έγχυσης στη ρευστομηχανική συμπεριφορά των σταγονιδίων καυσίμου και στη διάσπασή τους. Αποδεικνύει ότι με το διπλό παλμό έγχυσης η καθυστέρηση έναυσης της δεύτερης έγχυσης μειώνεται, ότι τα σημεία έναυσης της δεύτερης έγχυσης βρίσκονται πιο κοντά στον εγχυτήρα και ότι η θερμοκρασία καύσης είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή ενός μονού παλμού έγχυσης. Συγκεκριμένα αποδεικνύει ότι η διπλή έγχυση επηρεάζει τον κώνο του σπρέι έγχυσης, το οποίο και καθορίζει αν η καύση θα είναι πλήρης ή μερική. Αν ο κώνος είναι σχετικά στενός, η πυκνότητα καυσίμου είναι μεγάλη, δεν υπάρχει το απαραίτητο οξυγόνο και τελικά η φλόγα από τα σημεία έναυσης δεν εξαπλώνεται και σβήνει. Αντίθετα, αν ο κώνος έχει μεγάλη γωνία, η φλόγα από τα σημεία έναυσης στα άκρα του εξαπλώνεται σε όλο το σπρέι. Η καθυστέρηση έναυσης επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του θαλάμου, και όσο αυτή είναι χαμηλότερη τόσο η καθυστέρηση αυξάνεται. Όταν η έγχυση είναι συνεχόμενη η καθυστέρηση έναυσης είναι αυξημένη, δίνοντας χρόνο στην κίνηση του σπρέι και τελικά αυξάνοντας την απόσταση του σημείου της έναυσης από τον εγχυτήρα. Στη μονή έγχυση ωστόσο, ακόμα κι αν η καθυστέρηση έναυσης δεν είναι τόσο μεγάλη και η θερμοκρασία θαλάμου είναι σχετικά μικρή, το σημείο της έναυσης μεταφέρεται πιο κοντά στον εγχυτήρα. Αυτό πιθανώς συμβαίνει γιατί η έναυση συμβαίνει κατά την έγχυση του δεύτερου παλμού και κοντά στον εγχυτήρα δημιουργούνται οι κατάλληλες αναλογίες αέρα-καυσίμου.

Επίσης, αναφέρεται ότι μια μεγάλη καθυστέρηση έναυσης μπορεί να οδηγήσει σε μερική καύση, ενώ πρέπει να επιδιώκεται η έναυση του καυσίμου του πρώτου σπρέι πριν την έγχυση του δεύτερου ώστε να πυροδοτηθεί μια ολοκληρωμένη καύση. Ιδιαίτερα στην περίπτωση χαμηλών θερμοκρασιών αν η απόσταση μεταξύ των εγχύσεων δεν είναι κατάλληλη υπάρχει κίνδυνος η δεύτερη να 'σβήσει' την πρώτη και η καύση να είναι μερική, αυξάνοντας την καθυστέρηση έναυσης. Τέλος, η διάρκεια της καύσης με έγχυση διπλού παλμού εμφανίζεται μειωμένη συγκριτικά με του μονού παλμού, κάτι που αποδεικνύει την καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου σε όλη την έκταση του θαλάμου. Σε όλες τις περιπτώσεις όσο αυξημένη είναι η καθυστέρηση έναυσης, τόσο μειωμένη είναι η διάρκεια της καύσης.

Η έρευνα [150] συμπληρωματικά παρατηρεί ότι όσο μικρότερη η απόσταση μεταξύ των εγχύσεων τόσο επιταχύνεται το σπρέι της έγχυσης με αποτέλεσμα να φτάνει μακρύτερα εντός του θαλάμου καύσης συγκριτικά με μια μονή έγχυση. Φαίνεται ότι η πιλοτική έγχυση αυξάνει τις ταχύτητες στο θάλαμο και επιταχύνει το καύσιμο της δεύτερης έγχυσης μειώνοντας τις αντιστάσεις και οδηγώντας το σε μακρύτερες αποστάσεις. Το φαινόμενο αυτό της επιτάχυνσης υποβοηθάται από μεγάλες μάζες πιλοτικής έγχυσης και μικρά διαστήματα μεταξύ των εγχύσεων.

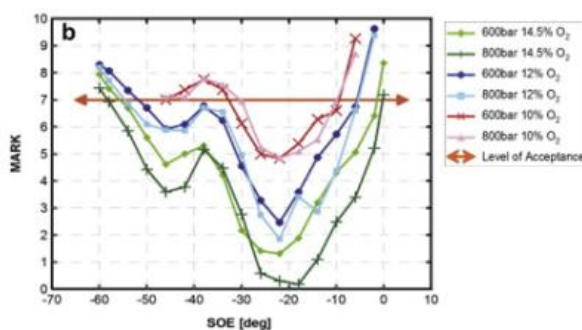
3.1.1. Καύση προανάμειξης σε ελαφρούς κινητήρες Diesel (PCCI/HCCI)- Μέθοδοι που βασίζονται στην ανάμειξη του καυσίμου

Οι μελέτες και η εφαρμογή της πιλοτικής έγχυσης σε κινητήρα Diesel ξεκίνησε από την αυτοκινητοβιομηχανία και την προσπάθεια μείωσης του θορύβου σε κινητήρες προανάμειξης Diesel (Premixed Charge Compression Ignition/PCCI). Η μέθοδος πλήρους προανάμειξης σε κινητήρες Diesel αναπτύχθηκε με σκοπό τη μείωση των ρύπων και ιδιαίτερα των NO_x και soot αλλά και CO₂ και ειδική κατανάλωση, κατά την υιοθέτηση κινητήρων Diesel έναντι των Otto από την αυτοκινητοβιομηχανία. Αναφέρεται ότι η μέθοδος προανάμειξης συναγωνίζεται τις μεθόδους ανακυκλοφορίας καυσαερίων και τη μέθοδο καθυστέρησης έγχυσης στον κοινό στόχο μείωσης NO_x. Στη βάση του ότι η ανακυκλοφορία καυσαερίων απαιτεί ακριβότερο εξοπλισμό και σύνθετο σύστημα, και στο ότι η καθυστερημένη έγχυση αυξάνει την ειδική κατανάλωση καυσίμου, η μέθοδος προανάμειξης φαινόταν αρκετά υποσχόμενη, καθώς πετυχαίνει ίδια μείωση των NO_x, χωρίς αύξηση στην ειδική κατανάλωση, εφόσον αποφευχθεί η διαβροχή των τοιχωμάτων του κυλίνδρου με καύσιμο [142]. Η προανάμειξη καυσίμου επιτυγχάνεται με έγχυση που συμβαίνει στη φάση της συμπίεσης και προ του ANΣ. Το καύσιμο έτσι έχει χρόνο να αναμειχθεί σχεδόν πλήρως με τον αέρα καύσης, ώστε όταν προσεγγιστούν η πίεση και η θερμοκρασία ανάφλεξης του καυσίμου, κοντά στο ANΣ, το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου καίγεται με φλόγα προανάμειξης και με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία καύσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια ταχύτερη αύξηση της έκλυσης θερμότητας, που με τη σειρά της οδηγεί σε μεγάλο ρυθμό αύξησης πίεσης και συνεπώς σε αύξηση του θορύβου, ενώ ταυτόχρονα η έναρξη της καύσης ορίζεται κυρίως από τη χημική κινητική και είναι ανεξέλεγκτη. [128] Το πρόβλημα κρουστικής έναυσης λύνει μια κατάλληλα τοποθετημένη προέγχυση καυσίμου.

3.1.1.1. Έναρξη της έγχυσης/ Start of Injection (SOI)[128]

Εξετάζοντας επομένως την περίπτωση πρόωρης έγχυσης καυσίμου, είναι σημαντικό να διερευνηθεί η συμπεριφορά των μεταβλητών του προβλήματος. Η έναρξη της έγχυσης τοποθετείται νωρίς με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερου ποσοστού προανάμειξης και μείωση της καθυστέρησης έναυσης με αύξηση του χρόνου παραμονής του άκαυστου καυσίμου στο θάλαμο, αλλά όχι τόσο νωρίς ώστε το υγρό καύσιμο, μη εξατμιζόμενο, να επικαθίσει στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Αύξηση του χρόνου παραμονής άκαυστου καυσίμου στο θάλαμο μπορεί επίσης να επιτευχθεί με μειωμένες θερμοκρασίες αέρα εισαγωγής στην περίπτωση υπερπλήρωσης με πρόψυξη, με μειωμένο ποσοστό O₂ στον αέρα καύσης, στην περίπτωση ανακυκλοφορίας καυσαερίων, καθώς και με αύξηση της πίεσης εισαγωγής καυσίμου, που αυξάνει την κινητικότητα και την ανάμειξη στο θάλαμο καύσης. Στις περιπτώσεις αυτές, η έναυση συμβαίνει πάντα μετά το τέλος της έγχυσης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η περιοχή ελεγχόμενης καύσης, που ελέγχεται από την έγχυση του καυσίμου. Χαρακτηριστικά η έρευνα [179] αναφέρει ότι η καύση προανάμειξης απαιτεί τουλάχιστον 10° καθυστέρησης έναυσης. Αποτελέσματα έρευνας δείχνουν ότι η μέγιστη στρεπτική ροπή εμφανίζεται όταν η έγχυση ξεκινάει περίπου στις -20° προ του ΑΝΣ, τότε όμως εμφανίζεται και η μεγαλύτερη παραγωγή NO_x. Η παραγωγή των NO_x εμφανίζεται μειωμένη στην περίπτωση υψηλής πίεσης έγχυσης καυσίμου και καλύτερης ανάμειξης συγκριτικά με κάθε περίπτωση έγχυσης μικρότερης πίεσης, χωρίς παράλληλα να έχει αρνητικά αποτελέσματα στην ειδική κατανάλωση.

Στην έρευνα συμπεραίνεται ότι όσο η έγχυση ξεκινάει νωρίτερα των -10°, τόσο τα soot μειώνονται μιας και αυξάνεται η καθυστέρηση έναυσης και η ανάμειξη του καυσίμου, έως τις -22°, οπότε τα soot αρχίζουν πάλι να αυξάνονται. Η αύξηση αυτή υποδηλώνει την ύπαρξη φαινομένων διαβροχής των τοιχωμάτων, που είναι ανεπιθύμητα λόγω των απωλειών καυσίμου λόγω διάλυσής του στο λιπαντικό του κυλίνδρου και ατελούς καύσης.



Εικόνα 54: Διάγραμμα μείωσης θορύβου ως προς την έναρξη της έγχυσης σε ελαφρύ κινητήρα Diesel.

Σχετικά με το θόρυβο φαίνεται ότι τα επιτρεπτά όρια (άνω του MARK 7) ξεπερνιούνται είτε σε πολύ πρόωρη έγχυση είτε σε έγχυση πολύ κοντά στο ΑΝΣ. Φαίνεται επίσης ότι η μείωση ποσοστού οξυγόνου στον αέρα καύσης μπορεί να μειώσει το θόρυβο σε οποιαδήποτε περίπτωση, ενώ η πίεση έγχυσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το θόρυβο. Στην περίπτωση μειωμένου οξυγόνου τα επίπεδα θορύβου μπορούν να επιτευχθούν με έναρξη έγχυσης μεταξύ -50° ~ -30° κρατώντας τους ρύπους σε αποδεκτά επίπεδα. Τέλος, αναφέρεται ότι ο θόρυβος έχει εξάρτηση κυρίως από την ταχύτητα καύσης του καυσίμου και αυτή είναι που πρέπει να μειωθεί προκειμένου να είναι αποδεκτές οι τιμές θορύβου.

3.1.1.2. Μάζα και έναρξη προ-έγχυσης (Mass & Start of Pilot Injection/MOPI & SOPI) [134]

Η πιλοτική έγχυση καυσίμου σε καύση προανάμειξης PCCI, κατά την οποία, όπως περιγράφηκε παραπάνω, επιτυγχάνεται ταυτόχρονη μείωση NO_x και soot με αμελητέα μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης, εγχέοντας το καύσιμο σε διάστημα προ του ΑΝΣ και με αυξημένο ποσοστό EGR, επιστρατεύεται προκειμένου να μειώσει τα αυξημένα επίπεδα θορύβου που δημιουργούνται. Με την προέγχυση, η καθυστέρηση έναυσης της προέγχυσης αυξάνεται, με αποτέλεσμα συμβαίνει νωρίτερα έτσι ώστε περιορίζεται το ποσοστό της καύσης προανάμειξης της κύριας έγχυσης και οι κρουστικές συμπεριφορές. Στην προσπάθεια μείωσης των NO_x και της ειδικής κατανάλωσης η κύρια έγχυση τοποθετείται σε ένα εύρος -18° ~ -6°, όπως φαίνεται και από τη μελέτη της προηγούμενης παραγράφου, ενώ η προέγχυση τοποθετείται πριν την κύρια έγχυση με στόχο τη μείωση της καθυστέρησης έναυσης και την ελεγχόμενη έναυση, προς αποφυγή του θορύβου του κύριου παλμού.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι όταν η προέγχυση συμβαίνει πολύ νωρίς, μια αρκετά πρόωρη κύρια έγχυση είναι απαγορευτική για την ειδική κατανάλωση, μιας και η καλή ανάμειξη του καυσίμου και η μείωση της

καθυστερήσης έναυσης της προέγχυσης προκαλεί πρόωμη έναυση και γρήγορη διάδοσης φλόγας προανάμειξης, η οποία προκαλεί καύση προ του ΑΝΣ και αποδίδει τη στρεπτική ροπή λάθος στιγμή. Έτσι είναι απαραίτητο η κύρια έγχυση να συμβεί αρκετά αργά, ώστε να μην προλάβει να αναμιχθεί καλά το καύσιμο με τον αέρα, και η φλόγα, που δεν είναι πια εξολοκλήρου προανάμειξης, να καθυστερήσει να δημιουργηθεί ώστε να αποδώσει την ενέργειά της κοντά στο ΑΝΣ, μειώνοντας την ειδική κατανάλωση. Στην περίπτωση αυτή ωστόσο χάνονται τα θετικά αποτελέσματα της PCCI και τα soot είναι αυξημένα, καθώς η προανάμειξη δεν είναι αρκετά καλή. Αντίθετα, όταν η προέγχυση συμβαίνει λίγες μοίρες μετά από αυτές που υπάρχει κίνδυνος διαβροχής του κυλίνδρου (μετά τις -30°) και με την προϋπόθεση σχετικά μικρής MOPI, φαίνεται ότι η καύση καθυστερεί ακόμα κι αν η κύρια έγχυση συμβεί αρκετά νωρίς. Επιτυγχάνονται έτσι συνθήκες προανάμειξης, με αποτέλεσμα τη μείωση των soot, χωρίς να συμβαίνει πρόωρη καύση με αυξημένη ειδική κατανάλωση.

Σχετικά με το θόρυβο τα αποτελέσματα είναι μη αποδεκτά σχεδόν για όλες τις περιπτώσεις. Τα επίπεδα θορύβου σε σχέση με την συμβατική έγχυση είναι υψηλά λόγω του μεγάλου ποσοστού προανάμειξης στο θάλαμο και κατ' επέκταση λόγω του ψηλού ρυθμού αύξησης πίεσης. Ωστόσο κάποιες λύσεις εμφανίζουν βελτιωμένα αποτελέσματα θορύβου σε σχέση με τη PCCI μονής έγχυσης. Γενικότερα φαίνεται ότι υπάρχει μείωση του θορύβου με την αύξηση της MOPI καθώς περισσότερο καύσιμο καίγεται σε χαμηλές πιέσεις και η ταχύτητα καύσης είναι μικρή, κάτι που όμως είναι απαγορευτικό για τη sfoc. Η καλύτερη λύση ως προς τα επίπεδα θορύβου φαίνεται να είναι αυτή που αποτελείται από μια αρκετά πρόωμη προέγχυση και μια έγχυση καυσίμου 6° προ του ΑΝΣ, και ιδιαίτερα με μικρή MOPI, δηλαδή με ένα αρκετά μεγάλο διάστημα DT.

Αντίστοιχη έρευνα [135] αναφέρει ότι ενώ ταχύστροφες τετράχρορες ντιζελομηχανές φλόγας προέγχυσης PCCI και ανακυκλοφορίας καυσαερίων (μηχανές χαμηλής θερμοκρασίας καύσης LTC) δεν μπορούν να εργαστούν με πλήρες φορτίο λόγω του θορύβου, με την ύπαρξη πιλοτικής έγχυσης πριν την προέγχυση, είναι δυνατό να εργαστούν και σε πλήρες φορτίο, και μάλιστα με χαμηλούς ρύπους NO_x και soot. Στο σύνολο των σχετικών ερευνών ωστόσο υπάρχει διαφωνία σχετικά με τις τιμές των παραγόντων της πιλοτικής έγχυσης που ελαχιστοποιούν το θόρυβο.

Στην έρευνα [135] φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η μάζα της προέγχυσης, τόσο αυξάνεται η πίεση και ο ROHR της προέγχυσης, ώστε αυξάνεται και ο θόρυβος της προέγχυσης. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες τη στιγμή της έναυσης, που οδηγούν σε πιο ομαλή αύξηση του ROHR, και σε συνδυασμό με το μειωμένο ποσοστό μάζας της κύριας έγχυσης, οδηγεί σε μικρότερο ROHR κατά την κύρια έγχυση και συνεπώς σε χαμηλότερο θόρυβο. Ταυτόχρονα, όσο νωρίτερη είναι η προέγχυση τόσο μικρότερος ο ROHR και ο θόρυβος της προέγχυσης, λόγω της καλής προανάμειξης, της χαμηλότερης θερμοκρασίας και μικρότερης ταχύτητας καύσης, τόσο αυξημένος είναι όμως και ο ROHR και ο θόρυβος της κύριας έγχυσης λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και απότομης καύσης. Η έρευνα καταλήγει ότι για χαμηλά επίπεδα θορύβου προτιμότερη είναι μια προέγχυση μεγάλης μάζας και πρόωμης έγχυσης ή μια προέγχυση μικρής μάζας κοντά στην κύρια έγχυση.

Αντίστοιχα η έρευνα [136] έδειξε ότι ταυτόχρονη μείωση θορύβου και ρύπων μπορεί να συμβεί με αποδεκτά επίπεδα ειδικής κατανάλωσης με μια αρκετά πρόωμη προέγχυση, η καύση της οποίας γίνεται ομογενώς (Homogenous Charge Combustion Ignition HCCI), και με μια καθυστερημένη κύρια έγχυση, που καίγεται με φλόγα διάχυσης. Η προέγχυση συμβαίνει πάρα πολύ νωρίς ώστε το μίγμα να είναι πλήρως αναμεμιγμένο. Η πολύ πρόωμη προέγχυση και η καύση με φλόγα πλήρους προανάμειξης εξασφαλίζει την ομοιομορφία του μίγματος και την απουσία περιοχών υψηλής συγκέντρωσης καυσίμου, συνεπώς αποφεύγεται ο σχηματισμός soot, ενώ υψηλά ποσοστά EGR σε χαμηλά φορτία εξασφαλίζουν μειωμένο οξυγόνο και χαμηλές θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης και την αποφυγή σχηματισμού θερμικών NO_x .

Η έρευνα [137] αναφέρει ότι μια αρκετά πρόωμη προέγχυση επιτυγχάνει αύξηση της διάρκειας της καύσης, καθώς το καύσιμο αναφλέγεται και αρχίζει να καίγεται σε μικρότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Ταυτόχρονα η θερμοκρασία της καύσης προανάμειξης μπορεί να διατηρηθεί χαμηλή εφόσον το μίγμα είναι καλά ομογενοποιημένο και υπάρχει ανακυκλοφορία καυσαερίων. Όσο αυξάνεται η μάζα της προέγχυσης τόσο μειώνεται η καθυστέρηση έναυσης της κύριας έγχυσης, αφού η θερμοκρασία του θαλάμου είναι μεγαλύτερη, κάτι που οδηγεί σε μια πιο ελεγχόμενη καύση με μικρότερη προανάμειξη καυσίμου. Ωστόσο, με την αύξηση της μάζας προέγχυσης και για διατήρηση του έργου απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και αυξάνεται η sfoc. Τα soot αυξάνονται άνω της συμβατικής έγχυσης αυξανόμενης της μάζας προέγχυσης, λόγω της μειωμένης συγκέντρωσης οξυγόνου στη δεύτερη έγχυση.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η ύπαρξη προέγχυσης μπορεί να ομαλοποιήσει την έναρξη της καύσης, προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος με καλές τιμές παραγωγής NO_x και καλή ειδική κατανάλωση. Όσο νωρίτερη και μεγαλύτερης μάζας είναι η προέγχυση τόσο μειώνονται τα NO_x και ο θόρυβος ενώ αυξάνεται η

ειδική κατανάλωση. Επίσης καλές λύσεις μπορούν να βρεθούν για μικρή μάζα προέγχυσης σε μεγάλη απόσταση από την κύρια έγχυση όταν και η κύρια έγχυση συμβαίνει σχετικά νωρίς προ του ANΣ.

3.1.1.3. Έγχυση πενταπλού παλμού σε καύση πλήρους προανάμειξης/*Five pulse HCCI injection*

Σε μια προσπάθεια για καλύτερο έλεγχο της ομογενοποίησης και της έναρξης της καύσης σε καύσεις πλήρους προανάμειξης έχουν γίνει έρευνες με τριπλούς[144], τετραπλούς, πενταπλούς, εξαπλούς[143] ή ακόμα και οχταπλούς [145] παλμούς έγχυσης καυσίμου, και σε όλες φαίνεται ότι τα NO_x και soot μειώνονται σχεδόν σε μηδενικό επίπεδο, μιας και η καλύτερη προανάμειξη δημιουργεί περιοχές όχι τόσο πλούσιες σε οξυγόνο. Οι συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές για τη δημιουργία θερμικών NO_x και τα καυσαέρια, ενώ οι περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε καύσιμο δεν ευνοούν τη δημιουργία soot, και αυτά που δημιουργούνται έχουν τον απαιτούμενο χρόνο να οξειδωθούν. Το έργο ωστόσο επίσης μειώνεται αρκετά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται αναποδοτικά η ειδική κατανάλωση, σε σύγκριση με μια συμβατική καύση.

Η έρευνα [142] διερευνά την επίδραση ενός πενταπλού παλμού σε μια καύση πλήρους προανάμειξης. Αναφέρει ότι οι 4 πρώτοι παλμοί ωφελούν την καλή προανάμειξη καυσίμου, ενώ ο 5^{ος} ρυθμίζει την ομαλή έναρξη της καύσης. Ο τελευταίος παλμός συμβαίνει σε αρκετά ψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνει να ομογενοποιηθεί και να αναφλέγεται άμεσα ορίζοντας την έναυση και έναρξη της καύσης. Με την αύξηση της μάζας της πρώτης έγχυσης επιτυγχάνεται μείωση του HRR και της πίεσης καύσης και νωρίτερη έναρξη καύσης. Φαίνεται δηλαδή ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του πρώτου παλμού και μικρότερη αυτή των επόμενων τόσο η έναυση καθυστερεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η MOPII, αυξάνεται το ποσοστό πλήρους μίγματος που χρήζει ομογενοποίησης, οπότε αυξάνεται η καθυστέρηση έναυσης και μειώνεται ο ROHR, κάτι που έχει σαν συνέπεια και τη σημαντική μείωση των NO_x. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται η δημιουργία ψυχρής φλόγας και φαίνεται η μεγάλη εξάρτησή της από τη θερμοκρασία του κυλίνδρου και η ανεξαρτησία της από τις μάζες των πρώτων παλμών. Η μεταβλητή που κυρίως επηρεάζει την καύση είναι ο χρονισμός τη κύριας έγχυσης SOI, και η εξάρτηση από τη μάζα της πρώτης έγχυσης είναι μικρή. Σε όλες τις περιπτώσεις ωστόσο, όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του 1^{ου} παλμού τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό του καυσίμου που καίγεται με φλόγα προανάμειξης, και τόσο χαμηλότερος ο ROHR της κύριας και τα NO_x.

Συγκρίνοντας την έγχυση πενταπλού παλμού με καθυστερημένη μικρή 5^η έγχυση, με τη μονή έγχυση HCCI, φαίνεται ότι η καθυστέρηση έναυσης μειώνεται και το μίγμα είναι πιο ετερογενές, όπως αναμένεται, καθώς ποσοστά καυσίμου εγχύονται σε γωνίες στροφάλου πιο κοντά στο ANΣ. Τα επίπεδα ROHR ωστόσο είναι περίπου ίσα καθώς απ' τη μία η αύξηση της ετερογένειας οδηγεί σε αύξηση του ROHR, απ' την άλλη όμως το ποσοστό μάζας καυσίμου που καίγεται στην κύρια καύση είναι μικρότερο. Τα NO_x είναι αισθητά μειωμένα συγκριτικά με μια συμβατική έγχυση είναι όμως ελαφρώς μεγαλύτερα από την έγχυση HCCI μονού παλμού, λόγω μειωμένης ομογενοποίησης μίγματος, του ελαφρώς αυξημένου ROHR και του γεγονότος ότι η καύση συμβαίνει νωρίτερα, οπότε τα καυσαέρια βρίσκονται περισσότερο χρόνο σε ψηλές θερμοκρασίες. Η ειδική κατανάλωση αυξάνεται όσο το καύσιμο εγχύεται και καίγεται απομακρυσμένο από το ANΣ.

Η μελέτη [145] επιχειρεί έγχυση HCCI με οχταπλό παλμό, ξεκινώντας επίσης από τις -100° και με 5° διαφορά στους πρώτους 7 παλμούς και τον 8° κοντά στο ANΣ στις -10°. Τα αποτελέσματα είναι σχετικά απογοητευτικά, καθώς ο τελευταίος παλμός δεν εκπληρώνει το σκοπό του για επιβράδυνση της καύσης και αντ' αυτού καίγεται σχεδόν χωρίς έλεγχο, οδηγώντας σε υψηλά επίπεδα ROHR και NO_x. Λόγω αυτού επιχειρείται ύστερα η μετακίνηση του 8^{ου} παλμού αρχύτερα στις -30° περίπου και η μείωση της μάζας του ώστε να προλάβει να ομογενοποιηθεί. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται μείωση των NO_x, η ειδική κατανάλωση όμως είναι μεγάλη, επομένως μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για μικρά φορτία. Σε μεγαλύτερα φορτία αναφέρει ότι είναι απαραίτητη η ανακυκλοφορία καυσαερίων προκειμένου τα NO_x να είναι επαρκώς μειωμένα.

Σε συμφωνία με τα παραπάνω η μελέτη [158] αναφέρει ότι η προέγχυση πολλαπλών παλμών σε καύση HCCI μπορεί να μειώσει το φαινόμενο της διαβροχής των τοιχωμάτων από καύσιμο κατά την πρόωρη έγχυση, καθώς μικρότερες ποσότητες καυσίμου έχουν μικρότερη ορμή και μικρότερο μήκος εισχώρησης στο θάλαμο καύσης. Ταυτόχρονα επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της καύσης με τον κατάλληλο χρονισμό του τελευταίου παλμού, που βρίσκεται κοντά στο ANΣ. Αναφέρει ότι όσο νωρίτερα συμβαίνει η έγχυση των παλμών τόσο χαμηλότερα είναι τα επίπεδα θορύβου και NO_x, με την προϋπόθεση έγχυσης μεγάλων ποσοτήτων καυσίμου. Σε μεγάλα φορτία αναφέρεται ότι δεν αρκεί η καύση HCCI και απαιτείται έγχυση περισσότερου καυσίμου κοντά στο ANΣ, οδηγώντας σε καύση μερικής προανάμειξης PCCI.

3.1.2. Προέγχιση καυσίμου σε 4-X DI κινητήρες-Μέθοδοι που βασίζονται στη φλόγα διάχυσης

Εφόσον φαίνονται τα οφέλη της πιλοτικής έγχυσης στην καύση προανάμειξης, αντίστοιχα διερευνάται η επίδρασή της σε καύση διάχυσης, όταν δηλαδή δεν υπάρχει καύσιμο παλμού που καίγεται αποκλειστικά μετά το τέλος της έγχυσης του. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι προέγχιση και κύρια έγχυση δε συμβαίνουν πολύ πρόωρα. Από τις έρευνες φαίνεται ότι η ύπαρξη προέγχισης μειώνει τη μέγιστη πίεση καύσης και τον ROHR συγκριτικά με τη μονή έγχυση, και ιδιαίτερα με μια καθυστερημένη έγχυση. Η ύπαρξη της προέγχισης μειώνει την καθυστέρηση έναυσης της κύριας έγχυσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, που παρουσιάζεται σχετικά αυξημένη σε μια καθυστερημένη έγχυση. Η νωρίτερη έναρξη της κύριας καύσης ωστόσο επιδρά αρνητικά στην παραγωγή NO_x, επίδραση όμως που αντισταθμίζεται κάπως λόγω της καλύτερης ομογενοποίησης της πιλοτικής έγχυσης εφόσον αυτή συμβεί αρκετά νωρίς.

Πολλές έρευνες έχουν γίνει για DI 4-X κινητήρες με μία, δύο ή περισσότερες πιλοτικές εγχύσεις, και πολλές καταλήγουν σε αντικρουόμενα αποτελέσματα, γεγονός που καταδεικνύει πόσο ευαίσθητο είναι το πρόβλημα και εξαρτώμενο από είδος ή ακόμα και το μοντέλο του κάθε κινητήρα. [128][139][159][160][140][141][151][182]

3.1.3 Προέγχιση καυσίμου σε ναυτικούς κινητήρες Diesel

Έπειτα από τις έρευνες που έγιναν στην αυτοκινητοβιομηχανία και με πυροδότηση από τους αυστηρότερους κανονισμούς σχετικά με τους ρύπους, από παγκόσμιους και ευρωπαϊκούς οργανισμούς, σταδιακά ξεκίνησαν να γίνονται έρευνες για μείωση των ρύπων της ναυτιλίας με χρήση ηλεκτρονικής έγχυσης ελέγχου πολλαπλού παλμού σε ισχυρούς δίχρονους ναυτικούς κινητήρες. Παρότι οι έρευνες έχουν βάση και ξεκινούν από τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα των ερευνών της αυτοκινητοβιομηχανίας, αυτά δε μεταφέρονται ακριβώς και δεν αναμένεται να έχουν την ίδια συμπεριφορά και στους ισχυρούς κινητήρες, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι οι μεν είναι τετράχρονοι και ταχύστροφοι και οι δε συνήθως δίχρονοι και πιο ογκώδεις.

3.1.3.1. Μετάβαση από ταχύστροφους 4X κινητήρες σε βραδύστροφους 2X [77]

Δύο μηχανές επομένως που θεωρούνται γεωμετρικά όμοιες αλλά αν δεν έχουν ίδιους χρονισμούς, δεν έχουν ούτε ίδια χαρακτηριστικά καύσης. Πρώτα απ' όλα μεγέθη όπως απώλεια ενέργειας λόγω τριβών, απώλεια θερμότητας μέσω τοιχωμάτων, ογκομετρική αποδοτικότητα κ.λπ. δεν μπορούν να θεωρηθούν σταθερά κατά τη σύγκριση δύο μηχανών διαφορετικών μεγεθών, καθώς η βέλτιστη τιμή όλων των παραπάνω εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα του πιστονιού. Οι απώλειες τριβών είναι μειωμένες για χαμηλές ταχύτητες και μικρή διαδρομή εμβόλου, ενώ όσο μικρότερο το πιστόνι, τόσο μικρότερο το ποσοστό του εσωτερικού μίγματος που έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα και μειωμένες οι απώλειες θερμότητας. Από την άλλη, όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του κύκλου, τόσο μικρότερες οι απώλειες θερμότητας σε μια ολοκλήρωση του κύκλου. Οι απώλειες στο περιβάλλον επηρεάζονται από το είδος της μηχανής και το φορτίο διαφορετικά, επομένως δεν μπορεί να εξαχθεί γενικό και καθολικό συμπέρασμα για το πώς μια μελέτη σε 4-X κινητήρα μπορεί έχει ή όχι ομοιότητες στη συμπεριφορά με τα αποτελέσματα σε 2-X κινητήρα.

Δεδομένου ότι η χρονική κλίμακα των χαρακτηριστικών της καύσης αποτυπώνεται και μετράται σε μοίρες στροφάλου, είναι αναμενόμενο η ταχύτητα του στροφαλοφόρου να επηρεάζει τη συσχέτιση γωνιών, χρόνου και καύσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η καύση σε έναν τετράχρονο ταχύστροφο κινητήρα να φαίνεται ότι διαρκεί περισσότερο, μετρημένη σε γωνίες στροφάλου, απ' ότι σε έναν δίχρονο, ενώ στην πραγματικότητα η χρονική διάρκειά της παραμένει σχεδόν σταθερή και εξαρτώμενη από τη χημική κινητική.

Πέραν αυτού όμως, το μέγεθος της μηχανής επηρεάζει και την έγχυση και διασπορά του καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Συγκεκριμένα η διάμετρος των ακροφυσίων είναι ανάλογη με αυτή του εμβόλου, ενώ επίσης ανάλογα με τη διάμετρο του εμβόλου είναι ο βαθμός διάσπασης και διείδυσης των σταγονιδίων στο θάλαμο καύσης, η διάμετρος των σταγονιδίων, καθώς και ο χρόνος εξάτμισής τους. Δεδομένου ότι οι 2-X κινητήρες έχουν έμβολο μικρότερης διαμέτρου, στους 2-X επιτυγχάνεται λεπτότερος διαχωρισμός του σπρέι καυσίμου, μικρότερη διείδυση και γρηγορότερη εξάτμιση.

Ωστόσο, ακριβώς επειδή οι τετράχρονοι μικρότεροι κινητήρες, συγκριτικά με τους βραδύστροφους, καλύπτουν περισσότερες γωνίες στροφάλου σε ίδιους χρόνους, η καθυστέρηση έναυσης, που εξαρτάται από τη χημική κινητική και το χρόνο ολοκλήρωσης των αντιδράσεων διάκλάδωσης και συνεπώς είναι ίση για πραγματικό χρόνο, στους βραδύστροφους κινητήρες φαίνεται μικρότερη μετρημένη σε γωνίες στροφάλου. Ενώσω όμως η καθυστέρηση έναυσης, που εξαρτάται από το χρόνο και τη χημική κινητική, φαίνεται μειωμένη,

η πίεση και η θερμοκρασία, που εξαρτώνται από τις γωνίες στροφάλου, είναι όμοιες. Συνεπώς, για ένα βραδύστροφο κινητήρα, όταν περάσει χρονικό διάστημα ίσο με την καθυστέρηση έναυσης ενός τετράχρονου (το μίγμα είναι καλύτερα αναμειγμένο αλλά θέλει περισσότερο χρόνο για εξάτμιση και ανάφλεξη), ο βραδύστροφος θα βρίσκεται σε μικρότερες γωνίες στροφάλου και σε μικρότερες θερμοκρασίες και πιέσεις, εφόσον η έγχυση και η έναυση μελετώνται προ του ΑΝΣ, και τελικά θα απαιτείται περισσότερος χρόνος προκειμένου να προσεγγιστούν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας έναυσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ακόμα καλύτερη ανάμιξη και ομογενοποίηση του μίγματος και την επάρκεια χρόνου ώστε το καύσιμο να εξατμιστεί, ώστε τελικά, όταν αναφλεγεί, να αναφλεγεί με φλόγα προανάμειξης και κίνδυνο κρουστικών φαινομένων. Αντίθετα, στην περίπτωση που η έγχυση και κυρίως η έναυση συμβαίνουν μετά το ΑΝΣ, για τον ίδιο χρόνο καθυστέρησης έναυσης τετράχρονου κινητήρα, ο βραδύστροφος θα έχει διανύσει λιγότερες γωνίες στροφάλου, συνεπώς το μίγμα θα είναι έτοιμο προς ανάφλεξη σε μικρότερες γωνίες στροφάλου, πιο κοντά στο ΑΝΣ και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πραγματική καθυστέρηση ανάφλεξης να μειώνεται, καθώς οι πιέσεις και θερμοκρασίες ανάφλεξης επιτυγχάνονται πριν το μίγμα θεωρηθεί έτοιμο και ομογενοποιημένο. Τότε, η καύση εκτελείται με πολύ μικρά ποσοστά φλόγας προανάμειξης και κυρίως με διάχυση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερα επίπεδα ROHR και NO_x, αλλά μείωση της SFOC. Είναι σαφές ότι όταν πρόκειται για έγχυση μετά το ΑΝΣ με στόχο τη φλόγα προανάμειξης, για να τελειώσει σε όμοιες γωνίες στροφάλου, πρέπει να εγχυθεί σε μεγαλύτερες γωνίες στροφάλου απ' ό,τι σε έναν 4-Χ. Αναφέρεται ότι η φλόγα προανάμειξης διαδίδεται και περατώνεται σε ίδιους χρόνους σε όλο τον όγκο του θαλάμου ταυτόχρονα (λιγότερες γωνίες στροφάλου για μεγάλες μηχανές), ενώ η φλόγα διάχυσης έχει ίσια ταχύτητα για μικρό και μεγάλο κινητήρα και χρειάζεται περισσότερο χρόνο να διαδοθεί σε έναν μεγαλύτερο κύλινδρο. Έτσι, σε βραδύστροφους κινητήρες, λόγω της φλόγας διάχυσης, η καύση έχει μεγαλύτερη διάρκεια, ακόμα και μετρημένη σε γωνίες στροφάλου, πράγμα που αυξάνει το χρόνο στον οποίο τα καυσαέρια είναι εκτεθειμένα σε υψηλές θερμοκρασίες. Κάτι τέτοιο ωφελεί την παραγωγή NO_x αλλά δίνει χρόνο για την οξειδωση και μείωση των soot. Προκειμένου να επιταχυνθεί η φλόγα διάχυσης και να μειωθεί ο κίνδυνος κρουστικής έναυσης απαιτούνται υψηλά επίπεδα τύρβης, ενώ ωφέλιμη θα ήταν κάποια προέγχυση καυσίμου, προκειμένου να αυξηθούν οι πηγές φλόγας προανάμειξης και να μειωθεί ο χρόνος καθυστέρησης έναυσης.

Παράλληλα αναφέρεται ότι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας επηρεάζεται από την ταχύτητα του πιστονιού, επηρεάζοντας και τις συνθήκες του θαλάμου της καύσης. Ταχύτεροι κινητήρες έχουν λιγότερο χρόνο για απώλεια θερμότητας, με αποτέλεσμα να φτάνουν ψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες πριν την καύση.[170]

3.1.3.2. Πιλοτική έγχυση καυσίμου σε 4Χ ναυτικούς κινητήρες

Μια πιο πρόσφατη έρευνα [147] μελετά την επίδραση της μεταβολής της μάζας προέγχυσης στο εύρος MOPI=5%~25%, της διάρκειας έγχυσης 1°~5° και της έναρξης έγχυσης SOPI=-22°~-18° σε ναυτικό κινητήρα Diesel. Ο κινητήρας σε αυτή την περίπτωση είναι τετράχρονος επομένως τα αποτελέσματα ως προς τους χρονισμούς πιθανότατα να είναι αρκετά κοντά στις λύσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η βέλτιστη λύση ως προς την ειδική κατανάλωση, τα NO_x αλλά και άλλους ρύπους φαίνεται να είναι η [MOPI,SOPI,DOPI]=[20%,-19°,1°], οπότε παρατηρείται μείωση των NO_x κατά 34.7% αλλά αύξηση της sfoc κατά 6.7%. Φαίνεται πάλι ότι μια αύξηση της μάζας προέγχυσης και η μετάθεσή της σε νωρίτερες γωνίες στροφάλου οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση NO_x, λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού καλύτερα προαναμειγμένου καυσίμου, αλλά και σε μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση, λόγω καύσης αρκετά προ του ΑΝΣ. Η έναρξη της προέγχυσης έχει μεγαλύτερη επίδραση στην sfoc από ό,τι έχει η μάζα προέγχυσης, με μια καθυστερημένη προέγχυση να επιφέρει μια μικρότερη sfoc απ' ό,τι μια προέγχυση μικρότερης μάζας, ενώ αντίστοιχη είναι και η επίδραση στα NO_x, τα οποία όμως δεν παρουσιάζουν τόσο απότομη αύξηση με την καθυστέρηση της προέγχυσης όσο μείωση παρουσιάζει η sfoc. Επίσης η πίεση και η διάρκεια της προέγχυσης φαίνεται να επηρεάζει αρκετά την παραγωγή NO_x, με μεγαλύτερες πιέσεις και μικρότερες διάρκειες έγχυσης να αυξάνουν την ομογενοποίηση και να μειώνουν τα NO_x. Η έρευνα παρατηρεί ότι μια διάρκεια προέγχυσης της τάξης της 1° είναι ιδανική, αλλά και αρκετά δύσκολη να επιτευχθεί με τα υπάρχοντα μέσα έγχυσης.

Η έρευνα [148] αναφέρει ότι στην περίπτωση έναρξης κύριας έγχυσης στο εύρος SOI=-12°~-1° και της πιλοτικής έγχυσης σε εύρος SOPI=-18°~-14° και ποσοστό μάζας επί της ολικής MOPI=10%~20%, η πίεση καύσης εμφανίζεται μειωμένη συγκριτικά με την περίπτωση μονής έγχυσης. Με την εφαρμογή πιλοτικής έγχυσης η έναρξη της κύριας καύσης συμβαίνει νωρίτερα και η διάρκεια της καύσης αυξάνεται. Δεδομένου ότι χαμηλότερες πιέσεις προκαλούν και μικρότερες θερμοκρασίες, τα NO_x είναι μειωμένα, ιδιαίτερα όσο αυξάνεται η μάζα της προέγχυσης. Η κύρια διαφορά με τη μονή έγχυση είναι ότι η πιλοτική έγχυση προετοιμάζει το μίγμα και μειώνει την καθυστέρηση έναυσης λόγω καλύτερης ανάμειξης του καυσίμου και

μεγαλύτερης θερμοκρασίας κατά την έναρξη της κύριας έγχυσης. Στην περίπτωση αυτή, επειδή η κύρια έγχυση γίνεται προ του ANΣ, όσο η προέγχυση συμβαίνει νωρίτερα και απομακρύνεται από την κύρια, τόσο αυξάνεται η ειδική κατανάλωση. Ομοίως με τις άλλες έρευνες, και αυτή καταλήγει στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη η μάζα προέγχυσης και όσο νωρίτερα αυτή συμβαίνει, τόσο καλύτερη ανάμειξη καυσίμου επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερα ποσοστά, μειώνοντας την παραγωγή NO_x, καθώς όσο πιο νωρίς συμβαίνει η προέγχυση τόσο αυξάνεται η καθυστέρηση έναυσης της και τόσο περισσότερο χρόνο έχει να σχηματίσει ένα ομογενές μίγμα φτωχό σε καύσιμο. Στην περίπτωση πολύ πρόωρης προέγχυσης αναφέρει ότι υπάρχει κίνδυνος απότομης αύξησης πίεσης, λόγω κίνησης του εμβόλου άνωθεν, και κρουστικών φαινομένων. Τέλος, η έρευνα δείχνει ότι η αύξηση του αριθμού των προεγχύσεων συμβάλλει στη μείωση των NO_x, αλλά αυξάνει την ειδική κατανάλωση, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη μέγιστη πίεση καύσης.

Η έρευνα [149] επίσης μελετά τις επιδράσεις της δικοπτόμενης έγχυσης σε ναυτικό κινητήρα με στόχο τη μείωση των NO_x για την επίτευξη του στόχου Tier III. Αναφέρει ότι οι μετεγχύσεις φαίνεται να έχουν καλύτερη επίδραση στη μείωση των NO_x από ό,τι έχουν οι προεγχύσεις, ενώ σε καμία περίπτωση δεν επιτυγχάνονται οι στόχοι του Tier III χωρίς την ταυτόχρονη εφαρμογή EGR. Σχετικά με την επίδραση των προεγχύσεων στην εξέλιξη της καύσης συγκριτικά με μια μονή έγχυση, αναφέρει ότι μια μικρής μάζας πιλοτική έγχυση σε μικρή απόσταση από την κύρια επηρεάζει την κινητικότητα του μίγματος στο θάλαμο, αυξάνει όμως και την ειδική κατανάλωση καθώς η διεύρυνση του χρόνου των εγχύσεων συχνά απομακρύνει τις καύσεις από το ANΣ και το σημείο καλύτερης απόδοσής της. Ταυτόχρονα η ρευστομηχανική του καυσίμου σε αυτή την περίπτωση πιθανώς επηρεάζει την καύση του καυσίμου. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο εγχύσεων είναι μικρή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα σύγκρουσης των μικρών σταγονιδίων της προέγχυσης, που έχουν εν μέρει εξατμιστεί, με τα μεγαλύτερα της κύριας και σχηματισμού σταγονιδίων μεγάλης διαμέτρου, που έχουν μεγάλη πιθανότητα να παραμείνουν άκαυστα, μειώνοντας το παραγόμενο έργο. Άλλοι μελετητές ωστόσο αναφέρουν ότι το φαινόμενο των συγκρούσεων αυξάνει τη διασπορά και τη διάσπαση των σταγονιδίων, ενώ η αυξημένη πίεση λόγω της προέγχυσης προκαλεί κώνο κύριας έγχυσης μεγαλύτερης διαμέτρου και γρηγορότερης διασποράς, και συνεπώς καλύτερη καύση. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο εγχύσεων είναι μεγάλη, το φαινόμενο σύγκρουσης και συσσωμάτωσης των σταγονιδίων αλλά και η έκταση επικάλυψης των πεδίων των σταγονιδίων των δύο εγχύσεων μειώνεται, με αποτέλεσμα την πιθανώς καλύτερη ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα του θαλάμου. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για δύο σχεδόν ανεξάρτητες εγχύσεις με καλή διασπορά του καυσίμου, χωρίς να απαιτείται απαραίτητα αύξηση της πίεσης έγχυσης. Γενικά η έρευνα καταλήγει ότι επαρκής μείωση NO_x μπορεί να επιτευχθεί με ταυτόχρονη εφαρμογή προεγχύσεων και EGR και μικρή αύξηση της ειδικής κατανάλωσης.

Η έρευνα [152] ερευνά πώς μπορεί η πιλοτική έγχυση να βελτιώσει τα αποτελέσματα εφαρμογής του χρονισμού Miller σε μεσόστροφο ναυτικό κινητήρα. Με το χρονισμό Miller οι βαλβίδες ανταλλαγής αερίων κλείνουν νωρίτερα, με αποτέλεσμα τη μείωση του επιπέδου της θερμοκρασίας όλης της καύσης. Ακριβώς όμως επειδή η θερμοκρασία είναι μειωμένη, η καθυστέρηση καύσης είναι αυξημένη, ώστε αυξάνεται το ποσοστό καύσης προανάμειξης, οι πιέσεις αυξάνονται απότομα σε υψηλά επίπεδα και τελικά αυξάνεται η θερμοκρασία καύσης και τα NO_x. Μικρή ποσότητα πιλοτικής έγχυσης μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση έναυσης της κύριας έγχυσης και το ποσοστό καύσης προανάμειξης της κύριας έγχυσης. Η μελέτη γίνεται για SOI=2° , οπότε η προσθήκη της προέγχυσης φαίνεται να βελτιώνει την αποδοτικότητα του κύκλου, όπως συμβαίνει και στην έρευνα [146], χωρίς όμως μείωση των NO_x. Παρατηρείται επίσης ότι όσο αυξάνεται η DT τόσο αυξάνεται η μέγιστη πίεση της καύσης προανάμειξης της προέγχυσης, κάτι που όμως δε φαίνεται να επιδεινώνει την παραγωγή NO_x. Αντίθετα με την αρχική υπόθεση της έρευνας ότι η καύση προανάμειξης οδηγεί σε αύξηση των NO_x, φαίνεται ότι τελικά ο χρονισμός της έγχυσης και όχι η μέγιστη πίεση καύσης προανάμειξης επηρεάζει την παραγωγή τους. Στη συγκεκριμένη μελέτη φαίνεται ότι ένα DT=10° είναι το βέλτιστο για τη μείωση των NO_x και της SFOC.

3.1.3.3. Πιλοτική έγχυση καυσίμου σε 2X ναυτικούς κινητήρες

Η έρευνα [146] μελετά την επίδραση πιλοτικής έγχυσης σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel, συγκρίνοντάς την με την καύση που συμβαίνει για έγχυση με μονό παλμό. Ο μονός παλμός στην περίπτωση βραδύστροφου δίχρονου κινητήρα τοποθετείται μετά το ANΣ και θεωρείται καθυστερημένη έγχυση, που στόχο έχει τη μείωση των NO_x και της κρουστικής καύσης. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, λόγω της μειωμένης ταχύτητας του κινητήρα αλλά και του μεγάλου όγκου του θαλάμου του, η έναυση του καυσίμου, που βασίζεται στη χημική κινητική και εξαρτάται από τις συνθήκες και τη χρονική στιγμή της έγχυσης, προηγείται της καλής ανάμειξης και ομογενοποίησης του καυσίμου με τον αέρα του θαλάμου. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχει κίνδυνος κρουστικής έναυσης, ο οποίος αποφεύγεται με μείωση του λόγου συμπίεσης και με καθυστερημένη έναυση. Συνεπώς η μονή έγχυση τοποθετείται στις 2° μετά το ANΣ.

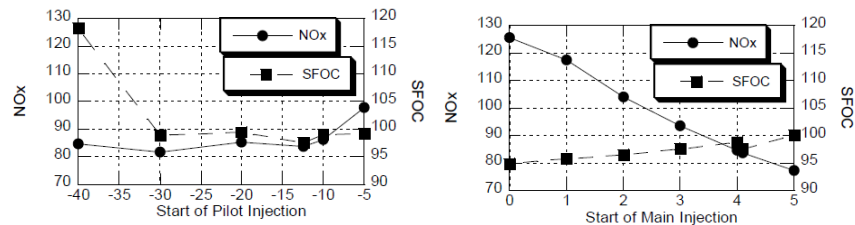
Η πιλοτική έγχυση, που επιχειρεί την αύξηση της ομογενοποίησης του καυσίμου με στόχο χαμηλότερους ρύπους χωρίς την αύξηση της ειδικής κατανάλωσης, τοποθετείται με το MOPI=10% της ολικής μάζας έγχυσης προ του ANΣ σε εύρος SOPI=-20° ~-5° και μεταβαλλόμενη πίεση έγχυσης, ενώ η κύρια έγχυση διατηρείται σταθερή στις SOI=2°. Τα εύρη αυτά προσομοιάζουν σε μία από τις καλές λύσεις της έρευνας [135], στην οποία φαίνεται ότι μικρή πιλοτική έγχυση κοντά στην κύρια έγχυση εμφανίζει καλά συνολικά αποτελέσματα. Στην παρούσα περίπτωση, το ωφέλιμο έργο μειώνεται όσο η πιλοτική έγχυση καθυστερεί, με τη μικρότερη να παρουσιάζεται για SOPI=-5°, ενώ για SOPI=-15° το έργο παρουσιάζει τοπικό μέγιστο και ιδιαίτερα για έγχυση με μέση πίεση. Σε κάθε υπολογιζόμενη περίπτωση το έργο είναι μεγαλύτερο αυτού της μονής έγχυσης, κάτι που σημαίνει ότι σε κάθε περίπτωση η ειδική κατανάλωση είναι μειωμένη. Σχετικά με τα NO_x τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο καλά όπως συμβαίνει και με τις έρευνες στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς σε κάθε περίπτωση είναι περισσότερα από αυτά της μονής έγχυσης. Από τα αποτελέσματα των πιλοτικών εγχύσεων φαίνεται ότι όσο νωρίτερα συμβαίνει η έγχυση τόσο χαμηλότερα είναι τα NO_x, με μέγιστη παραγωγή να συμβαίνει στις SOPI=-5° και ελάχιστη στις SOPI=-15°. Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν και με τα αποτελέσματα της έρευνας [137], και οφείλονται στο γεγονός ότι όσο νωρίτερα γίνεται η έγχυση τόσο καλύτερη είναι η προανάμειξη και μικρότερη η παραγωγή NO_x από αυτή την ποσότητα καυσίμου. Ωστόσο παραμένει γεγονός ότι η μέγιστη θερμοκρασία και πίεση καύσης είναι αυξημένα λόγω της πιλοτικής καύσης προ του ANΣ με αποτέλεσμα την παραγωγή NO_x λόγω έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια γίνονται δοκιμές προκειμένου να εξαχθούν τα αποτελέσματα NO_x και sfoc για την περίπτωση σταθερού έργου ίσου με την περίπτωση αναφοράς. Για την επίτευξη αυτού του στόχου μειώνεται επαρκώς η μάζα και της πιλοτικής και της κύριας έγχυσης. Προκύπτει τότε ότι για σταθερό έργο τα NO_x είναι χαμηλότερα κατά 1.1% και η sfoc κατά 1.7% της περίπτωσης αναφοράς. Τα οπτικοποιημένα διαγράμματα και οι χάρτες T-φ της λύσης αυτής δείχνουν ότι η πιλοτική έγχυση είναι πλήρως ομογενοποιημένη πριν την έναρξη της καύσης της, ενώ η πιλοτική καύση έχει τελειώσει πριν αρχίσει η καύση της κύριας έγχυσης. Συνεπώς η πιλοτική έγχυση συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του θαλάμου με στόχο τη μείωση καθυστέρησης έναυσης της κύριας έγχυσης, και όχι στη διάδοση της φλόγας.

Σε συνέχεια της παραπάνω εργασίας έγιναν προσπάθειες [154] για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος ως προς τη μείωση των NO_x και της sfoc σε ένα εύρος SOPI=-40° ~-5° , SOI=1° ~5° και MOPI=4%~20%. Φαίνεται ότι υπάρχουν αρκετές λύσεις που μειώνουν ταυτόχρονα λιγότερο ή περισσότερο και την ειδική κατανάλωση και τα NO_x. Οι περισσότερες λύσεις από αυτές ωστόσο, συνοδεύονται και από αύξηση στη μέγιστη πίεση καύσης, κάτι που σημαίνει ότι δεν μπορούν να υλοποιηθούν χωρίς ταυτόχρονη μείωση της μάζας καυσίμου και συνεπώς του φορτίου. Μια καλή λύση που ταυτόχρονα μειώνει όλες τις παραμέτρους είναι η [MOPI,SOPI,SOI]=[10.3%,-31°,3.7°], με ταυτόχρονη μείωση 3.7% της μάζας καυσίμου. Οι περισσότερες 'καλές' λύσεις βρίσκονται σε περιοχή SOPI=-30°, MOPI=10%~15% και SOI=3.4°~4.5°, οπότε η προέγχυση καίγεται εντελώς πριν την έγχυση της κύριας καύσης. Η καύση της πιλοτικής έγχυσης προ του ANΣ είναι αυτή που αυξάνει την πίεση, μειώνοντας και την ειδική κατανάλωση. Η κύρια έγχυση είναι καθυστερημένη σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, γεγονός στο οποίο οφείλονται οι χαμηλές θερμοκρασίες καύσης και τα μειωμένα NO_x. Η πρόωγη προέγχυση, σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας δεν βοηθάει την ταχεία αεριοποίηση και έναυσή του, δίνοντας χρόνο για την καλύτερη κατανομή του καυσίμου στο θάλαμο. Ωστόσο υπάρχει κίνδυνος για την επικάλυψή του στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Κατά την προσπάθεια εύρεσης βέλτιστης λύσης με ταυτόχρονη διατήρηση της πίεσης κάτω των 150bar προέκυψαν δύο καλές λύσεις με παρόμοια μάζα προέγχυσης και έναρξη κύριας έγχυσης αλλά διαφορετική SOPI: [MOPI,SOPI,SOI]=[11.6%,-35° ή -12.4°, 3.6° ή 3.7°]. Τέλος, αναφέρεται ότι με επιβολή ταυτόχρονου περιορισμού πίεσης και αποδιδόμενου έργου ανά κύκλο, η μείωση των NO_x είναι μικρότερη, της τάξης του 10%, με παράλληλη διατήρηση της SFOC.

Η έρευνα [153][155], που αποτελεί μια ακόμα προέκταση των παραπάνω ερευνών, επιχειρεί την εύρεση της βέλτιστης λύσης για μείωση NO_x και sfoc, με ταυτόχρονη διατήρηση της μέγιστης πίεσης p_{max}=150bar σε αποδεκτά επίπεδα και σε εύρη SOPI=-40° ~-7° , SOI=-3° ~5° και MOPI=4%~20%. Φαίνεται ότι μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη μείωση NO_x και sfoc για [MOPI,SOPI,SOI]=[10.94%,-7.48°,-0.58°], αλλά οι μειώσεις αυτές είναι πολύ μικρές. Οποιαδήποτε περαιτέρω μείωση των NO_x, και όχι μεγαλύτερη του 30%, συνοδεύεται από μικρή αύξηση στην ειδική κατανάλωση και απαντάται σε λύσεις με νωρίτερη προέγχυση και στην πλειονότητά τους με μεγαλύτερο ποσοστό μάζας προέγχυσης. Τα αποτελέσματα αυτά, και κυρίως η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων σε μεταβολές των μεταβλητών συνάδει με τα αποτελέσματα της πλειονότητας των ερευνών, σύμφωνα με τις οποίες αρχίτερες και μεγαλύτερες πιλοτικές εγχύσεις μειώνουν τα NO_x αλλά αυξάνουν την ειδική κατανάλωση. Αναφέρεται ότι στην 'καλή' λύση [MOPI,SOPI,SOI]=[15.59%,-35.26°,4.04°], όπου παρουσιάζεται μείωση 15% των NO_x με μικρή αύξηση της ειδικής κατανάλωσης, η θερμοκρασία κατά την προέγχυση είναι τόσο χαμηλή και η καθυστέρηση έναυσής

της τόσο μεγάλη ώστε καύσιμο επικάθεται στα τοιχώματα του κυλίνδρου δημιουργώντας υγρό φιλμ, το οποίο διαλύεται στο λιπαντικό και κατά την καύση του καταπονεί τα εξαρτήματα της μηχανής. Συνεπώς φαίνεται ότι η στρατηγική καύσης προανάμειξης πιλοτικής έγχυσης σε συνδυασμό με καύση διάχυσης της κύριας πιθανώς δεν μπορεί να επιτευχθεί με μονή πιλοτική έγχυση. Επίσης αποδεικνύεται ότι για λειτουργία σε πλήρες φορτίο δεν μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη μείωση NO_x και sfoC, καθώς οποιαδήποτε μείωση στη sfoC, που προκύπτει από τη μετακίνηση της κύριας έγχυσης πιο κοντά στο ANΣ, επιφέρει μικρή αύξηση NO_x , ενώ και η μέγιστη πίεση είναι αυξημένη. Η μελέτη ευαισθησίας των μεταβλητών δείχνει ότι μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα έχουν οι χρονικές στιγμές έναρξης των εγχύσεων και όχι τόσο οι μάζες. Παρότι τα αποτελέσματα της έρευνας δεν είναι θεαματικά, είναι μια σαφής απόδειξη ότι η πιλοτική έγχυση ευεργετεί την καύση ακόμα και σε δίχρονους ισχυρούς κινητήρες.



Εικόνα 55: Επίδραση του χρονισμού των εγχύσεων σε NO_x και ειδική κατανάλωση σε δίχρονο ναυτικό κνητήρα[155].

Εφορμόμενη από το καλό πεδίο λύσεων που υπαγορεύει μια πιλοτική έγχυση καυσίμου $\text{MOPI}=10\%\sim 15\%$ με $\text{SOPI}\sim 30^\circ$ και $\text{SOI}\sim 4^\circ$ γίνεται μελέτη για βελτιστοποίηση έγχυσης σε καύση μερικής προανάμειξης PPCI (Partially Premixed Compression Ignition) σε δίχρονο ισχυρό κνητήρα, ίδιο με τις παραπάνω μελέτες [161]. Αντίστοιχα με τις ταχύστροφες μηχανές η καύση PPCI στοχεύει στην καλύτερη ανάμειξη του καυσίμου και σε χαμηλότερους λόγους καυσίμου-αέρα και θερμοκρασίας στο θάλαμο καύσης. Στη μελέτη αυτή δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη γωνία έγχυσης του spray προκειμένου να αποφευχθεί η διαβροχή των τοιχωμάτων με καύσιμο, κίνδυνος που εγκυμονεί σε πρόωρες εγχύσεις. Διαφορετική γωνία έγχυσης πιλοτικού και κύριου παλμού μπορεί να επιτευχθεί με ύπαρξη διπλής βαλβίδας έγχυσης σε κάθε κύλινδρο, όπως αυτών σε μηχανές διπλού καυσίμου. Οι θέσεις των ακροφυσίων σε αυτή την περίπτωση θεωρούνται ίδιες, αλλά η γωνίες έγχυσης πιλοτικού και κύριου παλμού διαφέρουν με τη διαφοροποίηση της γωνίας έγχυσης της κάθε οπής του κάθε ακροφυσίου. Συγκεκριμένα, προκειμένου το καύσιμο της πιλοτικής έγχυσης να μην προσκρούσει στα τοιχώματα, η έγχυσή του πρέπει να γίνει με κατεύθυνση κυρίως προς το έμβολο (μεγαλύτερη γωνία στο κατακόρυφο επίπεδο), ενώ η γωνία στο οριζόντιο επίπεδο πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε να δημιουργηθεί η κατάλληλη περιδίνηση, που θα ομογενοποιήσει γρηγορότερα το μίγμα. Οι γωνίες έγχυσης του κύριου παλμού διατηρήθηκαν όπως και στην περίπτωση αναφοράς, δηλαδή σχετικά μεγάλες γωνίες σε οριζόντιο επίπεδο (κάθετο στην κίνηση του εμβόλου) και σε μεγάλο εύρος τιμών για την κάθε οπή, και μικρές γωνίες στο κατακόρυφο. Για την πιλοτική έγχυση από προγενέστερη έρευνα έχει βρεθεί ότι καλύτερα αποτελέσματα σε NO_x και εξαγόμενο έργο δίνουν σχετικά μικρές οριζόντιες γωνίες αντίστροφης φοράς από την κύρια έγχυση και όμοιες σχεδόν για την κάθε οπή [162].

Ταυτόχρονα με την εύρεση του βέλτιστου χρονισμού και μάζας έγχυσης έγινε και η μελέτη των αντίστοιχων αποτελεσμάτων για διάφορες τιμές της κατακόρυφης γωνίας των οπών. Τα εύρη που μελετήθηκαν είναι παρόμοια με αυτά των παραπάνω μελετών: $\text{MOPI}=4\%\sim 20\%$, $\text{SOPI}=-40^\circ \sim -5^\circ$ και $\text{SOI}=1^\circ \sim 5^\circ$. Αποδεικνύεται πάλι ότι η αύξηση της μάζας της προέγχυσης μειώνει και την παραγωγή των NO_x αλλά και την ειδική κατανάλωση, με μικρή μείωση του έργου. Συνεπώς για τη βέλτιστη λύση ($\text{MOPI}, \text{SOPI}, \text{SOI}=(16\%, -35^\circ, 3.72^\circ)$) μελετήθηκαν οι πιθανές κατακόρυφες γωνίες έγχυσης. Δε φαίνεται να υπάρχει κάποιος σαφής κανόνας που διέπει τη συμπεριφορά των αποτελεσμάτων NO_x και SFOC ως προς τη μεταβολή της κατακόρυφης γωνίας και μάλιστα αποδεικνύεται ότι η επίδρασή της στα αποτελέσματα αφορά κυρίως το έργο, με την έννοια ότι μπορούν να επιτευχθούν παρόμοια αποτελέσματα NO_x και SFOC από ό,τι στην περίπτωση μικρών κατακόρυφων γωνιών έγχυσης αλλά σε μεγαλύτερο φορτίο μηχανής ιδιαίτερα στην περίπτωση που δεν επιβάλλεται περιορισμός ως προς τη μέγιστη πίεση. Από οπτικοποιήσεις της καύσης φαίνεται ότι πράγματι μεγαλύτερες κατακόρυφες γωνίες έγχυσης και με εύρος $[12.5^\circ, 52.5^\circ]$ για την κάθε οπή βοηθάν στην καλύτερη διασπορά του καυσίμου σε όλο το διαθέσιμο όγκο του θαλάμου και η πρόσκρουση και επικάθιση στα τοιχώματα αποφεύγεται. Παράλληλα η έναυση συμβαίνει μακριά από τα τοιχώματα και λόγω καλύτερης προανάμειξης οι τοπικές θερμοκρασίες καύσης είναι μειωμένες με αποτέλεσμα μηδενική παραγωγή NO_x και soot κατά την καύση προανάμειξης της πιλοτικής έγχυσης. Η μη διαβροχή των τοιχωμάτων για μεγάλες γωνίες έγχυσης επιτρέπει τη μεταφορά της πιλοτικής έγχυσης σε νωρίτερες γωνίες στροφάλου. Η ωφέλεια της κατακόρυφης έγχυσης φαίνεται κυρίως κατά τη μελέτη του προβλήματος με περιορισμό στην πίεση $p_{\text{max}}=150$

bar και στο ελάχιστο έργο. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα σε NO_x και SFOC είναι πολύ καλύτερα από την αντίστοιχη έγχυση με μικρότερες γωνίες, ώστε τελικά μπορεί να επιτευχθεί μείωση των NO_x άνω του 15% με ταυτόχρονη μείωση της μέγιστης πίεσης και μικρή μείωση της SFOC σε πλήρες φορτίο.

Σε μια προσπάθεια μελλοντικής μετάβασης σε 'καθαρότερα' καύσιμα, στον τομέα των κινητήρων αυτανάφλεξης Diesel, η πιλοτική έγχυση μπορεί να βοηθήσει στη συνεργασία φυσικού αερίου, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, αέριο που αυταναφλέγεται σε ψηλότερες θερμοκρασίες, με πιο εύφλεκτα καύσιμα. Η έρευνα [156] αναφέρει ότι μια πιλοτική έγχυση πετρελαίου μπορεί να δημιουργήσει τη φλόγα που θα πυροδοτήσει την καύση της μετέπειτα κύριας έγχυσης φυσικού αερίου, η οποία πραγματοποιείται σε υψηλές τιμές πίεσης έγχυσης. Αυτό το είδος καύσης αναφέρεται ότι μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα της καύσης συγκριτικά με τις περιπτώσεις καύσης diesel, να μειώσει τους ρύπους, καθώς και να μειώσει το θόρυβο και τα κρουστικά φαινόμενα του κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή, ο κινητήρας δουλεύει είτε με καύσιμο HFO, το οποίο εγχέεται από τους εγχυτήρες πιλοτικής έγχυσης, είτε με συνδυασμό HFO ή MDO με φυσικό αέριο, οπότε το βαρύτερο καύσιμο εγχέεται από του πιλοτικούς εγχυτήρες και όταν η φλόγα της πιλοτικής έγχυσης φτάσει μπροστά από τους εγχυτήρες φυσικού αερίου, αυτό εγχέεται στο θάλαμο καύσης και αναφλέγεται με τη φλόγα της προέγχυσης. Μείωση των NO_x επιτυγχάνεται με καθυστέρηση της έγχυσης, όπως συμβαίνει και με τις συμβατικές εγχύσεις diesel, καθώς η καύση συμβαίνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, με ταυτόχρονη αύξηση της ειδικής κατανάλωσης. Και σε αυτή την περίπτωση, η καλή προανάμειξη του φυσικού αερίου πριν την καύση του με φλόγα μερικής προανάμειξης, που επιτυγχάνεται με πρόωρη έγχυση φυσικού αερίου και καθυστερημένη πιλοτική έγχυση, μειώνει την παραγωγή NO_x, ταυτόχρονα με τη μείωση των soot. Αντίστοιχες έρευνες [157] σε 4X κινητήρες και σε νωρίτερες μοίρες στροφάλου αναφέρουν ότι όσο μεγαλύτερη και νωρίτερη είναι η πιλοτική έγχυση diesel τόσο μειώνεται η sfoC αλλά αυξάνονται τα NO_x.

Μηχανές διπλού καυσίμου DF με πιλοτική έγχυση αυταναυφλέξιμου καυσίμου και κύρια έγχυση μεθανόλης κυκλοφορούν ήδη στην αγορά αλλά είναι ακόμα νέο εγχείρημα.

3.2. Μετέγχυση καυσίμου/ Post Injection

Αντίστοιχα με την πιλοτική έγχυση, η μετέγχυση είναι μια μικρή ποσότητα καυσίμου που εγχέεται μετά την κύρια έγχυση. Η καύση με μετέγχυση χαρακτηρίζεται από τις μεταβλητές έναρξη κύριας έγχυσης SOI, έναρξη μετέγχυσης SOPoI ή τη χρονική διαφορά σε μοίρες της έναρξης κύριας έγχυσης και μετέγχυσης DT, καθώς και το ποσοστό της μάζας του καυσίμου της μετέγχυσης επί της ολικής μάζας έγχυσης. Οι μελέτες για βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μετέγχυσης και κατανόηση των κανόνων που διέπουν την επιρροή τους στα αποτελέσματα ξεκινούν από τις αρχές της δεκαετίας του '90. Σε αντίθεση με την πιλοτική έγχυση, που αρχικά μελετήθηκε σαν μέθοδος μείωσης του θορύβου σε καύσεις προανάμειξης σε κινητήρες της αυτοκινητοβιομηχανίας, η μετέγχυση μελετήθηκε κυρίως για τη μείωση των soot, που μαζί με τα NO_x είναι το κύριο μειονέκτημα των κινητήρων diesel. Οι έρευνες βέβαια και σε αυτή την περίπτωση πυροδοτήθηκαν από την ανάγκη συμμόρφωσης σε επικείμενους τότε κανονισμούς σχετικά με τα soot, κυρίως πάλι στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας.

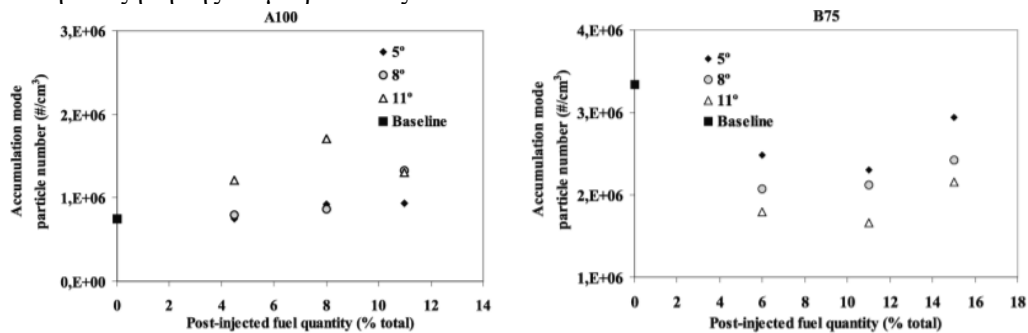
Οι περισσότερες έρευνες [163] αποδεικνύουν ότι μείωση των soot μπορεί επιτευχθεί, χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση των NO_x. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα καθώς, με τη διακοπτόμενη έγχυση, οι περιοχές πλούσιες σε καύσιμο, όπου δημιουργούνται τα soot, δεν τροφοδοτούνται συνεχόμενα, με αποτέλεσμα τη διακοπή της εκτεταμένης συσσωμάτωσης ατόμων άκαυστου άνθρακα. Παράλληλα η μετέγχυση συμβαίνει σε ένα περιβάλλον με αυξημένη θερμοκρασία λόγω της προηγούμενης καύσης της κύριας έγχυσης, με αποτέλεσμα την ταχύτερη καύση του και την αποφυγή δημιουργίας soot. Μάλιστα, οι διακοπτόμενες εγχύσεις, και ιδιαίτερα αυτές με μικρό διάστημα μεταξύ τους, αυξάνουν την τύρβη και ευνοούν την ομογενοποίηση του μίγματος, με αποτέλεσμα την αποφυγή δημιουργίας περιοχών πλούσιων σε καύσιμο. Η έρευνα [170] υποστηρίζει ότι η καλύτερη ανάμειξη του καυσίμου που δημιουργείται λόγω διακοπτόμενης έγχυσης είναι αυτή που βοηθάει στην οξείδωση των soot της κύριας έγχυσης και οδηγεί στη μείωσή τους, ενώ η επίδραση της αυξημένης θερμοκρασίας στην παραγωγή τους δεν μπορεί να αποδειχθεί εύκολα πειραματικά. Παράλληλα αναφέρεται ότι κάποιιοι ερευνητές αποδίδουν τη μείωση των soot στη διάρκεια της κύριας έγχυσης. Στην περίπτωση αυτή, μειωμένη διάρκεια κύριας έγχυσης, συνεπώς αυξημένη μάζα μετέγχυσης, οδηγεί σε μείωση των soot, ιδιαίτερα όταν οι δύο εγχύσεις βρίσκονται πολύ κοντά (Closed Coupled Injections). Οι καύσεις τότε των δύο παλμών συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα, αλλά σε διαφορετικά σημεία του θαλάμου και χωρίς να επηρεάζει η μία την άλλη, αποφεύγοντας την τοπική υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας και επιτυγχάνοντας παροχή οξυγόνου και στις δύο καύσεις. Η διάρκεια της έγχυσης επίσης υποστηρίζεται ότι επηρεάζει την παραγωγή των soot, καθώς η άκρη του άξονα του jet, που καίγεται σε υψηλές αναλογίες καυσίμου και όπου δημιουργείται ποσοστό των soot, ανατροφοδοτείται για λιγότερο χρόνο όταν η έγχυση έχει

μικρή διάρκεια. Η ερμηνεία αυτή ίσως εξηγεί και το γιατί η μετέγχυση δεν είναι τόσο αποδοτική στη μείωση των soot για μεγάλα φορτία, όπου το jet έχει σχετικά μεγάλη διάρκεια. Γενικότερα, στο σύνολό τους οι έρευνες δε συμφωνούν απόλυτα, κι αυτό αποτελεί ένδειξη της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων στις εκάστοτε συνθήκες.

3.2.1. Μετέγχυση σε 4X κινητήρα

Σχετικά με τις λύσεις που αποδίδουν καλά αποτελέσματα υπάρχει ένα πλήθος ερευνών, που ωστόσο αδυνατούν να βρουν την κοινώς κατάλληλη απόσταση και μάζα της μετέγχυσης. Οι περισσότερες έρευνες καταλήγουν ότι μια μετέγχυση κοντά στο τέλος τη κύριας έγχυσης επιφέρει μεγαλύτερη μείωση στα soot απ' ό,τι μια πιο μακρινή [170]. Οι μελετητές [172] υποστηρίζουν ότι έγχυση μικρής μάζας μετά την κύρια έγχυση έχει σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση της καύσης, ώστε αυτή τελειώνει ακόμα νωρίτερα κι από το μονό παλμό. Οι αυξημένες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται τότε μειώνουν αποτελεσματικά τα soot και την ειδική κατανάλωση, αυξάνουν όμως τα NO_x. Η προγενέστερη έρευνα [164] φαίνεται να αποδεικνύει ότι τα soot μπορούν να μειωθούν χωρίς την αύξηση των NO_x και της ειδικής κατανάλωσης για μάζα και έναρξη μετέγχυσης (MOPoI, SOPoI)=(10%~30%,15°). Παράλληλα η έρευνα [167] φαίνεται να αποδεικνύει ότι η ιδανική απόσταση μεταξύ των εγχύσεων είναι DT=25°. Η έρευνα [168] αποδεικνύει ότι ο διπλός ή τριπλός καθυστερημένος παλμός έγχυσης μπορεί να μειώσει τα NO_x, χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση των soot. Αντίθετα, η έρευνα [169] υποστηρίζει ότι στο μεσοδιάστημα κύριας έγχυσης και μετέγχυσης δημιουργούνται υψηλές θερμοκρασίες που ευνοούν την παραγωγή και την αύξηση των NO_x, με ταυτόχρονη οξείδωση και μείωση των soot. [58]

Η έρευνα [163] μελετά την επίδραση της μάζας και του χρονισμού της μετέγχυσης σε έναν τετράχρονο ισχυρό κινητήρα της αυτοκινητοβιομηχανίας, διατηρώντας σταθερή την έναρξη της κύριας έγχυσης SOI=-9° και μεταβάλλοντας την έναρξη της μετέγχυσης σε ένα εύρος SOPoI=-4°~2° και τη μάζα σε εύρος MOPoI=4.5%~11% για πλήρες φορτίο. Στο σημείο αυτό να παρατηρηθεί ότι η τιμή της έναρξης της κύριας έγχυσης συνάδει με τα αποτελέσματα για αυτή των μελετών της πιλοτικής έγχυσης. Από την έρευνα αυτή φαίνεται ότι για σταθερή έναρξη μετέγχυσης η αύξηση της μάζας της προκαλεί αύξηση των soot, ενώ αύξησή τους προκαλεί και η αύξηση της καθυστέρησης της μετέγχυσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των soot είναι μεγαλύτερος από αυτόν της μονής έγχυσης, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι σε πλήρες φορτίο η ταχύτητα είναι μειωμένη και υπάρχει απαραίτητος χρόνος για την οξείδωση των soot και την καλή καύση χωρίς την ύπαρξη μετέγχυσης. Η ωφέλεια της μετέγχυσης στην παραγωγή των soot φαίνεται σε χαμηλότερα φορτία, οπότε η συμπεριφορά τους ως προς τη μάζα είναι παρόμοια, αλλά αλλάζει ως προς το χρονισμό, οπότε και αύξηση στην καθυστέρηση μειώνει τα soot. Σε όλες τις περιπτώσεις ωστόσο φαίνεται ότι η αύξηση της μάζας μετέγχυσης έχει σαν αποτέλεσμα και την αύξηση του αριθμού των soot αλλά και την αύξηση της διαμέτρου τους.

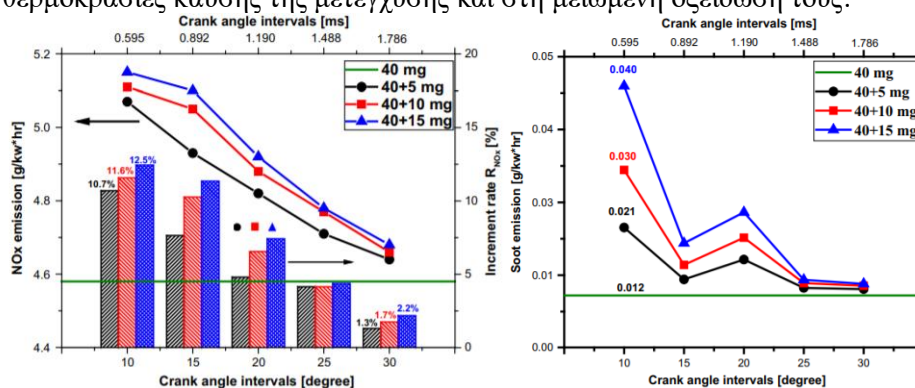


Εικόνα 56: Επίδραση της μάζας μετέγχυσης στην παραγωγή σωματιδίων αιθάλης για διαφορετική έναρξη μετέγχυσης σε τετράχρονο ελαφρύ κινητήρα [163].

Η έρευνα [165] μελετά την περίπτωση καύσης προανάμειξης με ταυτόχρονη ανακυκλοφορία καυσαερίων σε ταχύστροφο κινητήρα αυτοκινήτου σε μέσο φορτίο, με την κύρια έγχυση να συμβαίνει αρκετά νωρίς και μια μετέγχυση ελέγχου της καύσης μετά το ANΣ, με σκοπό την ταυτόχρονη μείωση NO_x, soot, SFOC και θορύβου. Η μελέτη έγινε σε εύρος SOI=-11°~4° και SOPoI=6°~14°, όπου η κύρια έγχυση καθυστερεί να αναφλεγεί και προλαβαίνει να αναμειχθεί λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν λόγω ψύξης EGR. Σε υψηλότερα φορτία (mode 1) διατηρήθηκε η SOI=-6.6° και η MOPoI=40%. Το καύσιμο της πρώτης έγχυσης παρατηρείται ότι αναφλέγεται μετά το τέλος της έγχυσης του, καίγεται με φλόγα προανάμειξης αρκετές μοίρες μετά το ANΣ, ενώ παρατηρείται και η εμφάνιση ψυχρής φλόγας. Οι φλόγες αυτές δημιουργούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λόγω καλής ανάμειξης και συνεπώς χαμηλά NO_x και soot.

Η δεύτερη έγχυση συμβαίνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις απ' ό,τι η πρώτη, συνεπώς η καθυστέρηση έναυσης είναι μικρότερη και η ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα του θαλάμου μικρότερη. Αναφέρεται ότι ο θόρυβος είναι μειωμένος λόγω της χαμηλής ταχύτητας των αντιδράσεων, που οφείλεται στις χαμηλές θερμοκρασίες και στην έλλειψη οξυγόνου λόγω της EGR. Όσο καθυστερημένη είναι η καύση (both 1st and 2nd injection) μετά του ANΣ τόσο μειώνονται και τα NO_x και τα soot λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας στην οποία συμβαίνει η καύση, παρά το μειωμένο χρόνο που παρέχεται στα soot για οξείδωση προτού την απελευθέρωσή τους. Ωστόσο η καθυστέρηση δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη, διότι αν η θερμοκρασία κατά την έγχυση του τελευταίου παλμού είναι υπερβολικά μικρή υπάρχει κίνδυνος διαβροχής των τοιχωμάτων και ελλιπής εξάτμιση και καύση του καυσίμου. Ταυτόχρονα λόγω της πραγματοποίησης της καύσης μακριά από το ANΣ η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται με την καθυστέρηση της έγχυσης. Η επίδραση του χρόνου μεταξύ των εγχύσεων έχει παρόμοια αποτελέσματα στην παραγωγή soot και στην ειδική κατανάλωση, ενώ αυξάνει ελάχιστα τα NO_x και το θόρυβο, λόγω της ελαφρώς πιο απότομης αύξησης του ROHR. Η μέγιστη πίεση στην περίπτωση μετέγχυσης καθορίζεται από τον πρώτο παλμό έγχυσης, επομένως δε μεταβάλλεται με τη μεταβολή του DT. Γενικά για τη μείωση του θορύβου η έρευνα αναφέρει ότι, ενώ υπό άλλες συνθήκες η πιλοτική έγχυση θα ήταν ευεργετική, σε αυτή την περίπτωση θα μείωνε το ποσοστό του καυσίμου που καίγεται με προανάμειξη, κάτι που δεν είναι επιθυμητό, για τη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών. Για τη μείωση της έντασης της καύσης προανάμειξης, που είναι και η αιτία του θορύβου, είναι απαραίτητη η καθυστέρηση της κύριας καύσης, ενώ η DT δεν την επηρεάζει ιδιαίτερα. Τελικά η μελέτη πετυχαίνει ταυτόχρονη μείωση ρύπων και θορύβου με μικρή όμως αύξηση της ειδικής κατανάλωσης.

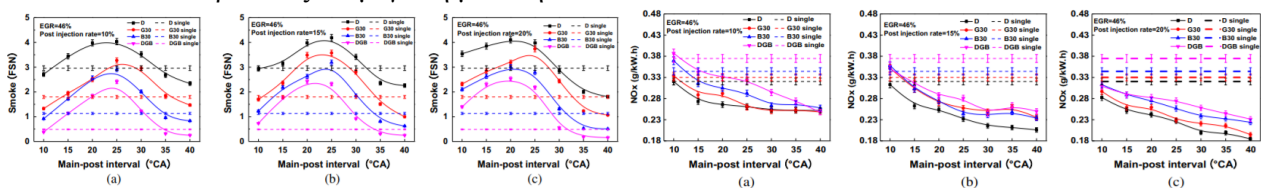
Αντίστοιχες δοκιμές διεξάγει και η έρευνα [173] σε ταχύστροφο κινητήρα, με SOI=-22°, MOI=40 mg, MOPoI=0~15 mg (~27%) και DT=10°~30°, δηλαδή για νωρίτερες εγχύσεις. Αναφέρει ότι η τακτική διατήρησης σταθερής διάρκειας και μάζας κύριας έγχυσης επιτρέπει την απόδοση των αποτελεσμάτων στη μετέγχυση και μόνο, και συνεπώς την εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων για αυτή. Τα NO_x μειώνονται με την απομάκρυνση της μετέγχυσης από την κύρια έγχυση, αυξάνονται όμως με την αύξηση της μάζας, ενώ σε κάθε περίπτωση είναι περισσότερα (ανηγμένα στο έργο και όχι ως απόλυτη ποσότητα) από αυτά της μονής έγχυσης. Τα αποτελέσματα των soot έχουν πολύ παρόμοια μορφή με αυτά της έρευνας [171], όντας αυξημένα για αυξανόμενη μάζα και για εγχύσεις πολύ κοντά στην κύρια, παρουσιάζοντας ένα ελάχιστο περίπου στις DT=15° από το τέλος της κύριας έγχυσης, και με περαιτέρω καθυστέρηση αυξανόμενα και ύστερα μειούμενα. Την αυξημένη ποσότητα soot για μετεγχύσεις σε κοντινή απόσταση από την κύρια, και αυτή η έρευνα, την αποδίδει στην έλλειψη οξυγόνου λόγω μεγάλης ποσότητας καυσαερίων της κύριας καύσης στην περιοχή έγχυσης, που μαζί με τις αυξημένες θερμοκρασίες που επικρατούν, ευνοούν την πυρόλυση και τη δημιουργία soot. Εξάλλου αυτό αποδεικνύεται με την αυξημένη ειδική κατανάλωση που εμφανίζεται σε πρόωρες μετεγχύσεις. Επίσης αποδίδεται και στα αυξημένα επίπεδα τύρβης που δημιουργούνται, που όπως αναφέρει και ο Desantes, επιταχύνουν το τελικό στάδιο της κύριας καύσης, ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν τις πιθανότητες σύγκρουσης των σωματιδίων και τη συσσωμάτωσή τους. Η μετέπειτα αύξηση των soot για DT=20° αποδίδεται στις μειωμένες θερμοκρασίες καύσης της μετέγχυσης και στη μειωμένη οξείδωσή τους.



Εικόνα 57: Επίδραση της απόστασης μετέγχυσης σε NO_x και soot σε ταχύστροφο κινητήρα [173].

Έρευνα [175] μελετάει επίσης σε ταχύστροφο κινητήρα την επίδραση της μετέγχυσης για SOI=-14°, DT=10°~40° μετά το τέλος της κύριας έγχυσης και MOPoI=10%~20%. Στην περίπτωση αυτή μετά τις DT=40° δεν παρατηρείται ουσιαστική έναυση και καύση της μετέγχυσης, ενώ όσο απομακρύνεται η μετέγχυση από την κύρια καύση τόσο ο ROHR της μετέγχυσης μειώνεται και αυξάνεται η διάρκεια της καύσης της. Στην περίπτωση αυτή η συνολική μάζα διατηρείται σταθερή, συνεπώς για αύξηση της μάζας MOPoI ο ROHR της κύριας έγχυσης μειώνεται λόγω μειωμένου καυσίμου. Η μέγιστη πίεση ωστόσο, που οφείλεται στο πρώτο

στάδιο της καύσης προανάμειξης παραμένει ανεπηρέαστη. Το σημείο έναυσης της μετέγχυσης παραμένει επίσης σταθερό με την αύξηση της MOPoI καθώς μειώνεται η διάρκεια έγχυσης της κύριας έγχυσης άρα και η SOPoI. Η θερμοκρασία από την καύση της κύριας έγχυσης ωστόσο δεν είναι τόσο υψηλή λόγω μειωμένου καυσίμου, άρα η καθυστέρηση έναυσης αντισταθμίζει την προπορεία της μετέγχυσης. Σχετικά με τα soot φαίνεται ότι με την αύξηση του DT αρχικά αυξάνονται και μετά μειώνονται. Για MOPoI=10% μια κοντινή μετέγχυση παρουσιάζει αποτελέσματα χαμηλότερα της μονής έγχυσης, γεγονός που οι συγγραφείς αποδίδουν στις υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται λόγω καύσης κοντά στο ANΣ και εκτεταμένης οξειδωσίας των soot και κυρίως την αυξημένη τύρβη, έναντι της μονής έγχυσης, με την οποία επιτυγχάνονται ψηλότερα επίπεδα ανάμειξης αέρα-καυσίμου. Η μετέπειτα αύξηση των soot αποδίδεται στην καθυστερημένη καύση και τις μειωμένες θερμοκρασίες, που δεν ευνοούν την οξειδωσή τους. Ως προς τα NO_x, και αυτή η έρευνα συμφωνεί ότι αύξηση της DT επιφέρει μείωσή τους, γεγονός που όμως το αποδίδει εν μέρει στη μειωμένη ποσότητα καυσίμου κύριας καύσης, που καίγεται σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και στη μειωμένη παραγωγή NO_x από τη μετέγχυση, λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών καύσης. Μόνο για MOPoI=10% και DT=10° παρουσιάζεται αύξηση στα NO_x συγκριτικά με τη μονή έγχυση, λόγω της υψηλής τύρβης, ταχύτατης καύσης και υψηλότερης θερμοκρασίας. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου λόγω της τύρβης και της επιτάχυνσης της τελευταίας φάσης της καύσης σημειώνει αύξηση για DT=10°~15°, ενώ τότε τα soot είναι ελαφρώς αυξημένα και τα NO_x δεν παρουσιάζουν μέγιστη μείωση.



Εικόνα 58: Επίδραση της απόστασης μετέγχυσης στην παραγωγή soot και NO_x για διαφορετικές μάζες μετέγχυσης και ανακυκλοφορία καυσαερίων σε ταχύστροφο κινητήρα [175]

3.2.2. Μετέγχυση σε 2X κινητήρα

Η βασική επίδραση κατά τη μετάβαση από 4X σε 2X κινητήρα στην παραγωγή των soot και σε όλη την καύση είναι οι διαφορετικές ταχύτητες που επικρατούν, όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο των πιλοτικών εγχύσεων. Η βιβλιογραφία [170] αναφέρει ότι η μέθοδος της μετέγχυσης για τη μείωση των soot είναι πιο αποδοτική σε 4X ταχύστροφους κινητήρες, ιδιαίτερα όταν αυτή συμβαίνει πολύ κοντά στην κύρια έγχυση. Αντίθετα, σε πιο ισχυρούς κινητήρες η μειωμένη ταχύτητα του εμβόλου μειώνει την απόδοση της μετέγχυσης ως προς τη μείωση των soot, ενώ η απόδοση είναι καλύτερη για απομακρυσμένη μετέγχυση.

Η έρευνα [176] είναι από τις λίγες που μελετούν τη συμπεριφορά των NO_x, των soot και της SFOC σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα. Με σταθερή συνολική ποσότητα καυσίμου διάρκειας έγχυσης 15.2° και ίση με αυτή της περίπτωσης αναφοράς μονού παλμού έγχυσης, γίνεται βελτιστοποίηση παραμέτρων SOI, MOPoI και SOPoI για σταθερό φορτίο 100% και μέγιστη πίεση μικρότερη των 150 bar. Λόγω της καύσης της μετέγχυσης σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της κύριας αναμένεται μείωση των NO_x, ενώ η αύξηση των επιπέδων θερμοκρασίας σε μεγάλες γωνίες στροφάλου λόγω της καύσης της μετέγχυσης προμηνύει μείωση των soot, λόγω οξειδωσής τους. Προκειμένου η SFOC να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα, μεταβάλλεται η έναρξη της κύριας έγχυσης SOI, ώστε να βρεθεί μια βέλτιστη λύση για όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

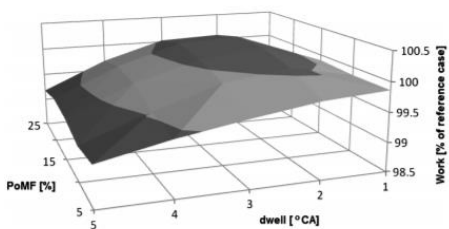


Fig. 7. Normalized work output versus dwell and PoMF for SOMI = 2°C ATDC and MR = 0

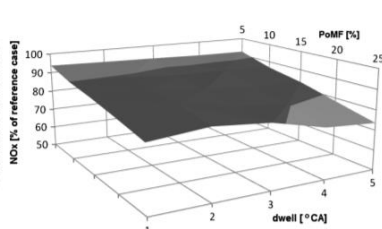


Fig. 8. Normalized final concentration of NO_x versus dwell and PoMF for SOMI = 2°C ATDC and MR = 0

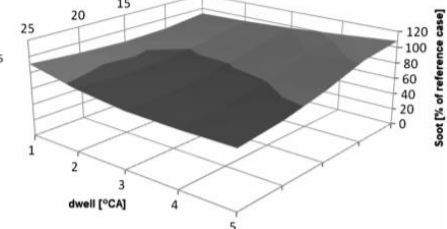
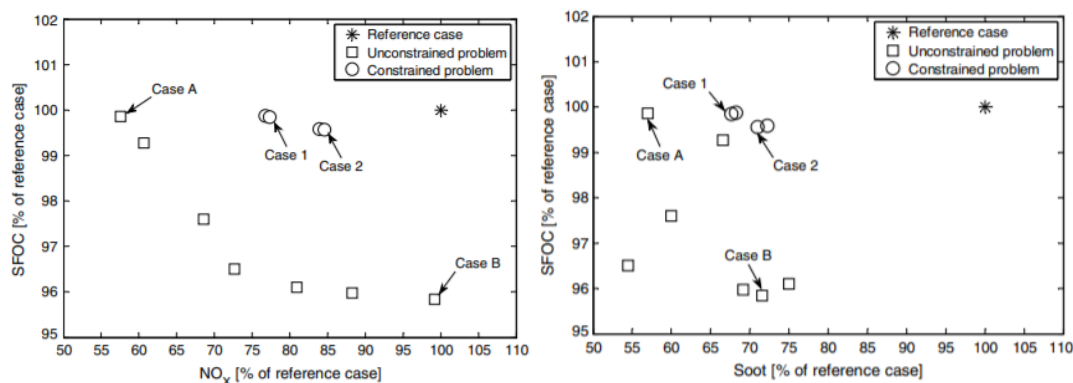


Fig. 9. Normalized final concentration of soot versus dwell and PoMF for SOMI = 2°C ATDC and MR = 0

Εικόνα 59: Επίδραση παραμέτρων μετέγχυσης σε έγχυση διπλού παλμού σε NO_x, soot και έργο σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα [176]

Σε μια πρώτη φάση η SOI=2° διατηρείται σταθερή προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες MOPoI=5%~25% και DT=1°~5° (SOPoI=18.2°~22.2°) χωρίς σταθερές παραμέτρους φορτίου και μέγιστης πίεσης. Από τα αποτελέσματα έρευνας ευαισθησίας φαίνεται ότι το έργο μειώνεται αισθητά για DT>3°, ενώ

για $DT < 3^\circ$ αυξάνεται αυξανόμενης της μάζας μετέγγυσης. Τα NO_x φαίνεται να μειώνονται αυξανόμενης και της μάζας και της απόστασης των εγχύσεων, γεγονός που συμφωνεί με τις αντίστοιχες μελέτες σε ταχύστροφους κινητήρες. Συγκεκριμένα για $DT > 4^\circ$ και $MOPoI > 20\%$ επιτυγχάνεται μείωση των NO_x άνω του 25%. Η αιτία βρίσκεται στο γεγονός ότι μειώνεται το ποσοστό του καυσίμου που καίγεται στις υψηλές θερμοκρασίες της κύριας καύσης, ώστε η θερμοκρασία δεν αυξάνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα, ενώ ταυτόχρονα μέρος του καυσίμου καίγεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες που δεν ευνοούν την παραγωγή NO_x , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Τα soot εμφανίζουν αύξηση περίπου 10% για $MOPoI < 10\%$ και $DT > 4^\circ$, ενώ παρατηρείται μείωση έως και 30% για $DT > 2^\circ$ και $MOPoI > 15\%$. Η αύξηση των soot για εγχύσεις κοντά στην κύρια αποδίδεται στο γεγονός σύμπτωσης του καυσίμου με τα καυσαέρια και το καίόμενο καύσιμο της κύριας έγχυσης και συνεπώς στην έλλειψη οξυγόνου και την ατελή καύση, ενώ η αύξησή τους για μικρές ποσότητες $MOPoI$ αποδίδεται στα μειωμένα επίπεδα θερμοκρασίας που δεν ευνοούν την οξειδωσή τους. Ύστερα από αυτά τα συμπεράσματα φαίνεται ότι μπορεί να υπάρξει μείωση των NO_x ταυτόχρονα με τα soot, με μικρή, αν όχι και μηδενική, αύξηση της SFOC.



Εικόνα 60: Μέτωπο Pareto βελτιστων λύσεων για ταυτόχρονη μείωση NO_x , soot και SFOC σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα [176].

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων γίνεται σε εύρη $SOI = 0.1^\circ \sim 10^\circ$, $MOPoI = 1\% \sim 40\%$ και $DT = 1^\circ \sim 10^\circ$ με ελεύθερες και περιορισμένες παραμέτρους φορτίου και μέγιστης πίεσης. Από τα αποτελέσματα που διακρίνονται στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι μπορεί να υπάρξει μεγάλη μείωση, μεγαλύτερη του 40%, σε NO_x και soot με ταυτόχρονη μείωση στην ειδική κατανάλωση (Case A: $(SOI, MOPoI, DT, MR) = (1.1^\circ, 38.2\%, 7.7^\circ, 9.8\%)$), σε μη περιορισμό φορτίου. Η λύση Case B: $(SOI, MOPoI, DT, MR) = (0.2^\circ, 1.3\%, 7.3^\circ, 8.8\%)$ έχει πολύ καλά αποτελέσματα για την ειδική κατανάλωση αλλά μικρές μειώσεις καυσαερίων. Στις περιπτώσεις αυτές ωστόσο παρατηρείται μεγάλη μείωση του φορτίου, παρότι η μέγιστη πίεση είναι αυξημένη, λόγω της έναρξης της κύριας έγχυσης νωρίτερα και πιο κοντά στο ANΣ. Η ταυτόχρονη και μεγάλη μείωση των ρύπων και της ειδικής κατανάλωσης σε αυτές τις περιπτώσεις αποδίδεται κυρίως στη μειωμένη συνολική μάζα έγχυσης, ενώ η μείωση των soot πιθανότατα να σχετίζεται και με τον παρόμοιο χρόνο $DT = 7.5^\circ$ των δύο λύσεων, παρότι οι μάζες τους $MOPoI$ διαφέρουν κατά πολύ. Στην περίπτωση A η μειωμένη παραγωγή NO_x οφείλεται στη μειωμένη μάζα της κύριας έγχυσης και στην καύση της μετέγγυσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που θα καιγόταν όντας μέρος της κύριας έγχυσης, αλλά σε θερμοκρασίες επαρκείς για την οξειδωση των soot. Αντίθετα, στην περίπτωση B, η έναρξη της κύριας έγχυσης ακόμα νωρίτερα και πιο κοντά στο ANΣ, επιφέρει αυξημένες θερμοκρασίες καύσης και NO_x συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς, αλλά μειωμένα soot. Η μειωμένη παραγωγή NO_x από τη μικρή μετέγγυση αντισταθμίζει την αυξημένη παραγωγή της κύριας έγχυσης, ώστε τελικά η παραγωγή NO_x είναι παρόμοια με της περίπτωσης αναφοράς.

Οι λύσεις με περιορισμούς (Cases 1&2) δεν εμφανίζουν τόσο μεγάλες μειώσεις, ωστόσο υπάρχει σαφής μείωση των NO_x και soot με μηδενική αύξηση στην ειδική κατανάλωση. Η λύση 1: $(SOI, MOPoI, DT, MR) = (1.9^\circ, 24.4\%, 3.8^\circ, 0.6\%)$, με αμελητέα μείωση φορτίου και αποδεκτή μέγιστη πίεση, επιφέρει περίπου 22% μείωση σε NO_x και 32% μείωση σε soot με πολύ μικρή μείωση στην SFOC. Αντίστοιχα η λύση 2: $(SOI, MOPoI, DT, MR) = (2^\circ, 17.7\%, 2.7^\circ, 0.7\%)$ επιφέρει μείωση σε NO_x 15% και soot 29%. Φαίνεται ότι για πλήρες φορτίο οι βέλτιστες λύσεις κινούνται στην SOI της περίπτωσης αναφοράς, ενώ η DT είναι μειωμένη στις $3^\circ \sim 4^\circ$. Από οπτικοποιημένα αποτελέσματα στο θάλαμο καύσης φαίνεται ότι η μείωση των soot οφείλεται στη διακοπή της κύριας έγχυσης και συνεπώς στην διακοπή της ανατροφοδότησης περιοχών υψηλής περιεκτικότητας σε καύσιμο με επιπλέον νέο. Η τύρβη που δημιουργείται λόγω της έγχυσης του 2^{ου} παλμού μειώνει την αναλογία καυσίμου-αέρα και επιταχύνει την καύση της μετέγγυσης αυξάνοντας τις θερμοκρασίες για την οξειδωση των soot, αλλά όχι αρκετά ώστε να παραχθούν NO_x . Συμπεραίνεται τελικά ότι η έγχυση σε

διπλό παλμό με μετέγχυση ευνοεί στο σύνολό της την καύση, αλλά δεν είναι επαρκής μέθοδος για τη μείωση των NO_x άνω του 75% που απαιτούν οι κανονισμοί.

3.3. Συνδυασμός πιλοτικής έγχυσης με μετέγχυση-Πολλαπλός παλμός

Αρκετές έρευνες έχουν μελετήσει την ταυτόχρονη επίδραση της πιλοτικής έγχυσης και της μετέγχυσης σε κινητήρες diesel, ώστε να συνδυαστούν τα θετικά αποτελέσματα και των δύο μεθοδολογιών. Ακόμα κι αν οι εγχύσεις αυτές είναι απομακρυσμένες, ούτως ώστε να θεωρείται αναμενόμενη η μη-αλληλεπίδραση μεταξύ τους, είναι σκόπιμο να μελετηθούν και ταυτοχρόνως ώστε να γίνει πιο ξεκάθαρος ο ρόλος τους στη βελτιστοποίηση της καύσης και να αποδειχθεί αν η μία μπορεί να καλύψει τα μειονεκτήματα της άλλης, ώστε να υπάρξει ένα συνολικώς βέλτιστο αποτέλεσμα.

Η έρευνα [177] αναφέρει περιληπτικά ότι μία ή δύο πιλοτικές εγχύσεις σε χαμηλές πιέσεις θαλάμου καύσης βοηθούν στη μείωση του θορύβου και στη μείωση των NO_x, λόγω καλής προανάμειξης και αργής καύσης, ενώ πιλοτικές εγχύσεις κοντά στην κύρια ελαττώνουν επίσης την παραγωγή των NO_x. Αντίστοιχα, μετεγχύσεις πολύ κοντά στην κύρια και σε ψηλές πιέσεις βοηθούν στη μείωση των soot, ενώ πιο καθυστερημένες μετεγχύσεις βοηθούν κυρίως στην αύξηση της θερμοκρασίας για καλύτερη επεξεργασία των καυσαερίων από συστήματα aftertreatment.

3.3.1. Πολλαπλός παλμός έγχυσης σε 4X κινητήρες

Η έρευνα [178] αναφέρει ότι όσο αυξάνεται η μάζα της κύριας έγχυσης τόσο αυξάνεται το ποσοστό καύσης διάχυσης και η επιφάνεια διάδοσης της φλόγας, που είναι και σημείο υψηλής παραγωγής NO_x, ενώ ταυτόχρονα η μάζα μετέγχυσης μειώνεται, μειώνοντας και την ικανότητα οξειδωσης των soot. Παράλληλα, το πεδίο ταχυτήτων στην περίπτωση της πολλαπλής έγχυσης είναι αυξημένο, συγκριτικά με την περίπτωση μονής έγχυσης επηρεάζοντας τις αναλογίες καυσίμου-αέρα και την παραγωγή ρύπων.

Τα soot σε γενικές γραμμές παρουσιάζουν τη μέγιστη μείωση για την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των εγχύσεων 10° ενώ τα NO_x εξαρτώνται κυρίως από τη μάζα της κύριας έγχυσης, και από την απόσταση DT5 μόνο στην περίπτωση μέγιστης ή ελάχιστης μάζας μετέγχυσης 25% ή 10%. Κοινή βέλτιστη λύση για NO_x και soot φαίνεται να είναι η (MOPoI,DT5)=(25%,30° ή 10°). Ο διαχωρισμός της κύριας σε 3 παλμούς αυξάνει τη διάρκεια καύσης της κύριας έγχυσης και καθυστερεί τη μετέγχυση με αποτέλεσμα, το διάστημα μέχρι το άνοιγμα των βαλβίδων να μειώνεται, ώστε μειώνεται ο χρόνος οξειδωσης των soot αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η διάρκεια παραμονής των καυσαερίων σε υψηλές θερμοκρασίες, άρα και η παραγωγή των NO_x. Η μεγαλύτερη αυτή διάρκεια οξειδωσης φαίνεται να είναι και ο λόγος των μειωμένων soot. Η SFOC, με τη διαίρεση της κύριας έγχυσης σε 3 επιμέρους, φαίνεται ότι αυξάνεται ελαφρώς σε όλες τις περιπτώσεις, πράγμα αναμενόμενο, καθώς ποσοστό καυσίμου καίγεται πιο μακριά από το ANΣ. Μια συμβατική καλή λύση για όλες τις παραμέτρους φαίνεται να είναι η (MOPoI,DT5)=(25%,20°).

Η επίδραση των πολλαπλών παλμών στις συνθήκες του θαλάμου φαίνεται από οπτικοποιημένα αποτελέσματα ότι είναι σημαντική. Πρώτα απ' όλα η θερμοκρασία του θαλάμου φτάνει σε υψηλές τιμές μόνο στη διεπιφάνεια διάδοσης φλόγας και όχι σε όλο τον όγκο του θαλάμου, όπως συμβαίνει με τη μονή έγχυση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για την περίπτωση MOPoI=10% η μέγιστη θερμοκρασία είναι μεν μεγαλύτερη αυτής της μονής έγχυσης (λόγω καλύτερης τύρβης και ανάμειξης), αλλά πέφτει απότομα, σε αντίθεση με την αρκετά υψηλή θερμοκρασία της μονής έγχυσης που παραμένει σε υψηλά επίπεδα για αρκετό χρονικό διάστημα, ευνοώντας την μεγαλύτερη παραγωγή NO_x. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο οι μειώσεις των ρύπων βρίσκεται στα επίπεδα 30% για τα NO_x και 70% για τα soot.

Η έρευνα [180] αναφέρει ότι ο τριπλός παλμός με προέγχυση και μετέγχυση παρουσιάζει καλά αποτελέσματα για μετέγχυση αρκετά μακριά από την κύρια έγχυση, ενώ το κύριο πλεονέκτημά του έναντι των μονών ή διπλών εγχύσεων είναι ο καλύτερος έλεγχος του ROHR για την ταυτόχρονη μείωση soot και NO_x.

Η μελέτη [181] εξετάζει διάφορες περιπτώσεις πολλαπλού παλμού σε μηχανή αυτοκινήτου μειωμένου φορτίου και σε σύγκριση με ένα βελτιστοποιημένο διπλό παλμό έγχυσης με καθυστερημένη κύρια καύση προανάμειξης και πιλοτική έγχυση, σε συνέχεια της εργασίας [182]. Αναφέρει ότι, όταν στο διπλό παλμό προέγχυσης προστίθεται και ένας παλμός μετέγχυσης, τα NO_x μειώνονται, σε αντίθεση με τα soot, που αυξάνονται, και την ειδική κατανάλωση που παραμένει περίπου σταθερή, ενώ μειώνεται και ο θόρυβος, σαν συνέπεια της αλλαγής του περιθωρίου των μεταβλητών της πιλοτικής έγχυσης με την πρόσθεση της μετέγχυσης. Η περίπτωση διπλής πιλοτικής έγχυσης και μετέγχυσης φαίνεται να δίνει τα καλύτερα

αποτελέσματα σε NO_x , ειδική κατανάλωση και θόρυβο, έναντι των περιπτώσεων μόνο διπλής πιλοτικής έγχυσης ή πιλοτικής έγχυσης και μετέγχυσης. Τα πλεονεκτήματα της μετέγχυσης υποστηρίζεται ότι, ως προς τη μείωση των NO_x βρίσκεται στην υψηλότερη θερμοκρασία των καυσαερίων, που αυξάνουν το έργο του υπερπληρωτή και τον αέρα στο θάλαμο καύσης, και ως προς τη μείωση των soot, στη μειωμένη διάρκεια της κύριας έγχυσης, στο τέλος της οποίας η παραγωγή τους είναι μεγάλη λόγω υψηλών λόγων καυσίμου-αέρα, στην καλύτερη ανάμειξη του μίγματος λόγω διακοπτόμενης έγχυσης και στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες οξειδωσής τους. Αναφέρεται ότι το βέλτιστο χρονικό σημείο έγχυσης της μετέγχυσης βρίσκεται εντός ενός χρονικού παραθύρου που συμπίπτει με την καύση διάχυσης της κύριας έγχυσης, ώστε η φλόγα να παρασύρει το καύσιμο σε περιοχές υψηλής τύρβης. Νωρίτερα από αυτό το σημείο, το καύσιμο εγχέεται σε περιοχή υψηλής περιεκτικότητας καυσαερίων και υψηλής θερμοκρασίας, επομένως η καύση συμβαίνει αργά σε μικρές αναλογίες αέρα και με μεγάλη παραγωγή soot, ενώ αν συμβεί ύστερα οι θερμοκρασίες είναι τόσο μικρές ώστε δεν παράγονται επιπλέον soot, δεν οξειδώνονται όμως και τα soot της κύριας έγχυσης. Για τους κινητήρες της αυτοκινητοβιομηχανίας βέλτιστες αποστάσεις θεωρούνται οι $\text{DT}=600\sim 1200\ \mu\text{s}$, δηλαδή $\text{SOPoI}=10^\circ\sim 15^\circ$ ιδιαίτερα για μέτρια και ψηλά φορτία, ενώ για βαρύτερους κινητήρες οι γωνίες $\text{SOPoI}=30^\circ\sim 40^\circ$. Για βαρύτερους κινητήρες, επίσης, βέλτιστες μάζες μετέγχυσης βρίσκονται σε εύρος $\text{MOPoI}=15\%\sim 20\%$, είναι δηλαδή σχετικά μικρές ώστε να αποφεύγεται η καύση τους με φλόγα διάχυσης. Στην περίπτωση που μικρή όμως MOPoI τοποθετηθεί κοντά στην κύρια έγχυση, η καύση επιταχύνεται αυξάνοντας τον ROHR. Η καύση συμβαίνει πιο κοντά στο ANΣ, με συνέπεια τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης, αλλά και την αυξημένη θερμοκρασία και την παραγωγή NO_x . Αν η μετέγχυση καθυστερήσει, τα NO_x μειώνονται, αρκεί να μην καθυστερήσει πέραν των $\text{MOPoI}=40^\circ$, ώστε το καύσιμο να μην επικάθεται στα τοιχώματα του κυλίνδρου.

Η έρευνα [183] επίσης συγκρίνει την επίδραση ενός τριπλού παλμού έγχυσης με πιλοτική έγχυση έναντι σε διπλό και μονό στην αποδοτικότητα και τους ρύπους ενός 4X κινητήρα. Η έναρξη του μονού παλμού συμβαίνει στις $\text{SOI}=-9^\circ$ και έχει διάρκεια 21.5° , ο διπλός παλμός διαιρείται σε δύο ισόποσες μάζες έγχυσης απόστασης $\text{DT}=9^\circ$ με έναρξη $\text{SOPI}=-6^\circ$ και ο τριπλός παλμός έχει μεταβαλλόμενη έναρξη δευτέρου παλμού $\text{SOI}=[-6^\circ, -4^\circ, -2^\circ, 0^\circ]$ και σταθερή μάζα πιλοτικής έγχυσης $\text{MOPoI}=5\%$, πρώτου κύριου παλμού $\text{MOI}=45\%$, 3^{ου} παλμού $\text{MOPoI}=50\%$ και $\text{SOPoI}=10^\circ$. Η ύπαρξη της πιλοτικής αναφέρεται ότι οδηγεί σε μια νωρίτερη καύση στη φάση της συμπίεσης, με μικρή καθυστέρηση έναυσης και διακριτή φλόγα προανάμειξης κατά την έναρξή της. Ταυτόχρονα η αύξηση της καθυστέρησης έγχυσης του 3^{ου} παλμού έχει σαν αποτέλεσμα την ευκολότερη ανάφλεξη του 2^{ου} παλμού, την απότομη έναυση του 3^{ου} και τη μετακίνηση της συνολικής καύσης προς τη φάση εκτόνωσης. Ο τριπλός παλμός έγχυσης, σε σύγκριση με το διπλό, αναφέρεται ότι επιφέρει καλύτερη απόδοση κινητήρα, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις στις οποίες εγχέεται η πιλοτική έγχυση επιτρέπουν την καλή ανάμειξη των αερίων στο θάλαμο. Η θερμοκρασία σε γωνίες στροφάλου προ του ANΣ είναι αυξημένες λόγω της πιλοτικής έγχυσης, οι μέγιστη όμως θερμοκρασία καύσης είναι μικρότερη από τις περιπτώσεις απουσίας προέγχυσης. Στην περίπτωση πιο πρόωρης έγχυσης 2^{ου} παλμού στις -6° η θερμοκρασία και η πίεση δεν είναι επαρκείς για την έναυσή του, με αποτέλεσμα την αύξηση της καθυστέρησης έναυσης, τη συσσώρευση άκαυστου καυσίμου και τελικά την απότομη ανάφλεξη του με μεγαλύτερο ROHR και υψηλότερη θερμοκρασία καύσης. Η πρόωρη και αποδοτική έγχυση του 2^{ου} παλμού επηρεάζει όμως και την καύση του 3^{ου}, ο οποίος εγχέεται σε περιβάλλον αυξημένης θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την ταχύτερη έναυσή του. Η τύρβη που δημιουργείται λόγω των πολλαπλών εγχύσεων αυξάνει τις αναλογίες αέρα-καυσίμου μειώνοντας την παραγωγή soot, ενώ οι αυξημένες θερμοκρασίες ευνοούν την οξειδωσή τους. Πιο πρόωρη έγχυση 2^{ου} παλμού οδηγεί σε αποδοτικότερη καύση και μειωμένα soot. Αντίθετα, μια πιο καθυστερημένη 2^η έγχυση επιφέρει χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης και χαμηλότερη παραγωγή NO_x .

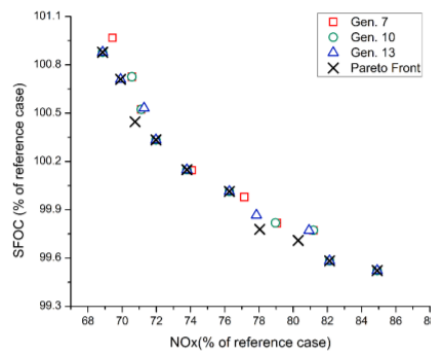
Η έρευνα [184] μελετά την περίπτωση πενταπλού παλμού με 3 προεγχύσεις και 1 μετέγχυση σε μέσο φορτίο, κυρίως ως προς την επίδρασή τους στο θόρυβο. Αναφέρει ότι η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση του καυσίμου κάθε παλμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της καθυστέρησης έναυσης των παλμών και κατ' επέκταση του θορύβου και της ειδικής κατανάλωσης. Παρατηρεί ότι όσος μειώνεται η απόσταση του 3^{ου} από τον 4^ο και κύριο παλμό έγχυσης τόσο μειώνεται ο θόρυβος, ενώ υπάρχει μια ελάχιστη τιμή πέρα από την οποία ο θόρυβος αυξάνεται. Η θερμότητα που απαιτείται για την αεριοποίηση του κύριου παλμού ψύχει τοπικά το θάλαμο και αυξάνει την καθυστέρηση έναυσης του καυσίμου των 3^{ων} προηγούμενων παλμών, εμποδίζοντας ταυτόχρονα και την απότομη αύξηση της πίεσης και την ανάπτυξη θορύβου.

3.3.2. Πολλαπλός παλμός σε 2X ναυτικό κινητήρα

Οι μελέτες πολλαπλής έγχυσης καυσίμου σε δίχρονους αργόστροφους ναυτικούς κινητήρες δεν είναι πολλές. Η εργασία [185] ασχολείται με την επίδραση τριπλού παλμού στην παραγωγή NO_x και στην ειδική κατανάλωση. Διερευνάται η ύπαρξη μιας βέλτιστης λύσης σε εύρος τιμών παραμέτρων $\text{SOPI}=[-15^\circ, -7^\circ]$, $\text{MOPoI}=[2\%, 7\%]$, $\text{SOI}=[1^\circ, 3.5^\circ]$, $\text{DT}=[2^\circ, 10^\circ]$ και $\text{MOPoI}=[10\%, 30\%]$ και με περιορισμό της μέγιστης πίεσης

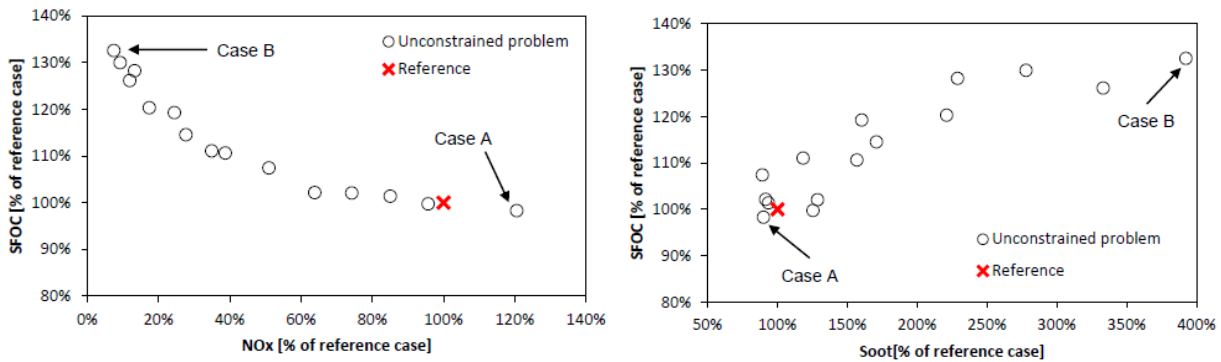
στα 150 bar, ενώ η συνολική μάζα έγχυσης παραμένει αμετάβλητη. Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης δείχνουν ότι οι καλές λύσεις βρίσκονται σε εύρη $SOPI=[-14.41^{\circ}, -10.07^{\circ}]$, $MOPI=[2.25\%, 4.28\%]$, $SOI=[2.17^{\circ}, 2.57^{\circ}]$, $DT=[2.41^{\circ}, 5.77^{\circ}]$ και $MOPoI=[19.2\%, 27.72\%]$, δηλαδή για σχετικά πρόωρη προέγχυση μικρής μάζας, σχετικά καθυστερημένη κύρια έγχυση και μεγάλη μετέγχυση σε κοντινή απόσταση από την κύρια. Η βέλτιστη λύση πετυχαίνει μείωση NO_x 22% και ταυτόχρονη μικρή μείωση της SFOC και των soot 30%.

Η μέγιστη πίεση εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένη, συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς, λόγω της ύπαρξης και καύσης της προέγχυσης προ του ANΣ. Η αυξημένη αυτή πίεση κατά τα πρώτα στάδια της φάσης εκτόνωσης επιφέρει αύξηση του έργου και μείωση της ειδικής κατανάλωσης, αντισταθμίζοντας την απώλεια έργου λόγω της ύπαρξης της μετέγχυσης. Παράλληλα η διακοπή της κύριας έγχυσης πριν τη μετέγχυση περιορίζει την υπέρμετρη αύξηση της θερμοκρασίας και την παραγωγή των NO_x , αλλά και την παραγωγή των soot, που στην περίπτωση αναφοράς σχηματίζονται ιδιαίτερα στο τέλος της έγχυσης, οπότε η αναλογία καυσίμου-αέρα είναι μεγάλη στο χώρο του σπρέι. Τα soot που σχηματίζονται κατά την μετέγχυση είναι σαφώς λιγότερα, λόγω της χαμηλότερης αναλογίας καυσίμου-αέρα, ενώ οι αυξημένες θερμοκρασίες, συγκριτικά με τις αντίστοιχες της μονής έγχυσης, επιταχύνουν την οξειδωσή τους. Αποδεικνύεται ωστόσο ότι ενώ η στρατηγική της τριπλής έγχυσης είναι ωφέλιμη, δεν είναι αρκετή για την ικανοποίηση των κανονισμών. Μείωση των NO_x έως και 80% αποδεικνύεται ότι μπορεί να επιτευχθεί μόνο με ανακυκλοφορία καυσαερίων της τάξης του 30% και με μικρή απώλεια έργου 4%.



Εικόνα 61: Μέτωπο Pareto ταυτόχρονης μείωσης NO_x και soot σε καύση δίχρονου κινητήρα με τριπλό παλμό έγχυσης [185]

Τέλος, η έρευνα [186] μελετά την επίδραση τριπλής έγχυσης με προέγχυση και μετέγχυση βαρέος καυσίμου HFO στην παραγωγή NO_x , soot και την απόδοση της καύσης του. Η βέλτιστη λύση αναζητείται σε εύρη $SOPI=[-5^{\circ}, 5^{\circ}]$, $MOPI=[1\%, 50\%]$, $DT1=[0.5^{\circ}, 20^{\circ}]$, $DT2=[0.5^{\circ}, 10^{\circ}]$, $MOPoI=[1\%, 30\%]$. Η περίπτωση αναφοράς, με την οποία γίνεται η σύγκριση της έγχυσης τριπλού παλμού, χαρακτηρίζεται από μονή έγχυση επίσης βαρέος καυσίμου HFO. Φαίνεται ότι στην περίπτωση απεριόριστης μέγιστης πίεσης δεν μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη μείωση NO_x και SFOC, ενώ μπορεί να υπάρξει μικρή ταυτόχρονη μείωση της SFOC και των soot, αλλά με παράλληλη αύξηση κατά 21% των NO_x . Μεταξύ των καλών λύσεων φαίνονται να είναι οι $(SOPI, MOPI, DT1, DT2, MOPoI) = (-4.294^{\circ}, 27.265\%, 1.492^{\circ}, 8.808^{\circ}, 28.053\%)$ και $(SOPI, MOPI, DT1, DT2, MOPoI) = (-3.98^{\circ}, 39.135\%, 7.712^{\circ}, 6.908^{\circ}, 2.799\%)$, οι οποίες παρουσιάζουν καλά αποτελέσματα ρύπων αλλά ελαφρώς μειωμένο έργο, παρά το γεγονός ότι η μέγιστη πίεση είναι επίσης αυξημένη. Λύσεις με μειωμένη SFOC εμφανίζονται για αυξημένα ποσοστά μάζας πιλοτικής έγχυσης και μικρότερες αποστάσεις πιλοτικής και κύριας έγχυσης. Οι αυξημένες τιμές πίεσης που εμφανίζονται, οφείλονται στα σημαντικά ποσοστά μάζας πιλοτικής έγχυσης καθώς και στην έναρξη της κύριας έγχυσης, που συμβαίνει προ του ANΣ, για μικρές $DT1$. Για καθυστερημένες κύριες εγχύσεις η SFOC και τα soot αυξάνονται, ενώ τα NO_x μειώνονται.



Εικόνα 62: Μέτωπα Pareto για ταυτόχρονη μείωση NO_x, soot και SFOC σε δίχρονο κινητήρα καύσης τριπλού παλμού HFO

Στην περίπτωση λύσεων με περιορισμό της μέγιστης πίεσης στα 150 bar φαίνεται ότι δεν μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη μείωση και των τριών παραμέτρων. Ταυτόχρονη μείωση NO_x και soot μπορεί να συμβεί με ταυτόχρονη μικρή αύξηση της SFOC. Καλή λύση σε αυτή την περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί η (SOPI,MOPI,DT1,DT2,MOPoI)=(-1.314°, 1.634%, 1.301°, 4.114°, 24.561%). Η λύση αυτή έχει περίπου την ίδια έναρξη κύριου παλμού με την περίπτωση αναφοράς. Συνεπώς η μέγιστη πίεση είναι περίπου ίδια και εμφανίζεται στις ίδιες γωνίες στροφάλου. Κατά την εκτόνωση ωστόσο, η πίεση αρχίζει να μειώνεται νωρίτερα, λόγω της διακοπής της κύριας έγχυσης και ύστερα συγκλίνει ομαλά με αυτή της αναφοράς λόγω της μετέγχυσης. Η αύξηση του ROHR κατά την έναρξη της καύσης είναι παρόμοια για τις δύο περιπτώσεις, μιας και η μάζα της πιλοτικής έγχυσης είναι τόσο μικρή ώστε η επίδρασή της είναι σχεδόν αμελητέα.

Οι παραπάνω μελέτες παρατέθηκαν σαν παραδείγματα που βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς των αποτελεσμάτων με τη μεταβολή των παραμέτρων του προβλήματος. Είναι σαφές ότι οι εργασίες που αναφέρθηκαν δεν είναι οι μοναδικές που μελετούν παρόμοια προβλήματα, και η ερμηνεία τους, όπως και αυτή των φαινομένων που περιγράφουν μπορεί να διαφέρει από την ερμηνεία του συγγραφέα. Η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια των [154][155][176], καθώς χρησιμοποιεί μοντέλο του ίδιου κινητήρα. Αναφέρεται ότι χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα του κ. Ανδρεάδη και κ. Στρατσιάνη σε μια προσπάθεια α συνδυαστούν τα καλά αποτελέσματα της πιλοτικής έγχυσης και της μετέγχυσης. Παρόμοια εργασία είναι αυτή του κ. Ξανθούλη [185], όπου όμως μελετάται ο τριπλός παλμός με ανακυκλοφορία καυσαερίου, και αυτή του κ. Κοντούλη [186], όπου ο τριπλός παλμός μελετάται σε λειτουργία με βαρύ καύσιμο HFO.

4. Υπολογιστικά Εργαλεία

Προτού γίνουν οι αντίστοιχες προσπάθειες με τις παραπάνω έρευνες, για 2X ναυτικό κινητήρα με προφίλ έγχυσης πολλαπλού παλμού, είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν τα απαραίτητα εργαλεία υπολογισμού που θα χρησιμοποιηθούν, μιας και δεν πρόκειται για πειραματικά αποτελέσματα. Τα υπολογιστικά αυτά εργαλεία είναι φόρμουλες που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν έχοντας αποδείξει την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους. Είναι ωστόσο σημαντικό να είναι γνωστές οι λεπτομέρειες λειτουργίας τους προκειμένου να διατηρούνται υπόψιν οι πιθανές αποκλίσεις από τα πραγματικά αποτελέσματα και τις φυσικές διαδικασίες, οι οποίες μοντελοποιούνται.

Τα βασικά υπολογιστικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν είναι ο κώδικας μοντελοποίησης καύσης KIVA-3, με όλα τα υπολογιστικά μοντέλα που περιλαμβάνει για την περιγραφή των φυσικών, μηχανικών και χημικών φαινομένων. Ο κώδικας KIVA-3 αποτελεί το λογισμικό ανάλυσης, το οποίο με δεδομένο το προφίλ έγχυσης υπολογίζει τις χρονικές ιστορίες των μεταβλητών της καύσης.

4.1. Κώδικας μοντελοποίησης KIVA-3[188]

Όπως όλοι οι κώδικες υπολογιστικής προσομοίωσης, έτσι και ο KIVA-3 έχει ως επίκεντρο την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης ούτως ώστε να προκύπτουν, για ένα εύρος χρονικών τιμών, οι χωρικές κατανομές μεγεθών, όπως η ταχύτητα, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση συστατικών, η πυκνότητα, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, η θέση και το σχήμα της φλόγας κ.λπ. Για την επίλυση των εξισώσεων είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλων αρχικών και οριακών συνθηκών, καθώς και μιας σειράς βοηθητικών σχέσεων, όπως καταστατικές εξισώσεις, θερμοδυναμικές και φυσικές ιδιότητες, μηχανισμοί χημικών αντιδράσεων κ.λπ. Συχνά φυσικοί ή χημικοί μηχανισμοί αντικαθίστανται από υπολογιστικά μοντέλα, που μειώνουν το υπολογιστικό κόστος. Η χρήση των κατάλληλων απλουστευτικών μοντέλων εξαρτάται από τη φύση της αναπτυσσόμενης ροής, π.χ. μονοδιάστατη, δισδιάστατη ή τρισδιάστατη, συμπιεστή ή ασυμπιέστη, στρωτή ή τυρβώδης, μόνιμη ή χρονικά μεταβαλλόμενη, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του μίγματος των αντιδρώντων, π.χ. μονοφασικό ή πολυφασικό, προαναμεμειγμένο ή μη κ.λπ. Επειδή τα φαινόμενα της τυρβώδους ροής και των χημικών αντιδράσεων είναι εξαιρετικά περίπλοκα και σύνθετα φαινόμενα, δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονα λεπτομερής υπολογιστική προσομοίωσή τους. Ανάλογα με τους στόχους σε κάθε προσομοίωση, γίνονται και οι κατάλληλες απλουστεύσεις, προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος, χωρίς να υπάρξει απόκλιση από την πραγματικότητα και τα πειραματικά αποτελέσματα. Κατά τη μελέτη θαλάμου εσωτερικής καύσης, επειδή η χρονική κλίμακα ολοκλήρωσης των αντιδράσεων είναι αισθητά μικρότερη της χρονικής κλίμακας εξέλιξης των φαινομένων τυρβώδους ανάμειξης, η ακριβής απεικόνιση των χαρακτηριστικών του αναπτυσσόμενου τυρβώδους ροϊκού πεδίου αποκτά πρωταρχική σημασία, έναντι της διεξοδικής περιγραφής των στοιχειωδών χημικών αντιδράσεων. Για το λόγο αυτό ο KIVA-3 αποτελεί ένα κώδικα κυρίως ρευστομηχανικής CFD που περιλαμβάνει και συνδυάζει ένα προσεγγιστικό μοντέλο καύσης.

Οι τυρβώδεις ροές είναι εξαιρετικά περίπλοκο και χαοτικό φαινόμενο, ιδιαίτερα όταν εμπλέκονται και αντιδρώντα στοιχεία εντός τους. Τα χαρακτηριστικά του τυρβώδους πεδίου επηρεάζονται από τις χημικές αντιδράσεις κυρίως μέσω της επίδρασης των τοπικά έντονων ρυθμών έκλυσης θερμότητας και των μεταβολών στις φυσικές ιδιότητες της ροής, λόγω έντονων μεταβολών της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, οι χημικές αντιδράσεις επηρεάζονται από το τυρβώδες πεδίο ροής, το οποίο προκαλεί διακυμάνσεις στα βασικά ροϊκά μεγέθη, όπως ταχύτητα, θερμοκρασία, πυκνότητα, πίεση και συγκέντρωση, με αποτέλεσμα την ενίσχυση ή τον περιορισμό των τοπικών ρυθμών αντίδρασης.

Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι υπολογισμού τυρβώδους ροής, με διαφορετικά επίπεδα επιτυγχάνομενης ακρίβειας. Τα πρώτα μοντέλα προσομοίωσης τυρβώδους ροής βασίστηκαν στη διαδικασία λήψης χρονικά μέσων τιμών κατά Reynolds (Reynolds-Average Navier-Stokes/RANS), κατά την οποία γίνεται επίλυση των εξισώσεων διατήρησης των χρονικά μέσων μεγεθών, ενώ οι τυρβώδεις διακυμάνσεις προσεγγίζονται με χρήση υπολογιστικών μοντέλων. Κατά την προσομοίωση μεγάλης δίνης (Large Eddy Simulation/LES) γίνεται επίλυση των τυρβωδών δινών μεγάλης κλίμακας, ενώ οι τυρβώδεις δίνες μικρής κλίμακας προσεγγίζονται μέσω της χρήσης κατάλληλων υπο-πλεγματικών μοντέλων. Τέλος, η άμεση αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation/DNS) συνίσταται στην επίλυση των εξισώσεων διατήρησης των χρονικά στιγμιαίων μεγεθών, χωρίς τη χρήση κάποιου μοντέλου και με μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Η βασική διαφορά των παραπάνω μεθόδων είναι η χωρική διακριτοποίηση που απαιτούν και κατά συνέπεια η ακρίβεια αποτελεσμάτων που αποδίδουν. Ο KIVA-3 προσεγγίζει τις τυρβώδεις ροές με μέθοδο RANS.

Ως προς την πολυφασικότητα του μίγματος έχουν επίσης αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι περιγραφής της ροής του, ανάλογα με την αλληλεπίδραση των φάσεών του. Στη σύζευξη απλής κατεύθυνσης θεωρείται ότι η συνεχής φάση (στην προκειμένη περίπτωση ο αέρας καύσης) επηρεάζει τη διασκορπισμένη φάση (υγρό καύσιμο), χωρίς όμως να επηρεάζεται από αυτήν. Στην περίπτωση σύζευξης διπλής κατεύθυνσης, λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας, ενέργειας, ορμής από και προς την κάθε φάση, ενώ τέλος, στην περίπτωση σύζευξης τετραπλής κατεύθυνσης, που χρησιμοποιείται συνήθως για περιοχές όπου η διασκορπισμένη φάση βρίσκεται σε μεγάλη συγκέντρωση, λαμβάνονται υπόψη επιπλέον και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων της διασκορπισμένης φάσης, π.χ. συγκρούσεις σωματιδίων, συγχώνευση σταγονιδίων κ.λπ. Η προσομοίωση ροής συνεχούς και διασκορπισμένης φάσης που χρησιμοποιείται από τον KIVA-3 είναι συγχώνευσης τετραπλής κατεύθυνσης.

Οι μεθοδολογίες προσομοίωσης κίνησης της διασκορπισμένης φάσης εντός της συνεχούς είναι κυρίως η προσέγγιση Lagrange και η προσέγγιση Euler. Σύμφωνα με την προσέγγιση Euler, η διασκορπισμένη φάση προσομοιώνεται ως ένα συνεχές μέσο, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του οποίου είναι ανάλογες με αυτές ενός ρευστού. Το πεδίο ροής της διασκορπισμένης φάσης υπολογίζεται όπως και το πεδίο ροής της συνεχούς φάσης και θεωρείται ότι και οι δύο φάσεις κατανέμονται σε κάθε σημείο στο χώρο με τη σχετική αριθμητική πυκνότητά τους να καθορίζεται από τις αντίστοιχες τιμές της κατ' όγκο συγκέντρωσης. Η προσέγγιση Euler συνεπώς είναι κατάλληλη για πυκνές ροές διασκορπισμένης φάσης, όπου μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν συνεχής. Αντίθετα, στην περίπτωση προσέγγισης Lagrange το κάθε στοιχείο της διασκορπισμένης φάσης αντιμετωπίζεται ως ένα μοναδιαίο σημείο το οποίο κινείται ανεξάρτητα στο πεδίο ροής της συνεχούς φάσης, αλληλεπιδρώντας με αυτό. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ξεχωριστά η τροχιά του κάθε στοιχείου, ενώ η ταχύτητα και η θέση του κάθε στιγμή υπολογίζονται μέσω της ολοκλήρωσης της εξίσωσης κίνησής του. Για αποφυγή μεγάλου υπολογιστικού κόστους, τα στοιχεία με κοινές ιδιότητες ομαδοποιούνται και οι τιμές των μεγεθών τους υπολογίζονται ομαδικά. Παράλληλα η προσέγγιση Lagrange έχει το πλεονέκτημα περιγραφής σύνθετων φαινομένων, όπως είναι ο τυρβώδης διασκορπισμός, η διάσπαση ή συγχώνευση σταγονιδίων, η πρόσκρουση με τα στερεά τοιχώματα ή με σταγονίδια κ.λπ. Ο KIVA-3 χρησιμοποιεί την προσέγγιση ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) κατά την οποία τα κελιά είναι έτσι σχηματισμένα ούτως ώστε να μπορούν να φιλοξενήσουν και μέθοδο Euler, για τη συνεχή φάση αερίου ή υγρού, αλλά και μέθοδο Lagrange, για την καλή περιγραφή της συμπεριφοράς του σπρέι. Η ιδιαιτερότητα των κελιών έγκειται στο γεγονός ότι οι θέσεις των κορυφών τους είναι συνάρτηση του χρόνου και συνεπώς τα κελιά 'κινούνται' και αλλάζουν σχήμα ανάλογα και με τη μεταβολή του σχήματος του θαλάμου καύσης. Κατά την άνοδο του εμβόλου για παράδειγμα, όταν τα κελιά εγγύα στο πιστόνι αποκτήσουν το μισό του αρχικό του όγκου, απενεργοποιούνται. Κάθε χρονική στιγμή υπολογισμού ο χώρος διαχωρίζεται στη φάση Lagrange και τη φάση επαναπροσδιορισμού. Στη Λαγκρανζιανή φάση οι κορυφές των κελιών κινούνται στην κατεύθυνση του ρευστού και δεν υπάρχει συναγωγή θερμότητας στα τοιχώματα των κελιών. Στη φάση επαναπροσδιορισμού, γίνεται νέος διαχωρισμός κελιών ενώ το νέο ροϊκό πεδίο θεωρείται 'παγωμένο' και οι συντεταγμένες του ορίζονται στο νέο σύστημα κελιών. Ο επαναπροσδιορισμός αυτός γίνεται με ανταλλαγές ορμής, μάζας και ενέργειας μεταξύ των ορίων των παλιών και νέων κελιών θεωρώντας ότι τα κελιά κινούνται σε σχέση με το 'σταθερό' ροϊκό πεδίο.

Πρόκειται λοιπόν, για έναν 3D CFD κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, που επιλύει αριθμητικά τις μη μόνιμες εξισώσεις διατήρησης συμπίεστης ροής παρουσία χημικών αντιδράσεων, προβλέποντας με ακρίβεια την αλληλεπίδραση των εξατμιζόμενων υγρών σπρέι μονοσυστατικού καυσίμου με το περιβάλλον πολυσυστατικό ιδανικό αέριο λαμβάνοντας υπόψη την ανάμειξη, την έναυση, την καύση και τις λοιπές χημικές αντιδράσεις, τη μεταφορά θερμότητας και το σχηματισμό ρύπων, που λαμβάνουν χώρα στο θάλαμο καύσης. Ο θάλαμος καύσης σχεδιάζεται και εισάγεται από το χρήστη, και σύμφωνα με τη γεωμετρία του γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί τύρβης και εναλλαγής θερμότητας με τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Ο υποτυπώδης θάλαμος καύσης χωρίζεται σε πολλές επιμέρους εξαεδρικές, όχι όμως απαραίτητα κυβικές, κυψέλες-στοιχεία, που συνιστούν τους επιμέρους όγκους ελέγχου, οι κορυφές των οποίων είναι τα σημεία υπολογισμού κίνησης. Ο κώδικας είναι open-source και αποτελείται από πολλές επιμέρους υπορουτίνες, με αποτέλεσμα την εύκολη παρέμβαση του χρήστη και την αλλαγή οποιουδήποτε υπολογιστικού μοντέλου.

4.1.1. Βασικές εξισώσεις ρευστών και χημική κινητική

Ο κώδικας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση είτε στρωτής είτε τυρβώδους ροής. Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας διαφέρουν στις δύο περιπτώσεις στο γεγονός ότι για τυρβώδη ροή οι συντελεστές μεταφοράς, όπως το κινηματικό ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα, ο συντελεστής διάχυσης μάζας (π.χ. μ , k , $D_{i,j}$) κ.λπ., είναι υψηλότεροι, λόγω της επιπρόσθετης κινητικότητας που προκαλείται από τις

τυρβώδεις διακυμάνσεις και δεν είναι απλώς ιδιότητες των ρευστών, όπως συμβαίνει στη στρωτή ροή, αλλά εξαρτώνται και από τα χαρακτηριστικά της ροής και της αλληλεπίδρασης των φάσεων.

Η αρχή διατήρησης της μάζας ενός συστατικού m για ένα διαφορετικό όγκο ελέγχου συσχετίζει το ρυθμό μεταβολής της μάζας του συστατικού, με τη συνολική παροχή μάζας του συστατικού η οποία εισέρχεται στον όγκο ελέγχου, τη συνολική παροχή μάζας του συστατικού που εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου και το ρυθμό παραγωγής μάζας του συστατικού στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου λόγω των χημικών αντιδράσεων. Η αρχή διατήρησης των συστατικών λαμβάνει υπόψη τη διαχυτότητα, στηριζόμενη στο νόμο του Fick και προσδιοριζόμενη από μία και μόνο μεταβλητή D , αλλά και του συντελεστή χημείας και της διάσπασης σπρέι, που αναλύονται παρακάτω. Η πυκνότητα ρ_m είναι η πυκνότητα του συστατικού m και ρ η συνολική πυκνότητα. Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης για όλα στα συστατικά προκύπτει η συνολική πυκνότητα του ρευστού σε κάθε κελί.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}_m^s \delta_{m1}$$

Η εξίσωση διατήρησης μάζας, σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός μεταβολής της μάζας του συστήματος είναι ίσος με τη διαφορά του ρυθμού εισόδου της μάζας στον όγκο ελέγχου μείον το ρυθμό εξόδου της μάζας από τον όγκο ελέγχου, ισχύει και κατά την καύση. Ο όρος $\dot{\rho}^s$ προστίθεται στη σχέση λόγω αύξησης της μάζας του αερίου εξαιτίας της ατμοποίησης σταγονιδίου που πιθανώς βρίσκεται εντός του κελιού ελέγχου:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{\rho}^s$$

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής, για χαμηλούς αριθμούς Mach, όπου η πίεση είναι σχεδόν σταθερή, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει αν θα γίνει χρήση το υπολογιστικού συντελεστή α , με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη κατά προσέγγιση οι διακυμάνσεις πίεσης και συνεπώς υπάρχει μεγαλύτερη υπολογιστική ακρίβεια αλλά και σπατάλη, ή όχι ($\alpha=1$). Ο συντελεστής A_0 είναι μηδέν, όταν η ροή είναι στρωτή, και μονάδα, όταν γίνεται χρήση μοντέλου τυρβώδους ροής. Ο συντελεστής F^s αντιπροσωπεύει τη μείωση της ορμής ανά μονάδα όγκου που οφείλεται στο σπρέι και είναι η αεροδυναμική αντίσταση που υφίστανται τα σταγονίδια κατά την κίνησή τους στο αέριο:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = - \frac{1}{\alpha^2} \nabla p - A_0 \nabla (2/3 \rho k) + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}^s + \rho \mathbf{g}$$

Ως προς τις εξισώσεις διατήρησης ορμής, στην περίπτωση τυρβώδους ροής, επιλύονται δύο επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και την καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ϵ :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} + \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \epsilon + \dot{W}^s$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = - \left(\frac{2}{3} c_{\epsilon 1} - c_{\epsilon 3} \right) \rho \epsilon \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} \left[c_{\epsilon 1} \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{u} - c_{\epsilon 2} \rho \epsilon + c_{\epsilon s} \dot{W}^s \right]$$

Οι παραπάνω εξισώσεις (εξίσωση μεταφοράς τυρβώδους κινητικής ενέργειας και εξίσωση μεταφοράς καταστροφής τυρβώδους κινητικής ενέργειας) αποτελούν το μοντέλο διάχυσης της κινητικής ενέργειας της τύρβης και τις λεγόμενες εξισώσεις k - ϵ , με επιπρόσθετους όρους, όπως το \dot{W}^s , που εμφανίζονται λόγω αλληλεπίδρασης του σπρέι. Η ισχύς \dot{W}^s είναι πάντα αρνητική και υποδηλώνει τον ρυθμό στον οποίο το σπρέι καταναλώνει ενέργεια της τύρβης για τη διάσπαση των σταγονιδίων του.

Η εξίσωση διατήρησης ενέργειας συσχετίζει το ρυθμό μεταβολής της ολικής (θερμικής και μηχανικής) ενέργειας του συστήματος με το ρυθμό εισόδου της ολικής ενέργειας στον όγκο ελέγχου διαμέσου της οριακής επιφάνειας, το ρυθμό εξόδου της ολικής ενέργειας στον όγκο ελέγχου διαμέσου της οριακής επιφάνειας και το ρυθμό παραγωγής (ή κατανάλωσης) της ολικής ενέργειας στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου, λόγω των αντιδράσεων (\dot{Q}^c) και της τύρβης (\dot{Q}^s). Λαμβάνονται έτσι υπόψη η εσωτερική ενέργεια I , η θερμική αγωγιμότητα και η διάχυση ενθαλπίας J , καθώς και η θερμότητα που αποδίδει η καύση \dot{Q}^c και αυτή που προκύπτει από την πρόσθεση της θερμότητας λόγω τριβής των δύο φάσεων μέσω της αεροδυναμικής δύναμης αντίστασης και αυτής που αφαιρείται από το αέριο για την ατμοποίηση των σταγονιδίων \dot{Q}^s :

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} I) = - p \nabla \cdot \mathbf{u} + (1 - A_0) \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{J} + A_0 \rho \epsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s$$

$$J = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla (\rho_m / \rho)$$

, όπου T η θερμοκρασία του ρευστού και h_m η ειδική ενθαλπία του κάθε

συστατικού.

Οι καταστατικές εξισώσεις επίσης χρησιμοποιούνται, κάνοντας θεώρηση ιδανικού μίγματος αερίων:

$$p = R_0 T \sum_m (\rho_m / W_m)$$

Η χημική κινητική των αντιδράσεων περιγράφεται από δύο είδη αντιδράσεων, αυτές που βρίσκονται σε ισορροπία, οι οποίες εκτελούνται πολύ γρήγορα σε σχέση με τα φαινόμενα ροής και συνεπώς η χρονική τους εξέλιξη είναι τόσο σύντομη που αγνοείται, και αυτές της χημικής κινητικής, οι οποίες συμβαίνουν πιο αργά και συνεπώς η επίδραση της εξέλιξής τους στο σύστημα έχει αξία. Ο ρυθμός των αντιδράσεων χημικής κινητικής προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\dot{\omega}_r = k_{fr} \prod_m (\rho_m / W_m)^{a_{mr}} - k_{br} \prod_m (\rho_m / W_m)^{b_{mr}}$$

, όπου a : στοιχειομετρικός συντελεστής των αντιδρόντων, b : στοιχειομετρικός συντελεστής των προϊόντων, m : το εκάστοτε στοιχείο, r : η εκάστοτε αντίδραση. Οι συντελεστές ρυθμού αντίδρασης k υπολογίζονται από το νόμο του Arrhenius.

Από την παραπάνω εξίσωση, η παραγωγή συστατικού στην εξίσωση διατήρησης συστατικών και η έκλυση θερμότητας λόγω αντιδράσεων στην εξίσωση διατήρησης ενέργειας βρίσκονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\dot{\rho}_m^c = W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \dot{\omega}_r \quad \dot{Q}^c = \sum_r Q_r \dot{\omega}_r \quad Q_r = \sum_m (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m$$

σηματισμού. , όπου Δh_f^0 : ενθαλπία

4.1.2. Μοντελοποίηση του σπρέι και των σταγονιδίων καυσίμου KIVA-3

Η επίλυση των δυναμικών εξισώσεων του σπρέι και της αλληλεπίδρασής του με το περιβάλλον αέριο είναι μια εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία. Προκειμένου να υπολογιστούν οι μάζες, οι ορμές, οι ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ του σπρέι και του αερίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η κατανομή ταχυτήτων, μεγεθών των σταγονιδίων και οι θερμοκρασίες τους. Σε πολλά σπρέι ο αριθμός Weber είναι μεγαλύτερος της μονάδας, με αποτέλεσμα να πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ταλαντώσεις, οι παραμορφώσεις και διασπάσεις των σταγονιδίων τους. Ο KIVA-3 ακολουθεί ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης δημιουργίας σπρέι με 10 μεταβλητές ως προς το χρόνο για τη δημιουργία κάθε σταγονιδίου: 3 μεταβλητές θέσης, 3 μεταβλητές ταχύτητας, την ακτίνα του σταγονιδίου αν αυτό θεωρηθεί σφαιρικό, τη θερμοκρασία του σταγονιδίου, που θεωρείται σταθερή σε όλη τη μάζα του σταγονιδίου, όπως και η πυκνότητά του, την απόκλισή του από τη σφαιρικότητα και το ρυθμό μεταβολής του σχήματός του, ο οποίος εξαρτάται και από τις επιφανειακές ταλαντώσεις, οι οποίες θεωρούνται αρμονικά αποσβενήμενες και παράλληλες στη σχετική ταχύτητα υγρού-αερίου. Η συνάρτηση δημιουργίας σταγονιδίων καθορίζει τον πιθανό αριθμό των σταγονιδίων ανά μονάδα όγκου που βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο μήκος x από το στόμιο, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και οι τιμές των ταχυτήτων, ακτινών, θερμοκρασιών και μεταβλητών σχήματός τους είναι ίδιες μία προς μία. Το σύνολο των σταγονιδίων έτσι χωρίζεται σε ομάδες ίδιων ιδιοτήτων με ίδιες συμπεριφορές. Η μεταβολή της πιθανότητας αυτής στο χρόνο λαμβάνει υπόψη τις πιθανότητες παραγωγής σταγονιδίων λόγω σύγκρουσης των σταγονιδίων μεταξύ τους, είτε αυτά έχουν κοινές ιδιότητες, οπότε δεν εμφανίζεται μεταβολή, είτε όχι, αλλά και λόγω διάσπασης σταγονιδίων.

Η στοχαστική συνάρτηση σύγκρουσης δίνει τον πιθανό αριθμό παραγόμενων σταγονιδίων με κοινές ιδιότητες (ταχύτητες, θερμοκρασία, ακτίνα, σχήμα) που μπορεί να παραχθούν από τη σύγκρουση των σταγονιδίων μιας ομάδας συγκεκριμένων ιδιοτήτων με αυτά μιας άλλης ομάδας συγκεκριμένων διαφορετικών ιδιοτήτων. Το μοντέλο προσομοιάζει δύο πιθανές συγκρούσεις σταγονιδίων, οι οποίες εξαρτώνται από μια παράμετρο σύγκρουσης. Αν η παράμετρος αυτή είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, που υπολογίζεται σαν συνάρτηση των ακτινών των δύο σταγονιδίων και της επιφανειακής τάσης τους, τα σταγονίδια συγκρούονται μεταβάλλοντας μόνο τις ταχύτητές τους, διαφορετικά συσσωματώνονται. Όσο μεγαλύτερη είναι θερμοκρασία, τόσο μικρότερες είναι οι επιφανειακές τάσεις και τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα συσσωμάτωσης. Αναφέρεται ότι η συχνότητα σύγκρουσης των σταγονιδίων κάθε ιδιότητας είναι γνωστή και στατιστικά υπολογισμένη πειραματικά. Με βάση αυτή τη γνώση θα μπορούσε να υπολογίζεται ο αριθμός των σταγονιδίων μιας ομάδας ιδιοτήτων που συγκρούονται με σταγονίδια άλλης ομάδας ιδιοτήτων, με μεγάλη όμως υπολογιστική απαίτηση, λόγω αλλαγής των πληθυσμών των ομάδων κοινών ιδιοτήτων. Αντί αυτού, η συχνότητα σύγκρουσης

μεταφράζεται ως πιθανότητα μιας σταγόνας μιας ομάδας να συγκρουστεί με μία ή περισσότερες σταγόνες άλλης ομάδας αυστηρώς του ίδιου κελιού, και ο αριθμός των συγκρούσεων της ακολουθεί κατανομή Poisson. Η μέση τιμή των συγκρούσεων μιας σταγόνας με άλλες άλλης ομάδας σε ένα κελί είναι ίση με τη στατιστική συχνότητα επί τον υπολογιστικό χρόνο Δt . Έτσι η πιθανότητα να μη συμβεί η σύγκρουση είναι e^{-n} , και όσο ένας τυχαία επιλεγμένος αριθμός, εντός του εύρους (0,1), είναι μικρότερος της πιθανότητας e^{-n} , τόσο η σύγκρουση δεν συμβαίνει. Συνεπώς, όλες οι σταγόνες μιας ομάδας έχουν την ίδια πιθανότητα να συγκρουστούν με αυτές μιας άλλης ομάδας. Όταν η σύγκρουση συμβεί, όλες οι σταγόνες μιας ομάδας θα συγκρουστούν ταυτόχρονα με αυτές της άλλης ομάδας και επειδή έχουν όλες ίδιες ιδιότητες θα συνεχίσουν να έχουν κοινές ιδιότητες και μετά τη σύγκρουση. Αν τα σταγονίδια συσσωματώνονται, τότε ο αριθμός των μικρότερων σταγονιδίων του κελιού αυτού αφαιρείται από την αντίστοιχη ομάδα κοινών ιδιοτήτων και οι ιδιότητες των μεγαλύτερων σταγονιδίων τροποποιούνται κατάλληλα. Αν πάλι τα σταγονίδια συγκρούονται, κάτι που συμβαίνει για σταγονίδια κοντινούς μεγέθους και συνεπώς για ζεύγη σταγονιδίων, συμβαίνουν τόσες συγκρούσεις όσες και ο μικρότερος πληθυσμός εκ των δύο ομάδων, με τη μικρότερη ομάδα να αλλάζει μόνο ιδιότητες, και από τη μεγαλύτερη να δημιουργείται μια νέα ομάδα ίσου πληθυσμού με την άλλη. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, η πιθανότητα κατακερματισμού και ολικής θρυμματίσης των σταγονιδίων μετά από έντονη σύγκρουση, δε μοντελοποιείται. Επίσης, κατά την πρόσκρουση σταγονιδίου σε τοίχωμα, δεν λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα ανάκλασής του ούτε κίνησής του παράλληλα με αυτό.

Η στοχαστική συνάρτηση διάσπασης σταγονιδίων εκφράζει τον πιθανό αριθμό των σταγονιδίων με κοινές ιδιότητες (μεταβλητές ταχύτητας, θερμοκρασίας, ακτίνας, σχήματος) που μπορεί να παραχθούν από μια μεγαλύτερη σταγόνα συγκεκριμένων ιδιοτήτων A. Ο τελικός αριθμός των σταγονιδίων με κοινές ιδιότητες προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ομάδων σταγονιδίων κοινών ιδιοτήτων που παρήχθησαν από σταγόνες ιδιοτήτων A. Διάσπαση του σταγονιδίου θεωρείται ότι επέρχεται όταν η μεταβλητή απόκλιση σχήματος, που υπολογίζεται ως το κλάσμα της απόκλισης της επιφάνειας από τη θέση ισορροπίας της προς την θεωρητική ακτίνα του σταγονιδίου, ξεπεράσει τη μονάδα. Ο αριθμός αυτός μεταβάλλεται σε κάθε βήμα σύμφωνα με το ρυθμό παραμόρφωσης, και πρακτικά η διάσπαση επέρχεται όταν ξεπεραστεί ένα όριο αριθμού We και πλάτους ταλάντωσης. Τότε παράγεται ένας αριθμός μικρότερων σταγονιδίων με ιδιότητες που προκύπτουν από αυτές του αρχικού. Τα μικρά σταγονίδια, τα οποία έχουν μικρή συχνότητα ταλάντωσης, θεωρούνται σφαιρικά με μηδενικό ρυθμό παραμόρφωσης και δε διασπώνται. Η ακτίνα των παραγόμενων σταγονιδίων ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εξαρτάται κυρίως από την αρχική ακτίνα. Οι ταχύτητες των παραγόμενων σταγονιδίων επίσης διαφέρουν από την αρχική ταχύτητα του σταγονιδίου κατά ένα μέγεθος ανάλογο της αρχικής ακτίνας και της αρχικής έντασης παραμόρφωσης. Τα παραγόμενα σταγονίδια θεωρούνται σφαιρικά και μη ταλαντούμενα. Είναι σαφές λοιπόν ότι δε λαμβάνεται υπόψη και δεν αναπαριστάται ο δευτερογενής διασκορπισμός του σπρέι.

Η τροχιά των μεμονωμένων σταγονιδίων επηρεάζεται από την επιτάχυνσή του, από τη μεταβολή της θερμοκρασίας του, από τη μεταβολή της ακτίνας του λόγω εξάτμισης και από τη μεταβολή του ρυθμού παραμόρφωσής του. Η ανταλλαγή μάζας, ενέργειας και ορμής της ομάδας σταγονιδίων γίνεται με το αέριο που βρίσκεται στο ίδιο κελί-όγκο ελέγχου με αυτά. Η επιβράδυνση του κάθε σταγονιδίου λαμβάνει υπόψη τις αεροδυναμικές αντιστάσεις και τις δυνάμεις βαρύτητας, που είναι και οι πιο σημαντικές εξωτερικές δυνάμεις που επιδρούν στην κίνησή του. Δυνάμεις υδροστατικής άνωσης, βαθμίδας πίεσης, φαινόμενης μάζας, δυνάμεις Magnus ή Saffman κ.α. αγνοούνται ως αμελητέες. Στην αεροδυναμική αντίσταση, όπως και στο ρυθμό εξάτμισης του σταγονιδίου, συνυπολογίζεται, εκτός από τη μέση ταχύτητα του αερίου, και η ταχύτητα της τύρβης του. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας της τύρβης, που είναι μέγεθος στοχαστικό, ακολουθεί κανονική κατανομή και η τιμή της παραμένει σταθερή για χρόνο συσχέτισης της τύρβης t_{turb} , που ορίζεται ως η ελάχιστη τιμή του χρόνου θραύσης δίνης (eddy break-up time) και του χρόνου διάσχισης της δίνης από το σταγονίδιο. Όταν το χρονικό βήμα είναι μικρότερο του t_{turb} , που είναι και η συχνότερη περίπτωση, η υπόθεση σταθερής ταχύτητας και θέσης δίνης (μεγέθη και τα δύο στοχαστικά) ισχύει. Όταν όμως το t_{turb} είναι μικρότερο του χρονικού βήματος, δηλαδή όταν σε ένα υπολογιστικό χρονικό διάστημα υπάρχει έντονη μεταβολή δίνης, η ταχύτητα και η θέση της αλλάζουν τυχαία, χωρίς όμως η αλλαγή αυτή να επηρεάζει τις εξισώσεις μεταφοράς του σταγονιδίου, γεγονός που δεν αντανakλά την πραγματικότητα. Επίσης, ακριβώς επειδή η ταχύτητα και θέση της δίνης είναι στοχαστικά μεγέθη, δεν υπολογίζεται η επίδραση του σπρέι στη μεταβολή της. Παρότι ωστόσο θέση και ταχύτητα είναι στοχαστικά, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μεταβολής τους.

Ο ρυθμός μεταβολής της ακτίνας του σταγονιδίου κατά την εξάτμισή του υπολογίζεται από τον τύπο του Frossling. Για την εξάτμιση του σταγονιδίου, ενώ θεωρείται ότι η θερμοκρασία στη μάζα του είναι ομοιόμορφη, η τοπική πίεση στην επιφάνειά του διαφέρει και είναι ίση με την πίεση εξάτμισης για τη δεδομένη θερμοκρασία. Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας υπολογίζεται από την εξίσωση διατήρησης ενέργειας,

στην οποία συμμετέχουν η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού, η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης και ο ρυθμός συναγωγής θερμότητας μέσω της επιφάνειας του σταγονιδίου. Ακριβώς επειδή θεωρείται ότι το σταγονίδιο διατηρεί σταθερή θερμοκρασία στον όγκο του, η ατμοποίηση είναι καθυστερημένη συγκριτικά με αυτή που συμβαίνει στην πραγματικότητα, καθώς στην πραγματικότητα δεν απαιτείται να θερμανθεί όλη η μάζα του σταγονιδίου προτού αρχίσει να εξατμίζεται, αλλά μόνο η μάζα κοντά στην επιφάνειά του. Η ενέργεια που δέχεται το σταγονίδιο από την τύρβη είτε το θερμαίνει είτε βοηθάει στην ατμοποίησή του. Η μεταβολή του ρυθμού παραμόρφωσης του σταγονιδίου προκύπτει από την θεώρηση αποσβενύμενης αρμονικής ταλάντωσης της επιφάνειάς του, με εξωτερική δύναμη την αεροδυναμική (συμπεριλαμβανομένης της τύρβης), δύναμη επαναφοράς τη δύναμη επιφανειακής τάσης και δύναμη απόσβεσης αυτή της συνεκτικότητας του υγρού.

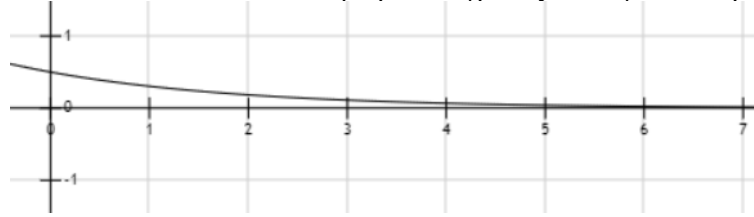
Από τις συναρτήσεις δημιουργίας σταγονιδίων προσομοιάζεται στοχαστικά η δημιουργία των σταγονιδίων στο χώρο και στο χρόνο και καθορίζονται οι ιδιότητές τους, ενώ με γνωστές τις ιδιότητες αυτές και τις στοχαστικές τιμές της τύρβης είναι δυνατόν να περιγραφεί η χρονική ιστορία των ιδιοτήτων της κάθε σταγόνας από τη δημιουργία της μέχρι την καταστροφή της ή την πλήρη ατμοποίησή της. Οι ιδιότητες μεμονωμένου σταγονιδίου σαφώς μεταβάλλονται μέσω της αλληλεπίδρασής του με το αέριο περιβάλλον. Αθροίζοντας τις μεταβολές όλων των σταγονιδίων σε μια συγκεκριμένη απόσταση x μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t προκύπτουν οι μεταβολές στην αέρια μάζα λόγω εξάτμισης, η μεταβολή θερμότητας λόγω υδροδυναμικής τριβής αλλά και εξάτμισης, η μεταβολή της ορμής της αέριας μάζας λόγω υδροδυναμικής αντίστασης και η μεταβολή κινητικής ενέργειας της αέριας φάσης λόγω υδροδυναμικής αντίστασης. Οι παραπάνω αυτές μεταβολές αποτελούν την επίδραση του σπρέι, δηλαδή της υγρής φάσης, στις βασικές εξισώσεις μεταφοράς της αέριας φάσης σε κάθε κελί-όγκο ελέγχου.

4.1.3. Οριακές συνθήκες και επίλυση

Οι χωρικές οριακές συνθήκες έχουν να κάνουν κυρίως με τις ταχύτητες και τη θερμοκρασία στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Σαν οριακή συνθήκη ταχύτητας στα τοιχώματα μπορεί να θεωρηθεί η ελεύθερη ολίσθηση, η μη ολίσθηση ή λογαριθμική συνθήκη τυρβώδους ροής σε τοίχωμα, σύμφωνα με την οποία η μέση τιμή της ταχύτητας τύρβης σε ένα σημείο κοντά σε ένα τοίχο είναι ανάλογη με το λογάριθμο της απόστασης του σημείου αυτού από τον τοίχο. Οι οριακή συνθήκη θερμοκρασίας είναι είτε αδιαβατικά τοιχώματα (δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον) είτε τοιχώματα σταθερής θερμοκρασίας (λόγω ψύξης των εξαρτημάτων). Οι συνθήκες που αντιπροσωπεύουν καλύτερα μια MEK είναι ο λογαριθμικός νόμος ταχύτητας τύρβης και η σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων. Στην περίπτωση αυτή, εκτός από την απώλεια ενέργειας λόγω ανταλλαγής θερμότητας του ρευστού με τα τοιχώματα, υπολογίζεται και η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας των τοιχωμάτων λόγω τριβής του ρευστού με αυτά. Όταν ένα σταγονίδιο προσκρούει σε κάποιο τοίχωμα θεωρείται ότι αποκτά την ταχύτητα του τοιχώματος και δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας με αυτό. Για την περιγραφή της ροής κοντά στα τοιχώματα γίνονται κάποιες απλουστευτικές παραδοχές: σχεδόν σταθερή ροή, συνιστώσα ταχύτητας παράλληλη στον τοίχο παραμένει σταθερή, δεν υπάρχουν μεταβολές πίεσης παράλληλες στη ροή, δε συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις πολύ κοντά στα τοιχώματα, δεν υπάρχουν πηγές παραγωγής σταγονιδίων, η απώλεια θερμότητας προς τα τοιχώματα είναι μικρή και σταθερή χρονικά (όπως σταθερή είναι και η θερμοκρασία των τοιχωμάτων), οι αριθμοί Reynolds είναι μεγάλοι (υπόθεση τυρβώδους ροής) και ο αριθμός Mach είναι μικρός (υποηχητική ροή), ώστε η μεταβολή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας σε εσωτερική είναι αμελητέα. Ο διαχωρισμός της κοίλης επιφάνειας του τοιχώματος γίνεται σε έναν αριθμό επιμέρους επίπεδων επιφανειών, που ορίζεται από το χρήστη. Όσο μικρότερος ο αριθμός τόσο το τοίχωμα αποκλίνει από την πραγματικότητα, έχοντας μεγαλύτερες επίπεδες επιφάνειες.

Οι αρχικές συνθήκες αφορούν κυρίως την έγχυση του σπρέι στο θάλαμο καύσης, καθώς οι αρχικές συνθήκες του αέρα εύκολα ορίζονται για όλο το θάλαμο καύσης από το χρήστη, με τον αέρα να θεωρείται είτε ακίνητος είτε με κάποια αρχική στροφοκτικότητα. Σχετικά με την αρχική ακτίνα των σταγονιδίων ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ δύο κατανομών. Για τη σημαία INJDIST=0, η διασπορά έχει μία κοινή τιμή για όλα τα σταγονίδια, που αντιστοιχεί στην ακτίνα της οπής του ακροφυσίου, ή στη μισή αυτής εφόσον υπάρχει βαλβίδα φραγής της και ορίζεται από το χρήστη ως τιμή της μεταβλητής SMR. Στην περίπτωση αυτή η διάσπαση των μεγάλων αυτών σταγονιδίων προσδιορίζεται από το στοχαστικό μοντέλο διάσπασης. Για τη σημαία INJDIST=1, η ακτίνα των εισαγόμενων σταγονιδίων ακολουθεί τετραγωνική κατανομή, με πιθανότερη έγχυση μεγέθους της επικρατούσας τιμής της συνάρτησης κατανομής μάζας. Σε κάθε περίπτωση η μέση τιμή της ακτίνας των σταγονιδίων είναι σταθερή στο χρόνο και ορίζεται από το χρήστη μέσω της ακτίνας $SMR=r_{23}$, όπου r_{23} είναι η ακτίνα Sauter και $\# = 1/3 * r_{23}$. Η συνάρτηση κατανομής $f(r)$ του μεγέθους των σταγονιδίων φαίνεται παρακάτω, όπου στον κατακόρυφο άξονα y είναι ο αριθμός των σταγονιδίων με ακτίνα

r , όπου η ακτίνα r απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα. Το εμβαδό της συνάρτησης αυτής δίνει μονάδα, που σημαίνει ότι η $f(r)$ δίνει το ποσοστό επί του ολικού αριθμού δείγματος A σταγονιδίων με ακτίνα r :



Εικόνα 63: Συνάρτηση κατανομής ακτίνας σταγονιδίων ψεκασμού KIVA3

Δεδομένου ότι η μάζα του κάθε σταγονιδίου είναι ανάλογη με τον κύβο της ακτίνας του, τότε η συνολική μάζα μιας ομάδας σταγονιδίων ίδιου μεγέθους είναι ανάλογη της ποσότητας $r^3 f(r)A$. Η συνάρτηση κατανομής της μάζας σε κάθε ομάδα μεγέθους ($r^3 f(r)A$) φαίνεται παρακάτω, όπου στον κατακόρυφο άξονα είναι η συνολική μάζα υγρού που διανέμεται στην κάθε ομάδα μεγέθους r , η ακτίνα της οποίας απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα. Φαίνεται ότι η περισσότερη μάζα, δηλαδή η τιμή του ολικού μεγίστου, αντιστοιχεί στην ομάδα με ακτίνα r_{23} (ακτίνα Sauter SMR) :



Εικόνα 64: Συνάρτηση κατανομής συνολικής μάζας σταγονιδίων ίδιας ομάδας

Η ολοκλήρωση της παραπάνω συνάρτησης για όλες τις ομάδες ($r=0 \rightarrow \infty$) δίνει την ποσότητα με την οποία είναι ανάλογη η συνολική εγχυόμενη μάζα, ως το άθροισμα των μαζών όλων των ομάδων. Το ολοκλήρωμα αυτό ισούται με $6\pi^3 A$ και προσεγγίζεται καλά αν θεωρηθεί ότι η μέγιστη πιθανή ακτίνα είναι $r_{\max}=4 \cdot r_{23}$. Η συνάρτηση επομένως $r^3 f(r)/(6\pi^3)$ δίνει το ποσοστό μάζας επί της συνολικά εγχυόμενης που αντιστοιχεί στην κάθε ομάδα μεγέθους. Το εύρος ακτινών r_{\max} χωρίζεται σε 100 επιμέρους διακριτές τιμές $[0, r_{\max}/100, 2r_{\max}/100, \dots, r_{\max}]$. Η αθροιστική συνάρτηση της παραπάνω παίρνει τιμές εντός των ορίων $(0,1)$. Με τυχαία επιλογή μιας τιμής εντός του εύρους $(0,1)$ (μέθοδος Monte Carlo) υπολογίζεται σε ποιο διάστημα ακτινών $((n-1) r_{\max}/100, n r_{\max}/100)$ βρίσκεται ο αριθμός αυτός. Στη συνέχεια, με γνωστό τον αριθμό n προκύπτει η ακτίνα της ομάδας r_n , δεν προκύπτει όμως και η μάζα της ομάδας. Αν επιτυγχάνονταν άπειρες επιλογές εντός του εύρους $(0,1)$ η μάζα της κάθε ομάδας θα προσεγγίζονταν μέσω της συνάρτησης $r^3 f(r) TSPMAS/6\pi^3$ και το σύνολό τους θα έδινε τη συνολική μάζα. Δεν είναι ωστόσο εφικτό να γίνουν ούτε άπειρες αλλά ούτε και συνεχείς επιλογές και οποιαδήποτε διακριτή επιλογή με τιμή μάζας ομάδας υπολογισμένη από την παραπάνω συνάρτηση δίνει μειωμένο αποτέλεσμα συνολικής μάζας. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η συνάρτηση κατανομής μεγέθους έχει προκύψει από στατιστικά στοιχεία τα οποία προέρχονται συνήθως από μετρήσεις μεγέθους σταγονιδίων σε σπρέι ανά τακτά και ίσα χρονικά διαστήματα. Ο αντικατοπτρισμός των μετρήσεων αυτών στην μοντελοποίηση θα υπαγόρευε ομοιόμορφη κατανομή ακτίνας r_n συνολικής μάζας TSPMAS σε κάθε χρονικό υπολογιστικό βήμα, ούτως ώστε τελικά να έχει εγχυθεί η συνολική μάζα με τυχαίες επιλογές μεγέθους σταγονιδίων από τη συνάρτηση $f(r)$ αλλά με ίσες μάζες ομάδας TSPMAS και αριθμό ομάδων ίσο με τα χρονικά βήματα. Κάτι τέτοιο θα προσέγγιζε την πραγματικότητα μόνο στο τέλος της έγχυσης αλλά όχι και στο κάθε χρονικό βήμα. Αντί λοιπόν να διαιρεθεί ισόποσα η συνολική μάζα έγχυσης σε κάθε χρονικό βήμα και κάθε χρονικό βήμα να παράγει μια ομάδα, διαιρείται ισόποσα η TSPMAS σε κάθε ομάδα εντός ενός χρονικού βήματος. Έτσι, σε κάθε υπολογιστική επανάληψη, επιλέγονται τυχαία τόσοι αριθμοί από το διάστημα $(0,1)$ όσοι και ο αριθμός των ομάδων σταγονιδίων και μέσω της αντίστροφης αθροιστικής συνάρτησης προκύπτουν οι διαφορετικές ακτίνες των ομάδων. Με δεδομένη την επιμέρους μάζα του κάθε σταγονιδίου r_i και τη συνολική μάζα της κάθε ομάδας TSPMAS/TNPARC, προκύπτει ο αριθμός των σταγονιδίων κάθε ομάδας. Ο αριθμός των ομάδων, δηλαδή ο αριθμός των διαφορετικών μεγεθών που εγχέονται, δίνεται από το χρήστη μέσω της μεταβλητής TNPARC. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός αυτός τόσο περισσότεροι οι υπολογισμοί αλλά και τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η πραγματικότητα.

Η συνάρτηση ταχύτητας των σταγονιδίων στο χρόνο και η κατεύθυνση του σπρέι μπορεί να οριστεί αυθαίρετα από το χρήστη. Οι κατευθύνσεις έγχυσης των σταγονιδίων κατά την έγχυσή τους είναι ομοιόμορφα

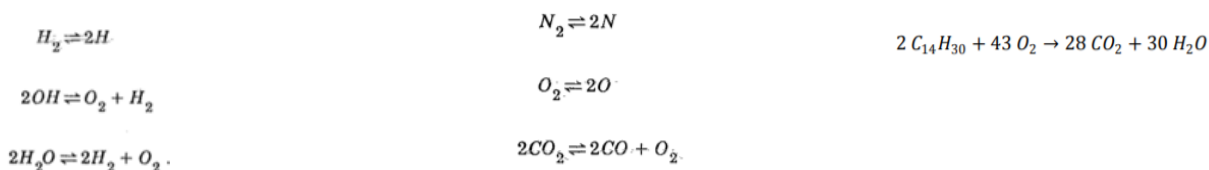
κατανεμημένες στον κώνο με άξονα αναφοράς την κατεύθυνση του σπρέι. Η θερμοκρασία των σταγονιδίων κατά την έγχυσή τους είναι όμοια για όλα και ορισμένη από το χρήστη (T_{inj}). Αν η συνάρτηση διάσπασης σταγονιδίων είναι ενεργή τότε το σχήμα των σταγονιδίων κατά την έγχυσή τους θεωρείται σφαιρικό, όχι όμως και με μηδενικό ρυθμό παραμόρφωσης.

Η επίλυση των στοχαστικών φαινομένων που διέπουν τη συμπεριφορά των ομάδων σταγονιδίων γίνεται και διακριτά αλλά και με μέθοδο που βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo. Η διακριτή επίλυση αφορά την εναλλαγή θερμότητας, μάζας και ορμής όλων των σταγονιδίων με το αέριο του κελιού τους, δηλαδή αφορά την αλλαγή των τιμών των ιδιοτήτων τους και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της επίδρασης της υγρής φάσης στην αέρια ροή. Η μέθοδος Monte Carlo αφορά την επίλυση των στοχαστικών συναρτήσεων μεγέθους έγχυσης των σταγονιδίων, σύγκρουσης και διάσπασής τους, καθώς και της στοχαστικής τιμής της ταχύτητας της τύρβης όταν αυτή αλλάζει. Στην επίλυση αυτή είναι γνωστές οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας από πειραματικά και στατιστικά δεδομένα και η επίλυση γίνεται με παρόμοιο τρόπο με την επίλυση μεγέθους σταγονιδίων της έγχυσης, που περιγράφηκε παραπάνω.

4.1.4. Μοντελοποίηση χημικής κινητικής

Επειδή οι αντιδράσεις υδρογονανθράκων, που περιλαμβάνουν τη δημιουργία ενδιάμεσων ελεύθερων ριζών, εκτελούνται ταχύτατα, ο υπολογισμός τους γίνεται με υπορουτίνα αριθμητικής επίλυσης διαφορετική από αυτή των υπόλοιπων αντιδράσεων, η οποία εκτελείται επαναληπτικά. Συνεπώς θεωρείται ότι οι υδρογονάνθρακες δε συμμετέχουν σε καμία αντίδραση ισορροπίας αργότερου ρυθμού. Οι συντελεστές ρυθμού αντίδρασης, ενθαλπίες και πυκνότητες υπολογίζονται προσεγγιστικά για την κάθε αντίδραση ανάλογα με τη θερμοκρασία της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής στο κάθε κελί. Ιδιότητες όπως μοριακά βάρη, ενθαλπίες σχηματισμού, κρίσιμα σημεία, όπως και οι συστάσεις μιας ομάδας καυσίμων είναι πληροφορίες που δε χρειάζεται να εισάγει ο χρήστης.

Για την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης ενέργειας και παραγωγής θερμότητας λόγω καύσης στις εξισώσεις αργής χημικής κινητικής (υπορουτίνα CHEMEQ) χρησιμοποιείται επαναληπτική διαδικασία SOR-Newton, και όπου η σύγκλιση δεν είναι επαρκής ενεργοποιείται επαναληπτικός αλγόριθμος Newton-Raphson. Για τις ταχείες αντιδράσεις (υπορουτίνα CHMQGM) που είναι σημαντικές για την οξείδωση των υδρογονανθράκων χρησιμοποιείται αλγόριθμος των Meintjes και Morgan. Στην περίπτωση αυτή δεν υπολογίζεται ο ρυθμός της κάθε αντίδρασης, αλλά οι συγκεντρώσεις ισορροπίας των συμμετεχόντων στοιχείων. Για την επίλυση χρησιμοποιείται και η εξίσωση διατήρησης των στοιχείων για τον άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και νάτριο. Η οξείδωση του καυσίμου θεωρείται ότι συμβαίνει μονοβηματικά και η παραγωγή ελεύθερων ριζών αλκυλίων παραλείπεται. Η επίδραση της έκλυσης θερμότητας από αυτές τις αντιδράσεις δε λαμβάνεται υπόψη στη μεταβολή των συντελεστών θερμοχωρητικότητας και για το λόγο αυτό μεν οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από κύκλο σε κύκλο υπολογισμού η επίλυση δε είναι σαφώς ταχύτερη της επαναληπτικής διαδικασίας. Τα κελιά που βρίσκονται κάτω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία δεν καλούν καμία υπορουτίνα και καμία χημική αντίδραση δε συμβαίνει σε αυτά:



Η πρόβλεψη των ρύπων, εξαιτίας της παράλειψης των αλκυλίων και άλλων ενδιάμεσων ενώσεων και χημικών αντιδράσεων είναι ελλιπής, τόσο στα NO_x , CO και HC όσο και στα soot, τα οποία υπολογίζονται από ένα εμπειρικό μοντέλο βασισμένο στο μοντέλο των Suroviki και Nagle/Strickland-Constable, που δεν περιγράφει την ακριβή εξέλιξη της παραγωγής και οξείδωσής τους.[187]

4.1.5. Αντικαταστάσεις μοντέλων

Επειδή ο κώδικας είναι ανοιχτός προς το χρήστη, υπάρχει η ευχέρεια παρέμβασης και αλλαγής όσων μοντέλων δε θεωρούνται ικανά για την ακριβή περιγραφή ενός φαινομένου και αντικατάστασής τους με άλλα ακριβέστερα και πιο εξελιγμένα. Οι περισσότερες έρευνες και αντικαταστάσεις γίνονται στον τομέα της χημικής κινητικής, συμπεριλαμβανομένων των φαινομένων έναυσης, καύσης και δημιουργίας ρύπων, στον οποίο ο αρχικός κώδικας KIVA-II έχει αρκετές ελλείψεις και ανακρίβειες. Πολλές προσπάθειες έχουν επίσης γίνει για την επέκταση της βιβλιοθήκης καυσίμων, των οποίων ο KIVA μπορεί να προσομοιάζει την καύση τους, αλλά και την εισαγωγή μοντέλων ατμοποίησης και καύσης πολυσυστατικών καυσίμων. Τέλος, η

ανάπτυξη και βελτιστοποίηση μοντέλων δημιουργίας σπρέι και φαινομένων εξέλιξης του είναι σημαντική, ιδιαίτερα όσον αφορά τα μοντέλα διάσπασης, σύγκρουσης σταγονιδίων και πρόσκρουσης στα τοιχώματα.

4.1.5.1. Μοντέλα καύσης[189]

Σχετικά με τη μοντελοποίηση της έναυσης έχουν επικρατήσει δύο μορφές μοντέλων: εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε πειράματα έναυσης καυσίμου diesel, και υπολογιστικά μοντέλα βασισμένα σε εκτενείς υπολογιστικούς μηχανισμούς ή συνδυασμός αυτών. Στην πρώτη μέθοδο η έναυση εξαρτάται από έναν συντελεστή καθυστέρησης έναυσης, που είναι υπολογισμένος πειραματικά, και όταν η τιμή του ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή ενεργοποιούνται τα μοντέλα της καύσης. Στη δεύτερη μέθοδο μοντελοποιείται η δημιουργία και κατανάλωση κάποιων ενδιάμεσων στοιχείων, που είτε είναι πραγματικά είτε η συμπεριφορά τους ομοιάζει αυτή των πραγματικών ενδιάμεσων ενώσεων που παράγονται κατά την έναυση. Η ενεργοποίηση των μοντέλων της καύσης γίνεται είτε όταν ξεπεραστεί κάποια θερμοκρασία, είτε όταν ο ρυθμός κατανάλωσης του καυσίμου στο μοντέλο της έναυσης γίνει αρκετά μεγάλος, ώστε προσομοιάζεται η ταχύτερη θερμική έναυση και καύση. Τα υβριδικά μοντέλα, όπως το μοντέλο Shell, περιλαμβάνουν 6 ενδιάμεσες ενώσεις και 8 επιπλέον αντιδράσεις έναυσης, οι συντελεστές καύσης των οποίων όμως έχουν τέτοιες τιμές ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να συνάδουν με αυτά των πειραμάτων καθυστέρησης έναυσης.

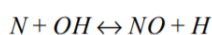
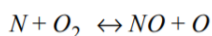
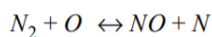
Τα αναπτυγμένα μοντέλα έναυσης που συνεργάζονται με τον KIVA λαμβάνουν υπόψη την παραγωγή ελεύθερων ριζών σε χαμηλές, μέτριες και ψηλές θερμοκρασίες πριν την έναυση της καύσης. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο της καύσης ενεργοποιείται τοπικά όταν η συγκέντρωση των ελεύθερων ριζών έχει ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή στο συγκεκριμένο κελί. Δεδομένου ότι στις περισσότερες αντιδράσεις έναυσης συμμετέχει το OH, ο ρυθμός παραγωγής του κρίνεται αρκετός για την ενεργοποίηση της καύσης. Μάλιστα, η συγκέντρωση αυτής της ενδιάμεσης ένωσης επαρκεί ως κριτήριο για όλους τους συνδυασμούς θερμοδυναμικών τιμών και η κρίσιμη τιμή της είναι ανεξάρτητη από αυτές. Επίσης, δεδομένου ότι η συγκέντρωση της εναρκτήριας ελεύθερης ρίζας είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις συγκεντρώσεις των υπόλοιπων αντιδρώντων, θεωρείται ότι δεν επηρεάζει τις αντιδράσεις της καύσης και συνεπώς ο υπολογισμός της παραγωγής της χρησιμεύει μόνο ως κριτήριο έναυσης καύσης. Η σταθερά πάνω από την οποία ξεκινά η καύση έχει οριστεί πειραματικά από μελέτες καθυστέρησης έναυσης επτανίου, ενώ η χρονική κλίμακα έναυσής του είναι ένας συνδυασμός καθυστέρησης έναυσης υπολογισμένης σε χαμηλές, μέτριες και υψηλές θερμοκρασίες. Οι σταθερές αυτές πολλαπλασιάζονται με κατάλληλους συντελεστές ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Επειδή οι αντιδράσεις αυτές και η κρίσιμη συγκέντρωση εμφανίζεται συνήθως κοντά στα σταγονίδια και όχι σε όλο το κελί, οι μέσες θερμοκρασίες και πιέσεις του κελιού δεν είναι κατάλληλες για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης της ελεύθερης ρίζας. Αντ' αυτού υπολογίζονται οι μέσες τιμές μιας ομάδας γειτονικών κελιών και με γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται μια μέση τιμή των ιδιοτήτων των κελιών και αυτών που επικρατούν γύρω και κοντά στην επιφάνεια κάθε σταγονιδίου. Προκύπτει έτσι το σημείο το οποίο έχει τις πιο στοιχειομετρικές ιδιότητες, ώστε είναι και το πρώτο που θα αναφλεγεί, έχοντας μη μηδενικό ρυθμό παραγωγής OH. Όταν η συγκέντρωση OH ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή στο κελί της ανάφλεξης, ενεργοποιούνται τα μοντέλα της καύσης. Το μοντέλο της έναυσης δεν παύει να λειτουργεί για τα υπόλοιπα κελιά, προκειμένου να μην μοντελοποιείται μόνο η έναυση μέσω διάδοσης φλόγας και αύξησης ενθαλπίας αλλά και μέσω θερμικής συναγωγής και διάχυσης. Όταν καταναλωθεί όλο το καύσιμο το μοντέλο της έναυσης απενεργοποιείται. Το παραπάνω μοντέλο αναπτύχθηκε από τον Tanner & Weisser [190][191] και χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία, έχοντας το πλεονέκτημα του μειωμένου υπολογιστικού κόστους για μεγάλους κινητήρες.

Σχετικά με την εξέλιξη της καύσης έχουν επίσης αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα. Τα πρώτα μοντέλα βασίστηκαν στην εξάρτηση της κατανάλωσης του καυσίμου από τους χαρακτηριστικούς χρόνους των αντιδράσεων και της τύρβης. Το μοντέλο Magnussen υπολογίζει μια μονοβηματική καύση η οποία ανάλογα τις τοπικές συγκεντρώσεις καυσίμου, οξυγόνου και προϊόντων έχει και διαφορετικό ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου. Η μετάβαση από καύση προανάμειξης σε καύση διάχυσης γίνεται ασυνεχώς, όταν ξεπεραστεί ένα κρίσιμο κριτήριο και αυτός είναι και ο βασικός λόγος που το μοντέλο αυτό δε λειτουργεί καλά σε μεγάλους κινητήρες, όπου η αρχική θερμοκρασία είναι ήδη αρκετά υψηλή. Το μοντέλο βασίζεται στην ιδέα ότι η καύση διάχυσης, που απαρτίζει το μεγαλύτερο μέρος της, εκτελείται με τα αντιδρώντα σε διαφορετικές δίνες. Η ανάμειξη επομένως των αντιδρώντων και η καύση τους εξαρτάται από το ρυθμό διασποράς των δινών, δηλαδή από το μοντέλο k-ε και δευτερευόντως από την τοπική στοιχειομετρία. Άλλα μοντέλα (Kong et al.), επίσης βασισμένα στους χαρακτηριστικούς χρόνους αντιδράσεων και δινών, υπολογίζουν το ρυθμό κατανάλωσης των αντιδρώντων μέσω ενός συντελεστή που δίνει τη χρονική κλίμακα διάδοσης στρωτής φλόγας αυξημένη κατά ένα ποσοστό χρονικής κλίμακας τυρβώδους φλόγας, που είναι ανάλογο του λόγου k/ε. Το ποσοστό

εξαρτάται από το λόγο μάζας προϊόντων προς το σύνολο αντιδρώντων και προϊόντων. Έτσι, όταν τα προϊόντα είναι λίγα, δηλαδή κοντά στην αρχή της έναυσης, η καύση οδηγείται από τις χημικές αντιδράσεις, ενώ όσο τα αντιδρώντα καταναλώνονται, τόσο η καύση τους εξαρτάται από το επίπεδο τύρβης και περιδίνησης του μείγματος. Καθώς οι συγκεντρώσεις μεταβάλλονται μεταβάλλεται και ο ρυθμός, με συνέπεια οι αντιδράσεις να είναι εγγενώς πολυβηματικές και η μετάβαση από καύση προανάμειξης σε διάχυσης σταδιακή. Μια δεύτερη ομάδα μοντέλων επιχειρεί την προσέγγιση της καύσης μοντελοποιώντας το μέτωπο της φλόγας. Ωστόσο οι δύσκολα υπολογίσιμες επιδράσεις της τύρβης σε αυτή αλλά και η ανικανότητα του μοντέλου στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων της τοπικής καύσης προανάμειξης μειώνουν την αποτελεσματικότητα των μοντέλων αυτών.

Το σύνθετο εξελιγμένο μοντέλο που υιοθετεί ο KIVA είναι μια επέκταση του μοντέλου των Kong et al.. Ο ρυθμός μεταβολής της μάζας των συστατικών είναι αντιστρόφως ανάλογος της χρονικής κλίμακας καύσης, η οποία υπολογίζεται ως γραμμική παρεμβολή μεταξύ χρονικής κλίμακας στρωτή και τυρβώδους φλόγας. Η χρονική κλίμακα στρωτής φλόγας είναι υπολογισμένη πειραματικά σε πείραμα αυτανάφλεξης σταγονιδίου δεκατετρανίου. Η χρονική κλίμακα τυρβώδους φλόγας είναι ανάλογη του λόγου k/ϵ , δηλαδή της κινητικότητας των δινών. Ο συντελεστής γραμμικής παρεμβολής, που αποτελεί κριτήριο στρωτής ή τυρβώδους φλόγας, είναι έτσι υπολογισμένος ώστε ακριβώς μετά την ανάφλεξη η καύση είναι εξολοκλήρου προανάμειξης και σταδιακά μεταβάλλεται σε καύση διάχυσης. Όταν ο συντελεστής είναι μηδενικός η φλόγα είναι προανάμειξης ενώ μέγιστος γίνεται για την περίπτωση πλήρους ανάπτυξης φλόγας διάχυσης. Η μέγιστη τιμή προκύπτει από τη μέση τιμή του ρυθμού μείωσης των αντιδρώντων και τη χρονική κλίμακα τυρβώδους ροής των γειτονικών κελιών. Άραξ και ξεπεραστεί η μέγιστη τιμή του συντελεστή αυτού η καύση θεωρείται εξολοκλήρου διάχυσης. Οι ρυθμοί παραγωγής και κατανάλωσης των συστατικών πολλαπλασιάζονται με κατάλληλο συντελεστή προκειμένου να γίνει η διαφοροποίηση για τη χρήση διαφορετικών καυσίμων.

Για τον υπολογισμό των NO_x συνηθέστερα χρησιμοποιείται ο εκτεταμένος μηχανισμός Zeldovich , που περιλαμβάνει και τον υπολογισμό του θερμικού NO . Παρότι δεν έχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια, άλλες μέθοδοι είναι λιγότερο συμφέρουσες, μιας και έχουν αρκετά μεγάλο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με την καλύτερη ακρίβεια που παρέχουν. Ο μηχανισμός αυτός έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα και με καλά αποτελέσματα σε πειράματα και υπολογισμούς πολλαπλής έγχυσης και διαφορετικής έναρξης έγχυσης. Ωστόσο σχεδόν πάντα ο ρυθμός παραγωγής NO πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή προκειμένου να προσεγγίσει καλύτερα την αντίστοιχη πειραματική τιμή. Στην περίπτωση αυτή δεν γίνεται κανένας ακριβής υπολογισμός παραγωγής prompt NO_x . Τα μοντέλα καύσης προσομοίωσης φλόγας μόνο παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού εκτεταμένων μηχανισμών παραγωγής NO_x και prompt NO_x , αλλά λόγω του γεγονότος ότι το θερμικό NO_x παράγεται σε πιο αργές κλίμακες από αυτές που δουλεύουν τα μοντέλα της φλόγας, η προσέγγιση των θερμικών NO_x είναι πιο αναποτελεσματική.



Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μοντέλα καύσης και δημιουργίας ρύπων, που χρησιμοποιούνται και στην έρευνα [189]. Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, ένας εκτενέστερος μηχανισμός 22 αντιδράσεων χημικής κινητικής και 6 αντιδράσεων ισορροπίας με 16 συμμετέχοντα στοιχεία-ενώσεις είναι ο καταλληλότερος ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και το υπολογιστικό κόστος. Σαφώς ο μηχανισμός αυτός έχει μεγαλύτερο κόστος, παρέχει όμως πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Για την πρόβλεψη της παραγωγής των soot ο KIVA χρησιμοποιεί ένα εμπειρικό μοντέλο. Στην παρούσα εργασία, αυτό έχει αντικατασταθεί από το μοντέλο του Hiroyasu [195] , που είναι ένα φαινομενολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται και στις έρευνες [194][179] με καλή σύγκλιση αποτελεσμάτων. Στο μοντέλο αυτό, για την παραγωγή των soot, λαμβάνεται υπόψη μια αντίδραση πρώτης τάξης του αεριοποιημένου καυσίμου και για την οξειδωσή τους χρησιμοποιείται μια αντίδραση δεύτερης τάξης άνθρακα (soot) και οξυγόνου. Κάθε στιγμή η συγκέντρωση των soot προκύπτει από τη διαφορά των παραγόμενων soot από αυτά που οξειδώνονται. Για τον υπολογισμό των ρυθμών παραγωγής και οξειδωσης χρησιμοποιούνται εμπειρικές σταθερές που εκφράζουν την επίδραση της στροφικότητας του μίγματος στις αντιδράσεις.

Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο Hiroyasu [195], που χρησιμοποιείται, είναι το παρακάτω και εκτελείται για κάθε όγκο/κελί υπολογισμού για να παραχθούν τα αποτελέσματα της επόμενης χρονικής στιγμής στο κάθε κελί:

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{dm_{sf}}{dt} - \frac{dm_{sc}}{dt}$$

$$\frac{dm_{sf}}{dt} = A_f \cdot m_{fg} \cdot p^{0.5} \exp\left(\frac{-E_{sf}}{RT}\right)$$

$$\frac{dm_{sc}}{dt} = A_c \cdot m_s \frac{P_{O_2}}{P} \cdot p^{1.8} \exp\left(\frac{-E_{sc}}{RT}\right)$$

, όπου m_s =mass of soot

, m_{sf} =mass of soot formation

, m_{sc} =mass of oxidated soot

, m_{fv} =μάζα ατμοποιημένου καυσίμου

, p_{O_2} =μέση πίεση του μοριακού οξυγόνου

, E_{sf} = ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης παραγωγής=σταθερά=12500 kcal/kmol

, E_{sc} =ενέργεια ενεργοποίησης αντίδρασης καύσης soot=σταθερά=14000 kcal/kmol.

Ο Hiroyasu αναφέρει ότι οι σταθερές A εξαρτώνται από τις περιδινήσεις που δημιουργούνται στον κινητήρα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως είναι η γωνία έγχυσης καυσίμου κλπ. Οι σταθερές αυτές είναι διαφορετικές για κάθε κινητήρα και προκύπτουν από την τελική πειραματική/πραγματική τιμή των παραγόμενων soot στον εκάστοτε κινητήρα. Ο κ. Δουλαδίδης στην εργασία του [179], όπου μελετά ίδιο κινητήρα με την παρούσα εργασία, με τη αρχή ότι τα τελικά soot είναι περίπου 1%~10% της μέγιστης μάζας παραγωγής τους κατά τη διάρκεια της καύσης και με δοκιμές βρίσκει ότι για τιμές $A_f=1$, $A_{ox}=7 \cdot 10^{-7}$, το μοντέλο προσεγγίζει πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα. Το ίδιο μοντέλο με τις ίδιες σταθερές χρησιμοποιεί και ο κ. Στρατσιαίνης στην εργασία του.

4.1.5.2. Μοντέλα σπρέι καυσίμου και τύρβης

Προσπάθειες για αποδοτικότερα μοντέλα διάσπασης σταγονιδίων έχουν γίνει κυρίως όσον αφορά τη μοντελοποίηση της δευτερογενούς διάσπασης. Οι Reitz et al. ανέπτυξαν ένα μοντέλο κατά το οποίο μικρότερα σταγονίδια αποσπώνται από την επιφάνεια μεγαλύτερων, το οποίο και είναι αρκετά αποτελεσματικό στη μοντελοποίηση πρωτογενούς διάσπασης όταν τα αρχικά σταγονίδια έγχυσης έχουν τη διάμετρο του ακροφυσίου, αλλά όχι τόσο αποτελεσματικό στη μοντελοποίηση της δευτερογενούς διάσπασης. Ο Tanner εξέλιξε το μοντέλο TAB (Taylor Analogy Break-up model) του KIVA, που μοντελοποιεί την πρωτογενή διάσπαση με κριτήριο την ταλάντωση της επιφάνειας των σταγονιδίων, ώστε να προβλέπεται και η δευτερογενής διάσπαση. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η στιγμή της πρωτογενούς διάσπασης καθυστερεί προκειμένου να προσεγγίζει πειραματικές τιμές διάσπασης σταγονιδίων με αρχική διάμετρο αυτή της οπής του ακροφυσίου. Η δευτερογενής διάσπαση εξαρτάται κυρίως από τη γωνιακή ταχύτητα των ρευστών.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται ένα μοντέλο των Tanner και Weisser που είναι βασισμένο στο εξελιγμένο μοντέλο του Tanner ETAB [192]. Η πρωτογενής διάσπαση, σύμφωνα με το ETAB, συμβαίνει όπως και στο αρχικό μοντέλο του KIVA, με τη διαφορά ότι ο αρχικός ρυθμός παραμόρφωσης των σταγονιδίων είναι αρνητικός και τέτοιος ώστε η διάσπαση να συμβαίνει σε προκαθορισμένο χρόνο μετά την έγχυσή τους. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση του Levich, που εξαρτάται από την αρχική διάμετρο, πυκνότητα και ταχύτητα του σταγονιδίου, καθώς και την πυκνότητα του αερίου. Η διάσπαση συμβαίνει μόνο για την περίπτωση πλάτυνσης του σταγονιδίου (θετική παραμόρφωση), και δεδομένου ότι ο αρχικός ρυθμός παραμόρφωσης είναι αρνητικός, πρώτα το σταγονίδιο επιμηκύνεται στην κατεύθυνση της κίνησής του, και μετά, λόγω των δυνάμεων αντίστασης πλατύνεται και τελικά διαχωρίζεται σε μικρότερα σταγονίδια. Με την αρχική αρνητική τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης επομένως επιτυγχάνεται καθυστέρηση της διάσπασης συγκριτικά με το αρχικό μοντέλο του KIVA και προσομοιάζεται ο υγρός όγκος στον πυρήνα του σπρέι.

Ταυτόχρονα, το μοντέλο ETAB διαφέρει ως προς το αρχικό στην επιλογή των μεγεθών και των ταχυτήτων, κάθετων στην αρχική κατεύθυνση, των παραγόμενων σταγονιδίων. Στο αρχικό μοντέλο υπενθυμίζεται ότι τα μεγέθη υπολογίζονται στοχαστικά και οι ταχύτητες προκύπτουν από το ισοζύγιο ενέργειας. Σε αυτό το μοντέλο αντίθετα, το μέγεθος των παραγόμενων σταγονιδίων υπολογίζεται σαν εκθετική συνάρτηση του χρόνου από τη στιγμή έγχυσης του κάθε σταγονιδίου, ώστε όσο μεγαλύτερος ο χρόνος τόσο μικρότερη η ακτίνα των παραγόμενων σταγονιδίων. Επίσης υπάρχει εξάρτηση από τον αριθμό Weber, έτσι ώστε όταν αυτός ξεπεράσει το 80, πράγμα που συμβαίνει μόνο στις αρχικές σταγόνες μεγάλης ταχύτητας, τα σταγονίδια που προκύπτουν είναι ακόμα πιο μικρά. Επειδή η διάσπαση εξαρτάται από το χρόνο και όχι από τις επιφανειακές ταλαντώσεις, ένα σταγονίδιο περνάει από πολλές διασπάσεις προτού καταλήξει στο τελικό σταθερό του μέγεθος. Σχετικά

με την κάθετη στην αρχική κίνηση συνιστώσα της ταχύτητας των παραγόμενων σταγονιδίων, ενώ το αρχικό μοντέλο την υπολογίζει ανάλογα με την ακτίνα και το ρυθμό παραμόρφωσης του αρχικού σταγονιδίου, το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη και τις επιφανειακές τάσεις των παραγόμενων σταγονιδίων καθώς και τις κινητικές τους ενέργειες. Έτσι οι κάθετες ταχύτητες έχουν εξάρτηση και από την αρχική ταχύτητα, με αποτέλεσμα σε μεγάλους αριθμούς Weber, αυτές να είναι ανάλογες. Με τον τρόπο αυτό δεν είναι απαραίτητος ο ορισμός γωνίας του κώνου του σπρέι, καθώς η γωνία αυτή αναπτύσσεται μέσω των γωνιακών ταχυτήτων. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα έγχυσης τόσο μεγαλύτερες οι κάθετες ταχύτητες και τόσο μεγαλύτερη η γωνία του κώνου.

Το βασικό μειονέκτημα του ETAB είναι το γεγονός ότι λόγω της καθυστερημένης πρωτογενούς διάσπασης, δε λαμβάνονται υπόψη οι θραύσεις σταγονιδίων που συμβαίνουν σε μεγάλους αριθμούς Weber σε μεγάλες ταχύτητες και κοντά στο ακροφύσιο. Για το λόγο αυτό οι Tanner & Weisser [190] ανέπτυξαν ένα στοχαστικό μοντέλο μεγέθους σταγονιδίων κατά την έγχυσή τους. Σύμφωνα με αυτό, τα σταγονίδια δεν έχουν όλα το μέγεθος της οπής του ακροφυσίου, αλλά υπάρχουν και μικρότερα, που προσομοιάζουν αυτά που προκύπτουν από την απόσχιση σταγονιδίων από την επιφάνεια των ταχύτατα κινούμενων μεγαλύτερων σταγονιδίων. Ο αρχικός ρυθμός παραμόρφωσης ορίζεται ώστε η πρωτογενής διάσπαση να συμβαίνει αρκετά μακριά από το ακροφύσιο, όπως και στην ETAB, ώστε να προσομοιάζεται ο υγρός πυρήνας του σπρέι. Σε αυτή την περίπτωση, μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν οι αρχικοί αριθμοί Weber είναι μεγαλύτεροι του 100. Η γωνία του σπρέι είτε εισάγεται ως αρχική τιμή είτε υπολογίζεται ως πολλαπλάσιο της κάθετης ταχύτητας των παραγόμενων σταγονιδίων της πρωτογενούς διάσπασης και του λόγου ταχύτητας στη στιγμή της θραύσης προς την αρχική. Η κάθετη ταχύτητα είναι ανάλογη του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης και εξαρτάται από τον αριθμό Weber και την ακτίνα SMR. Το εξελιγμένο ETAB μοντέλο, εν ολίγοις, δίνει καλύτερη περιγραφή της κατανομής σταγονιδίων κοντά στο ακροφύσιο. Συγκριτικά με πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται ότι υπερεκτιμάει λίγο το μήκος διεύθυνσης του σπρέι και υποεκτιμάει το χρόνο έναρξης ατμοποίησης. Επειδή ωστόσο το μοντέλο ατμοποίησης σταγονιδίων υπερεκτιμάει το χρόνο αυτό, η απόκλιση αυτή δε θεωρείται μειονέκτημα.

Το μοντέλο της τύρβης k-ε μπορεί να βελτιστοποιηθεί υιοθετώντας ένα αντίστοιχο μοντέλο RNG k-ε, το οποίο διαφέρει ως προς το αρχικό στην εξίσωση ε κατά έναν πρόσθετο όρο που εκφράζει το μέσο ρυθμό παραμόρφωσης της τύρβης. Το μοντέλο αυτό φαίνεται να δίνει καλύτερη προσέγγιση τύρβης σε υψηλές πιέσεις, καθώς και καλύτερη προσέγγιση της τύρβης που δημιουργείται λόγω της έγχυσης του σπρέι, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και των μοντέλων καύσης και δημιουργίας ρύπων. Περαιτέρω διόρθωση του μοντέλου αυτού για μεγάλους κινητήρες προτείνουν οι Tanner et al.[193]. Σύμφωνα με αυτούς η ρυθμός καταστροφής δίνης ε διορθώνεται προκειμένου να είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον αριθμό Reynolds τυρβώδους ροής. Η διόρθωση αυτή οδηγεί αφενός μεν σε καλύτερη ανάμειξη καυσίμου αέρα και συνεπώς σε μεγαλύτερο ROHR και κατ' επέκταση σε υψηλότερες θερμοκρασίες, αφετέρου δε σε αύξηση της θερμικής συναγωγιότητας, που σε γενικές γραμμές οδηγεί σε μείωση των τοπικών θερμοκρασιών, ώστε τελικά η πρόβλεψη της θερμοκρασίας δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση. Σε μεγάλους κινητήρες, προς το τέλος της καύσης, ο διασκορπισμός της θερμότητας προκαλεί μείωση των τοπικών θερμοκρασιών περιορίζοντας την οξείδωση των soot, με αποτέλεσμα αυτά να παρουσιάζονται αυξημένα σε σχέση με το απλό RNG k-ε μοντέλο και πιο κοντά σε πειραματικά αποτελέσματα.

4.1.6. Αξιοπιστία προσομοίωσης και συνθήκες αναφοράς

Ο παραπάνω κώδικας με τα μοντέλα που αναφέρθηκαν έχει αποδείξει την αποτελεσματικότητά του και έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές παρόμοιες εργασίες, όπως είναι οι [176],[154],[153],[155],[161],[146]. Λόγω της ανικανότητας διεξαγωγής πειραμάτων, η αποτελεσματικότητα των μοντέλων στον κινητήρα που θα μελετηθεί επικυρώνεται μόνο μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της περίπτωσης αναφοράς με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα, που παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρεία. Πρόκειται για τον κινητήρα RTA58T της Wartsila Switzerland με σύστημα έγχυσης CRS, μέγιστη ισχύ πέδης ανά κύλινδρο 2125 kW, μέση ενδεικνύμενη πίεση 19 bar, ταχύτητα περιστροφής 105 rpm και μέση ταχύτητα εμβόλου 8.46 m/s. Οι υπολογισμοί προσομοιάζουν τα φαινόμενα καύσης και ρευστομηχανικής που συμβαίνουν από τη στιγμή έναρξης της συμπίεσης (-96°) μέχρι το άνοιγμα της θυρίδας εξαγωγής καυσαερίων (120°).

Παρακάτω φαίνονται οι τιμές των βασικών μεταβλητών που ορίζονται από το χρήστη και αφορούν τον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος και τη γεωμετρία του κινητήρα, και συνεπώς μένουν σταθερές για όλα τα υπολογιστικά πειράματα διαφορετικού προφίλ έγχυσης:

| Όνομασία μεταβλητής | Φυσική σημασία | Τιμή | |
|------------------------------|--|--------------------------|-----------------------|
| atdc | Γωνία στροφάλου όταν $t=0^\circ$ | -96 | Χρονικός διαχωρισμός |
| cafilm | Ανά πόσες γωνίες στροφάλου απαιτείται εξαγωγή αποτελεσμάτων | | |
| cafin | Γωνία στην οποία τερματίζονται οι υπολογισμοί | 120 | |
| dti | Αρχικό χρονικό βήμα | 10^{-6} | |
| dtmax | Μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό βήμα καθ' όλη την επαναληπτική διαδικασία | $2*10^{-5}$ | |
| fchsp | Συντελεστής χρονικού βήματος. Αν οποιαδήποτε από τις χρονικές κλίμακες χημείας ή ατμοποίησης ξεπεράσει αυτή την τιμή το χρονικό βήμα μειώνεται με τη θεώρηση ότι η χρονική κλίμακα είναι η fchsp. | 0.25 | |
| dummy3 | Συντελεστής χρονικού βήματος έναυσης. | 0.65 | |
| angmom | Διατήρηση στροφορμής για angmom=1 | 0 | |
| bore | Διάμετρος κυλίνδρου (cm) | 58 | |
| stroke | Απόσταση μεταξύ ΚΝΣ και ΑΝΣ (cm) | 241.6 | |
| squish | Απόσταση μεταξύ κεφαλής κυλίνδρου και κορυφής πιστονιού όταν το πιστόνι βρίσκεται στο ΑΝΣ (cm) | 2.4 | |
| rpm | Ταχύτητα στροφαλοφόρου άξονα | 105 | |
| revprep | Αριθμός στροφών προτού επαναληφθεί ο ίδιος κύκλος αποτελεσμάτων. Πρακτικά για 1 συμβολίζονται οι δίχρονοι κινητήρες και με 2 οι τετράχρονοι | 1 | |
| conrod | Μήκος διωστήρα | 226.22 | |
| irez | Προσέγγιση χωρικού διαχωρισμού: 0 για Eulerian, 1 για Lagrangian, 2 για ALE, 3 για ALE και παράβλεψη κατακόρυφης τύρβης (squash), ≥ 4 για επικλινείς βαλβίδες έγχυσης | 2 | Χωρικός διαχωρισμός |
| thsect | Αριθμός διαστάσεων χωρικού διαχωρισμού: 360 για 3D διαχωρισμό, 0.5 για 2D διαχωρισμό | 360 | |
| sector | Περιοδικότητα χωρικού διαχωρισμού: 1 για περιοδικότητα διαχωρισμού (όμοια κελιά), 0 για μη περιοδικότητα | 1 | |
| deact | Απενεργοποίηση κελιών εκτός του ενεργού όγκου θαλάμου καύσης: 1 για απενεργοποίηση κελιών όσο δε βρίσκονται εντός του όγκου και ενεργοποίηση όσο αυτά βρίσκονται εντός, 0 για υπολογισμό κελιών ακόμα κι όταν αυτά βρίσκονται εκτός ενεργού όγκου. | 1 | |
| epsy, epsv, epst, epsk, epse | Επιτρεπόμενο σχετικό σφάλμα υπολογισμού μεταφοράς μάζας, μεταφοράς ορμής, μεταφοράς θερμότητας, μεταφοράς κινητικής ενέργειας δίνης k, μεταφοράς ταχύτητας καταστροφής δίνης ε. | 10^{-3} | Όρια σφαλμάτων |
| epsp | Επιτρεπόμενο σχετικό σφάλμα υπολογισμού προσέγγισης πίεσης. | 10^{-4} | |
| epschm | Επιτρεπόμενο σχετικό σφάλμα υπολογισμού στην προσέγγιση της εξίσωσης χημικής κινητικής | 0.02 | |
| tcylwl | Θερμοκρασία τοιχωμάτων κυλίνδρου σε Kelvin. | 500 | Χωρικές οριακές τιμές |
| tpistn | Θερμοκρασία πιστονιού σε Kelvin. | 650 | |
| thead | Θερμοκρασία κεφαλής κυλίνδρου σε Kelvin. | 500 | |
| tvalve | Θερμοκρασία βαλβίδων έγχυσης. | 500 | |
| adia | Οριακή χωρική τιμή θερμοκρασίας: 0 για σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων, 1 για αδιαβατικά τοιχώματα (μηδενική ανταλλαγή θερμότητας) | 0 | |
| lwall | Οριακή συνθήκη τοιχωμάτων: +1 για λογαριθμική συνθήκη τοιχώματος, 0 για ελεύθερη ολίσθηση, -1 για μηδενική ολίσθηση | 1 | |
| pardon | Προσομοίωση ροής: 1 για μέθοδο μερικής δωρεάς (partial donor cell), 0 για αντίθετη ροή δεύτερης τάξης. Η πρώτη μέθοδος προτιμάται για γρήγορους υπολογισμούς ή σε στρωτές ροές, ενώ η δεύτερη όπου χρειάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια. | 0 | Μοντέλο τύρβης |
| ecnsrv | Διατήρηση ολικής ενέργειας κατά τον επαναπροσδιορισμό κελιών: 1 για διατήρηση σε περίπτωση ροών μεγάλης ταχύτητας, 0 διαφορετικά. | 0 | |
| turbsw, tkesw | Μοντέλο τύρβης: 0 για κανένα χρησιμοποιούμενο μοντέλο τύρβης, 1 για μοντέλο k-ε, 2 για μοντέλο RNG k-ε | 2 | |
| uniscal | Αρχική κλίμακα τυρβώδους ροής: >0 για ομοιόμορφη αρχικοποίηση κλίμακας τυρβώδους ροής, $=0$ κλίμακα ανάλογη της μικρότερης απόστασης από τοίχωμα. | 0 | |
| capa | Αρχική σταθερά υπολογισμού ρυθμού αντίδρασης σε τυρβώδη ροή. | 18 | |
| airmu1, airmu2 | Σταθερές υπολογισμού μοριακού ιξώδους αέρα: $airmu1 * T^{1.5} / (T + airmu2)$ | $1.457*10^{-5}$, 110 | Βασικές σταθερές |

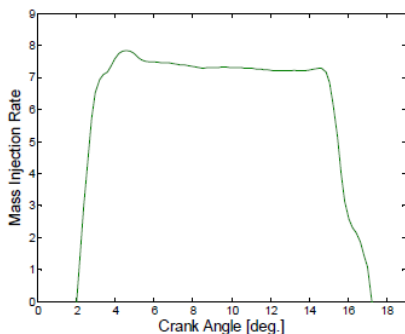
| | | | | |
|----------------|---|---|---|----------------|
| airla1, airla2 | Σταθερές υπολογισμού συντελεστή μοριακής θερμικής συναγωγής αέρα: $airla1 * T^{1.5} / (T + airla2)$ | 252, 200 | | |
| prl | Αριθμός Prandtl για στρωτή ροή μέσου (αέρα) | 0.74 | | |
| rpr | Αντίστροφος αριθμός Prandtl τυρβώδους ροής. | 1.11 | | |
| rsc | Αντίστροφος αριθμός τυρβώδους ροής Schmidt για τον υπολογισμό μάζας διάχυσης. | 1.78 | | |
| xignit | Χρονικός συντελεστής για πρόσθεση ενέργειας στα κελιά σπινθηριστή: 0 για ανάφλεξη χωρίς σπινθήρα | 0 | Αυτανάφλεξη/σπινθήρας | |
| tnparc | Αριθμός ομάδων σταγονιδίων ίδιου μεγέθους (αριθμός δειγμάτων Monte Carlo): για συνεχόμενη έγχυση είναι ο αριθμός διαφορετικών ομάδων που εγχύονται ανά μονάδα χρόνου, για διακοπτόμενη έγχυση είναι ο συνολικός αριθμός διαφορετικών ομάδων που εγχύονται. | 5000 | Μοντέλο σταγονιδίων | |
| injdist | Κατανομή μεγέθους σταγονιδίων έγχυσης: 1 για ομοιόμορφη κατανομή γύρω από ακτίνα smrg, 0 για σταθερή κατανομή ακτίνας, 2 για κατανομή νόμου δύναμης x^n ($n=0.5$)(CAB) | 2 | | |
| kolide | Μοντέλο σύγκρουσης σταγονιδίων: 1 για ενεργό μοντέλο σύγκρουσης, διαφορετικά για απενεργοποίησή του. | 1 | | |
| tpi | Αρχική θερμοκρασία σταγονιδίων έγχυσης/ προθέρμανση καυσίμου (Kelvin) | 323.15 | | |
| turb | Επιρροή ταχύτητας τύρβης στα σταγονίδια: 1 για συνυπολογισμό της επιρροής ταχύτητας τύρβης στο σχηματισμό σταγονιδίων. | 1 | | |
| breakup | Διάσπαση σταγονιδίων: 0 για απενεργοποίηση μοντέλου διάσπασης, 1 για χρήση μοντέλου TAB, 2 για χρήση μοντέλου ETAB. | 2 | | |
| evapp | Ατμοποίηση σταγονιδίων: 1 για ενεργοποίηση μοντέλου εξάτμισης. | 1 | | |
| xkone | Συντελεστής προσομοίωσης κυστοειδούς διάσπασης (bag breakup) στο μοντέλο ETAB. | 0.22222 | | |
| xktwo | Συντελεστής προσομοίωσης πλοκαμοειδούς απόσχισης σταγονιδίων (stripping breakup) στο μοντέλο ETAB. | 0.22222 | | |
| wetrans | Αριθμός Weber στον οποίο γίνεται μετάβαση σε προσομοίωση καταστροφικής διάσπασης σταγονιδίων. | 81 | | |
| dummy2 | Εκθετικός συντελεστής n στην αρχική εκθετική κατανομή μεγέθους σταγονιδίων έγχυσης x^n . | 0.5 | | |
| pulse | Προφίλ έγχυσης: 0 για συνεχόμενο προφίλ έγχυσης, 1 για προφίλ ημιτονοειδούς μορφής, 2 για παραβολικό προφίλ, 3 για προφίλ που ορίζεται από ταχύτητα έγχυσης κάθε στιγμή (προφίλ σχεδιασμένο από το χρήστη). Στην παρούσα εργασία όλα τα ακροφύσια εγχύουν το ίδιο προφίλ έγχυσης. | 3 | | Προφίλ έγχυσης |
| tspmas | Μάζα έγχυσης καυσίμου ανά κύκλο λειτουργίας (gr) | 60.1 | | |
| numvel | Αριθμός χρονικών σημείων ορισμού ταχύτητας έγχυσης. Κάθε σημείο απεικονίζει το ποσοστό επί τοις εκατό της ολικής μάζας έγχυσης που εγχύεται ανά μονάδα γωνίας στροφάλου: $Mass\ Injection\ Rate = \frac{dm}{dt} \frac{100}{m_{tot}}$. Το εμβαδό του προφίλ έγχυσης ισούται με 100 και ο κώδικας πραγματοποιεί έλεγχο προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η μάζα του προφίλ έγχυσης αντιστοιχεί στη συνολικά εισαγόμενη tspmas. | 500 | | |
| numinj | Αριθμός ακροφυσίων. | 3 | Περιγραφή ακροφυσίων | |
| drnoz | Ακτινική θέση οπής ακροφυσίου. Σημειώνεται ότι όλες οι οπές θεωρούνται ότι βρίσκονται στην ίδια θέση. | 27.2 | | |
| dznoz | Κατακόρυφη θέση ακροφυσίου μετρημένη από την κορυφή του πλέγματος (cm). | -9.7 | | |
| dthnoz | Ακτινική γωνία θέσης ακροφυσίου μετρημένη από το επίπεδο y και ανθρωπολογικά κοιτώντας από πάνω. | 60, -60, 180 | | |
| numori | Αριθμός οπών ανά ακροφύσιο. | 5 | | |
| tiltxy | Γωνία άξονα σπρέι έγχυσης στο επίπεδο xy, με θετικές τιμές αντίθετες στη φορά του ρολογιού. Κάθε μία από τις οπές του κάθε ακροφυσίου εγχύει σε διαφορετική διεύθυνση. | -127.8, 112.2, -7.8 -115.1, 124.9, 4.9 -96.6, 143.4, 23.4 -88.7, 151.3, 31.3 -76.1, 163.9, 43.9 | Περιγραφή οπών ακροφυσίων και σπρέι έγχυσης | |
| tiltxz | Γωνία άξονα σπρέι έγχυσης στο επίπεδο xz, με μοναδιαίο διάνυσμα προς τα κάτω και θετικές γωνίες προς τα θετικά του άξονα x. | 80.4, 83.5, 81.9, 83.4, 81.4 | | |
| cone | Μέση γωνία σπρέι έγχυσης για κούφια σπρέι καυσίμου. | 3 | | |
| dcone | Εξωτερική γωνία σπρέι έγχυσης. Αν dcone=cone το σπρέι είναι συνεχές και όχι κούφιο με την εισαγόμενη γωνία. Στην παρούσα εργασία επειδή χρησιμοποιείται το διευρυμένο ETAB μοντέλο διάσπασης σταγονιδίων, η γωνία αυτή | 3 | | |

| | | | |
|--------|--|---|----------------------|
| | σχηματίζεται αυτόματα, επομένως η αρχική τιμή έχει μικρή σημασία, γι' αυτό και είναι τόσο μικρή. | | |
| anoz | Επιφάνεια οπής έγχυσης. Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι κάθε οπή του ακροφυσίου έχει διαφορετική επιφάνεια έγχυσης. | 74.66*10 ⁻⁴ , 70.88*10 ⁻⁴ , 67.2*10 ⁻⁴ , 63.61*10 ⁻⁴ , 56.75*10 ⁻⁴ | |
| smr | Μέση ακτίνα Sauter σταγονιδίων (cm). Αν injdist=0, δηλαδή για στοχαστική κατανομή, η smr είναι η ακτίνα της οπής. Στην παρούσα εργασία κάθε οπή θεωρείται ότι εγχύει σταγονίδια διαφορετικής μέσης ακτίνας Sauter. | 487.5*10 ⁻⁴ , 475*10 ⁻⁴ , 462.5*10 ⁻⁴ , 450*10 ⁻⁴ , 425*10 ⁻⁴ | |
| amp0 | Αρχική τιμή πλάτους ταλάντωσης επιφάνειας σταγονιδίων κατά την έγχυση/Συντελεστής μήκους διεύθυνσης σπρέι. | 10 | |
| cont | Συντελεστής συστολής (???) | 0.7 | |
| presi | Αρχική πίεση αερίου (bar) | 3.52 | Αρχικές τιμές αερίου |
| tempi | Αρχική θερμοκρασία αερίου (K) | 330 | |
| tkei | Αρχικό ποσοστό κινητικής ενέργειας κελιών υπολογισμένη από τη μέση ταχύτητα πιστονιού, που είναι κινητική ενέργεια τύρβης. | 0.1 | |
| swirl | Αρχική ακτινική στροφοκότητα, που υπολογίζεται σαν αριθμός στροφών αέρα ανά στροφή στροφαλοφόρου άξονα. Είναι θετική για ωρολογιακή φορά και αρνητική για αντίστροφη. | 6.2 | |
| swipro | Αδιάστατη σταθερά που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του αρχικού προφίλ ταχύτητας στροφοκότητας [0,3.83] | 3.11 | |
| kwikeq | Χημικές αντιδράσεις κινητικής και ισορροπίας: 1 για χρήση 6 γρήγορων αντιδράσεων ισορροπίας, 0 για χρήση μεγαλύτερου μηχανισμού χημικής κινητικής. | 0 | Χημικά μοντέλα |
| nsp | Αριθμός συμμετεχόντων χημικών ενώσεων-στοιχείων. Από το χρήστη ορίζεται και η αρχική συγκέντρωση, το μοριακό βάρος και η ενθαλπία σχηματισμού στους 0 K της κάθε συμμετέχουσας ένωσης-στοιχείου. Στην παρούσα εργασία συμμετέχουν 15 στοιχεία: C ₁₄ H ₃₀ , O ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ O, H, H ₂ , O, N, OH, CO, NO, HO ₂ , NO ₂ , N ₂ O | 15 | |
| nrk | Αριθμός αντιδράσεων χημικής κινητικής. Για κάθε μία από αυτές τις αντιδράσεις εισάγονται από το χρήστη ο προεκθετικός παράγοντας του συντελεστή ρυθμού αντίδρασης A, η ενέργεια ενεργοποίησης E _a και ο εκθετικός συντελεστής θερμότητας β της προς τα δεξιά και της προς τα αριστερά αντίδρασης. Όπου οι συντελεστές της προς τα αριστερά αντίδρασης είναι μηδενικοί, όπως στην καύση καυσίμου, η αντίδραση θεωρείται μονόδρομη (οι ενδιάμεσες αντιδράσεις ελευθέρων ριζών συμβαίνουν ταχύτατα και αγνοούνται). Για την περιγραφή των αντιδράσεων εισάγονται από το χρήστη και οι στοιχειομετρικοί συντελεστές αντιδρόντων και προϊόντων κάθε αντίδρασης. | 11 | |
| nre | Αριθμός αντιδράσεων ισορροπίας. Για κάθε αντίδραση δίνονται από το χρήστη οι στοιχειομετρικοί συντελεστές αντιδρόντων και προϊόντων, καθώς και οι συντελεστές υπολογισμού της σταθερά ισορροπίας K _e . | 6 | |
| tcut | Θερμοκρασία κελιού κάτω από την οποία δεν είναι ενεργοποιημένο κανένα μοντέλο χημικής κινητικής. | 660 | |
| tcute | Θερμοκρασία κελιού κάτω από την οποία δεν ενεργοποιείται το μοντέλο αντιδράσεων χημικής ισορροπίας. | 1200 | |

Εικόνα 65: Πίνακας προσδιορισμού σταθερών

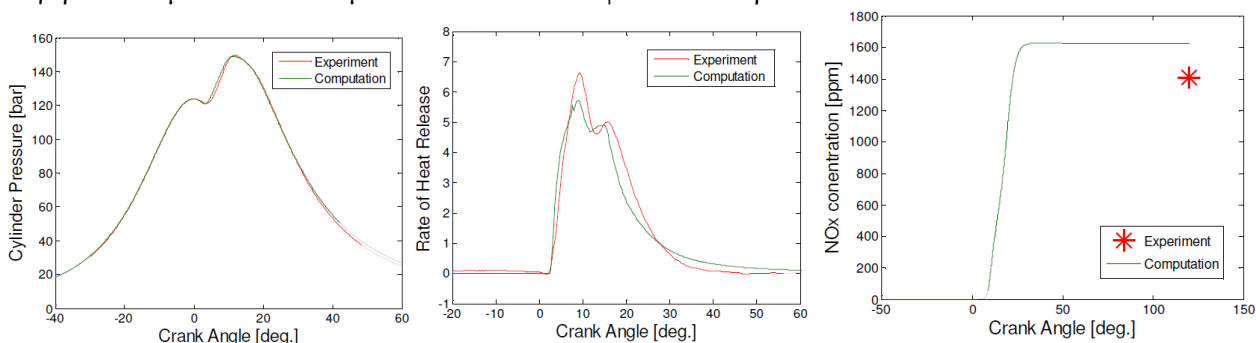
Για τη μελέτη της επίδρασης του προφίλ έγχυσης στην καύση σαφώς οι παραπάνω μεταβλητές δεν αλλάζουν, μιας και είναι αυτές που καθορίζουν τις συνθήκες του προβλήματος και της προσέγγισης. Οι μεταβλητές που αλλάζουν είναι μόνο το προφίλ έγχυσης, το οποίο ορίζεται από το χρήστη ως μια καμπύλη που περιγράφεται από numvel αριθμό σημείων velinj, καθένα από τα οποία παριστά το επί τοις εκατό της ολικής μάζας έγχυσης καυσίμου ποσοστό ανά γωνία στροφάλου. Η καμπύλη είναι αδιάστατη και το εμβαδό της ισούται με 100. Για την κατασκευή αυτού του προφίλ χρησιμοποιείται ανεξάρτητη υπορουτίνα που δέχεται ως μεταβλητές εισαγωγής τον αριθμό των παλμών, την έναρξη της έγχυσης SOI, το ποσοστό της πρώτης έγχυσης SOPI, την απόσταση του τέλους της προηγούμενης από την αρχή της επόμενης έγχυσης και τα αντίστοιχα μεγέθη όλων των παλμών. Η κατασκευή όλων των παλμών γίνεται με βάση το μοντέλο προσέγγισης του συνεχόμενου παλμού αναφοράς. Ο παλμός αναφοράς είναι γνωστός και διατίθεται από την εταιρεία και φαίνεται παρακάτω. Παρατηρείται ότι η καμπύλη δεν είναι σταθερή και παρουσιάζει κάποιες αυξομειώσεις που οφείλονται στις ταλαντώσεις της βελόνας του εγχυτήρα, ενώ η έναρξη και το τέλος της παροχής δεν είναι αυστηρά στιγμιαίες, δημιουργώντας μικρές αποκλίσεις της καμπύλης από την καθετότητα στην αρχή και το τέλος της. Ο υπολογιστικός παλμός προσέγγισης ταυτίζεται με τον πραγματικό μόνο στην

αρχή και το τέλος του, ενώ κατά τη διάρκεια γίνεται παραδοχή πλήρους σταθεροποίησης της βελόνας του εγχυτήρα, πράγμα που δεν ισχύει επακριβώς. Η παραδοχή αυτή γίνεται προκειμένου να είναι εφικτή η εύκολη ρύθμιση της μάζας του κάθε παλμού χωρίς να απαιτείται η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βελόνας σε εγχύσεις διαφορετικών μαζών, η οποία δεν είναι γνωστή αλλά ούτε και σημαντική. Αύξηση της μάζας έγχυσης επιτυγχάνεται με επιμήκυνση του σταθερού μέρους του προφίλ και μείωση της μάζας με αντίστοιχη συρρίκνωσή του. Σαφώς η τιμή του σταθερού μέρους ταυτίζεται με τη μέση τιμή των επιμέρους παροχών της περιοχής γωνιών στροφάλου που αντικαθιστά, προκειμένου η συνολική μάζα έγχυσης αναφοράς να είναι αμετάβλητη. Η απόκλιση της μέσης τιμής από την πραγματική δεν είναι μεγάλη:



Εικόνα 66: Πειραματικό προφίλ έγχυσης περίπτωσης αναφοράς.

Οι πειραματικές καμπύλες πίεσης, θερμοκρασίας και αδιάστατου ρυθμού έκλυσης θερμότητας, καθώς και η τελική τιμή των εξαγόμενων NO_x , που είναι και οι μόνες πειραματικές καμπύλες που παρέχονται, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του κώδικα και φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 67: Καμπύλες μεταβολής πίεσης, ρυθμού έκλυσης θερμότητας και μέσης συγκέντρωσης NO_x , συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση αναφοράς.

Η καμπύλη της πίεσης έχει μικρή απόκλιση από την πραγματικότητα, ενώ ο ROHR και τα NO_x έχουν μια μεγαλύτερη απόκλιση, η οποία όμως δε θεωρείται σημαντική, ιδιαίτερα εφόσον τα NO_x υπερεκτιμούνται.

Συγκεκριμένα, ο κώδικας για την περίπτωση αναφοράς δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα, που παρατίθενται σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πραγματικά:

| Αποτελέσματα | NO_x [ppm] | SFOC [g/kWh] | P_{\max} [bar] |
|--------------|---------------------|--------------|------------------|
| υπολογιστικά | 1622,85 | 165,28 | 149,12 |
| πειραματικά | 1400 | - | 150 |

Εικόνα 68: Υπολογισθείσες και πειραματικές τιμές αντιπροσωπευτικών μεγεθών.

Φαίνεται ότι η αξιοπιστία του μοντέλου είναι μεγάλη, όχι όμως και απόλυτη. Το υπολογιστικό μοντέλο είναι ήδη εξαιρετικά περίπλοκο και χρονοβόρο στην απόδοση αποτελεσμάτων, συνεπώς οι αποκλίσεις μπορούν να γίνουν συμβιβαστικά αποδεκτές χάριν συντομότερης επίλυσης.

5. Υπολογιστική Μελέτη και Αποτελέσματα

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας, όπως έχει προαναφερθεί, είναι η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων οξειδίου του αζώτου και αιθάλης σε συνδυασμό με τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης. Η μελέτη θα γίνει σε μοντέλο κινητήρα RT-flex58T-B Sulzer [106], του οποίου και τα χαρακτηριστικά αποτελέσματα φαίνονται παραπάνω. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της έγχυσης του φαίνονται παρακάτω. Σημειώνεται ότι η θυρίδα εισαγωγής αέρα καύσης και η θυρίδα εξαγωγής αερίων κλείνουν ταυτόχρονα.

| | |
|---|-----------------------|
| Διάμετρος εμβόλου (mm) | 580 |
| Διαδρομή εμβόλου (cm) | 241,6 |
| Σύστημα έγχυσης | Common rail WECS-9520 |
| Κλείσιμο θυρίδας εξαγωγής αερίων (deg CA) | -96 |
| Άνοιγμα θυρίδας εξαγωγής αερίων (deg CA) | 120 |
| Ταχύτητα στροφάλου (rpm) | 105 |
| Πίεση αέρα υπερπλήρωσης (bar) | 3,52 |
| Θερμοκρασία αέρα υπερπλήρωσης (K) | 330 |
| Έναρξη κύριας έγχυσης (deg CA) | +2 |
| Διάρκεια έγχυσης (deg CA) | 15,2 |

Εικόνα 69: Κύρια χαρακτηριστικά κινητήρα

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του κινητήρα αλλά και με το πώς αυτός μοντελοποιείται μπορούν να αναζητηθούν στο σχετικό Project Guide της μηχανής και στον πίνακα σταθερών του μοντέλου (βλ. παραπάνω κεφάλαιο 4) αντίστοιχα.

Η παρούσα μελέτη αποτελεί συνέχεια των σχετικών μελετών του τμήματος του ΕΜΠ, που έχουν γίνει για τον ίδιο κινητήρα, σε ίδιο καύσιμο (δεκατετράνιο) και με τον ίδιο κώδικα μοντελοποίησης. Οι πιο πρόσφατες σχετικές μελέτες, όπως αναφέρθηκαν και πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, είναι αυτές του κ. Ανδρεάδη [154], του κ. Στρατσιάνη [176] και του κ. Ξανθούλη [185]. Υπενθυμίζεται ότι ο πρώτος ασχολήθηκε με περιπτώσεις πιλοτικής έγχυσης με περιορισμό και μη πίεσης σε μειωμένο φορτίο, ο δεύτερος ασχολήθηκε με περιπτώσεις μετέγχυσης με περιορισμό πίεσης και μη σε μειωμένο φορτίο, ενώ ο τρίτος ασχολήθηκε με συνδυασμό πιλοτικής έγχυσης και μετέγχυσης με περιορισμό και μη πίεσης καθώς και σε μελέτη τριπλού παλμού με ανακυκλοφορία καυσαερίων, αλλά χωρίς μείωση φορτίου. Όλοι χρησιμοποίησαν κώδικα βελτιστοποίησης σε ένα εύρος μεταβλητών που τους δίνει τις βέλτιστες λύσεις ως προς δύο κύρια αποτελέσματα: τα NOx και την ειδική κατανάλωση, και δευτερευόντως τα σωματίδια αιθάλης.

Με δεδομένες τις παραπάνω μελέτες έγιναν δύο βασικές προσπάθειες επέκτασής τους:

-Δοκιμές σε χώρο μεταβλητών προσδιορισμού 5-πλού παλμού

-Δοκιμή συνδυασμού των καλών λύσεων του κ. Ανδρεάδη και του κ. Στρατσιάνη σε τριπλό παλμό με μείωση φορτίου.

Το βασικό πρόβλημα και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις είναι ότι οι ελεύθερες μεταβλητές αυξάνονται, έτσι ώστε καθιστούν εξαιρετικά χρονοβόρα την επίλυση του προβλήματος με κώδικα βελτιστοποίησης, όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε από τους παραπάνω, καθώς οι υπολογισμοί αυξάνονται εκθετικά με τον αριθμό ελεύθερων μεταβλητών, ενώ ο χρόνος για εύρεση μιας λύσης με συμβατικό υπολογιστή είναι σχεδόν μία ώρα. Αναφέρεται ότι στην περίπτωση διπλού παλμού με μείωση έργου οι ελεύθερες μεταβλητές είναι τέσσερις (4) : [SOMI, PMI, SOPI, MR], ενώ στην περίπτωση τριπλού παλμού σε σταθερό φορτίο είναι πέντε (5): [SOMI, PiMI, SOPII, PoMF, GAP]. Στην περίπτωση 4-πλού παλμού προστίθενται άλλες 2 ελεύθερες μεταβλητές [μάζα, χρονισμός] αυξάνοντας το σύνολο σε 6 μεταβλητές χωρίς τη μείωση φορτίου. Αντίστοιχα στην περίπτωση τριπλού παλμού με μείωση φορτίου το σύνολο των ελεύθερων μεταβλητών αυξάνεται κατά μία, σε έξι (6) μεταβλητές. Έξι ελεύθερες μεταβλητές για το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι εξαιρετικά πολλές για τα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Συνεπώς η μελέτη βελτιστοποίησης μπορεί να προχωρήσει μόνο στην περίπτωση που οι ελεύθερες μεταβλητές μειωθούν τουλάχιστον κατά μία (το πολύ πέντε ελεύθερες μεταβλητές). Συνεπώς, τα τρεξίματα του κώδικα στο χώρο των λύσεων γίνονται χωρίς εργαλείο βελτιστοποίησης, με στόχο την εύρεση μια περιοχής μεταβλητών που θα είναι αρκετά καλή ώστε κάποια ελεύθερη μεταβλητή να σταθεροποιηθεί και να είναι εφικτή η μετέπειτα βελτιστοποίηση, είτε το εύρος τιμών των μεταβλητών να περιοριστεί πολύ.

5.1. Μελέτη 5-πλού παλμού έγχυσης

Αρχικά έγινε διερευνητική δοκιμή ενός εντελώς νέου προβλήματος 5-πλού παλμού με ελεύθερες μεταβλητές τη μάζα κάθε παλμού (4 μεταβλητές) και την έναρξη κάθε παλμού ή την απόστασή του από τον προηγούμενο (5 μεταβλητές), σύνολο δλδ 9 ελεύθερων μεταβλητών. Μετά από αποτυχημένες προσπάθειες με εξαιρετικά ψηλή ειδική κατανάλωση, προστέθηκε και η μεταβλητή της μείωσης του φορτίου με μείωση μάζας εγγεόμενου καυσίμου. Η μελέτη έγινε σε προσπάθεια μείωσης των NOx και της ειδικής κατανάλωσης με κατά το δυνατόν διατήρηση της μέγιστης πίεσης στα 150 bar, που είναι και το επιτρεπόμενο όριο της μηχανής. Οι εκάστοτε πιθανές λύσεις επιλέγονται είτε τυχαία είτε από παλμούς που έδωσαν καλές λύσεις σε προηγούμενες εργασίες, αλλά πάντα με επαναληπτική διαδικασία σε μια προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφοράς των επόμενων αποτελεσμάτων, βασισμένης σε γνώσεις και εικασίες σχετικά με τη συμπεριφορά της καύσης και της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε μεταβολές των ελεύθερων παραμέτρων.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι ένας τριπλός παλμός χωρίς μείωση φορτίου πετυχαίνει ελάχιστα NOx =68.8% ref= 1115 ppm με ελαφρώς αυξημένη ειδική κατανάλωση SFOC=100,88%= 166,7 kg/h (λύση No.10 του κ. Ξανθούλη). Στόχος των δοκιμών ήταν η εύρεση περιοχής μεταβλητών που θα δίνει αποτελέσματα καλύτερα από αυτά του τριπλού παλμού, ώστε η μελέτη να θεωρηθεί επιτυχής.

Οι επαναληπτικές προσπάθειες που έγιναν ήταν πάρα πολλές. Παρακάτω παρατίθενται αυτές με σχετικά καλά αποτελέσματα, κοντά σε αυτά της βέλτιστης του τριπλού παλμού του κ. Ξανθούλη. Τα NOx παρατίθενται σε ppm, η SFOC σε g/kWh, η πίεση σε bar, οι χρόνοι έγχυσης σε μοίρες στροφάλου, και οι μάζες, καθώς και η συνολική μείωση μάζας, σαν επί τοις εκατό ποσοστό % της ολικής.

| Αποτελέσματα | | Ελεύθερες μεταβλητές Pilot-Main-Post-Post-Post | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|--|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|----|
| No | NOx | SFOC | Pmax | SOPiI | MPiI | Gap1 | Gap2 | MPI1 | Gap3 | MPI2 | Gap4 | MPI3 | MR |
| 1 | 1149 | 167.99 | 152.2 | -8 | 3 | 8.2 | 3.8 | 21 | 3.5 | 6 | 4 | 3 | 0 |
| 2 | 1193 | 167.5 | 156 | -14.4 | 4.19 | 14 | 3.8 | 21 | 3.5 | 6 | 4 | 3 | 0 |
| 3 | 1117 | 172 | 156 | -14.4 | 4.19 | 14 | 9 | 19 | 3.5 | 6 | 4 | 3 | 0 |
| 4 | 1135 | 171.7 | 155.6 | -10.1 | 2.25 | 10 | 9 | 19 | 3.5 | 6 | 4 | 3 | 0 |
| 5 | 1174 | 168.2 | 155.7 | -14.4 | 4.19 | 14 | 3 | 25 | 8 | 6 | 4 | 3 | 0 |
| 6 | 1018 | 176.8 | 147.3 | -14.4 | 4.19 | 14 | 2.1 | 35 | 10 | 20 | 1.5 | 5 | 0 |
| 7 | 989 | 175.2 | 147.8 | -14.4 | 4.19 | 14 | 2 | 30 | 6 | 24 | 2 | 5 | 0 |
| 8 | 1102 | 172.9 | 152.6 | -8 | 3 | 7 | 3 | 35 | 5 | 19 | 3 | 6 | 0 |
| 9 | 695 | 167.9 | 146.5 | -10 | 3.64 | 10 | 2 | 25 | 7 | 26.3 | 2 | 3 | 15 |
| 10 | 1197 | 165.2 | 163.7 | -11 | 11 | 9 | 1.5 | 25 | 4 | 10 | 3.5 | 4 | 5 |
| 11 | 1136 | 170.3 | 155.3 | -31 | 8 | 13.6 | 1 | 12 | 1 | 5 | 1 | 20 | 0 |
| 12 | 1113 | 166.9 | 162.7 | -12.2 | 15 | 11 | 1 | 7 | 0.5 | 5 | 2.5 | 23 | 0 |
| Αποτελέσματα | | Ελεύθερες μεταβλητές Pilot-Pilot-Main-Post-Post | | | | | | | | | | | |
| | NOx | SFOC | Pmax | SP1 | MP1 | Gap1 | MP2 | Gap2 | Gap3 | MP3 | Gap4 | MP4 | MR |
| 13 | 1106 | 170.5 | 149 | -12 | 3 | 2 | 10 | 9 | 7 | 20 | 3 | 6 | 0 |
| 14 | 1133 | 168.1 | 167.8 | -12 | 3 | 2 | 20 | 7 | 2 | 20 | 7 | 20 | 0 |
| 15 | 1121 | 168.5 | 151.3 | -12 | 4 | 0.5 | 10 | 10.5 | 4.5 | 21 | 0.1 | 9 | 0 |
| 16 | 999 | 170 | 148.7 | -12.4 | 11.6 | SOI=2 | 12.3 | 0.5 | 0.5 | 12.3 | 3.63 | 21.4 | 0 |
| 17 | 1077 | 170 | 156.5 | -34.9 | 5.9 | SOI=0 | 23 | 05 | 0.5 | 23 | 5.7 | 25.1 | 0 |
| 18 | 1044 | 170.8 | 151 | -5 | 13 | 3 | 10 | 0.5 | 0.5 | 10 | 6 | 28 | 0 |
| Αποτελέσματα | | Ελεύθερες μεταβλητές Pilot-Pilot-Pilot-Main-Post | | | | | | | | | | | |
| | NOx | SFOC | Pmax | SP1 | MP1 | Gap1 | MP2 | Gap2 | MP3 | Gap3 | Gap4 | MP4 | MR |
| 19 | 890 | 178 | 131 | -10.2 | 3.64 | 10 | 7 | 1 | 18 | 0.2 | 7 | 26.28 | 0 |
| 20 | 1037 | 174.3 | 136.9 | -10.2 | 4 | 8 | 7 | 1 | 18 | 0.2 | 9 | 26.28 | 0 |
| 21 | 848 | 169.5 | 154.6 | -10.2 | 15 | 7 | 7 | 0.5 | 18 | 0.2 | 9 | 27 | 0 |
| 22 | 1030 | 166.8 | 165.2 | -10.2 | 15 | 0.5 | 7 | 5.5 | 20 | 0.2 | 9 | 27 | 0 |
| 23 | 1084 | 171.3 | 145.1 | -10 | 5.5 | 7 | 8 | 0.5 | 20 | 0.2 | 6 | 28 | 0 |
| 24 | 969 | 169.2 | 149 | -10.2 | 12 | 7 | 7 | 0.5 | 18 | 0.2 | 8 | 27 | 0 |
| 25 | 990 | 168.4 | 149.2 | -10.2 | 12 | 7 | 7 | 0.5 | 18 | 0.2 | 7 | 27 | 0 |
| 26 | 988 | 168.1 | 150.8 | -10.2 | 13 | 7 | 7 | 0.5 | 17 | 0.2 | 6.5 | 27 | 0 |
| 27 | 1045 | 168.3 | 149 | -10.2 | 12 | 7 | 8 | 0.5 | 17 | 0.2 | 6 | 27 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|-------|-------|-------|----|-----|---|-----|----|-----|-----|----|---|
| 28 | 1067 | 167.9 | 149.2 | -10.2 | 12 | 7 | 7 | 0.5 | 18 | 0.2 | 5.5 | 27 | 0 |
| 29 | 1107 | 166.2 | 156.2 | -11 | 14 | 7 | 7 | 0.5 | 18 | 0.2 | 4.3 | 27 | 0 |
| 30 | 1144 | 166.8 | 152.1 | -10.6 | 12 | 6.8 | 7 | 0.5 | 18 | 0.3 | 6 | 27 | 0 |
| 31 | 1089 | 166.7 | 151.7 | -10.6 | 12 | 6.7 | 7 | 0.6 | 18 | 0.1 | 5.7 | 27 | 0 |

Εικόνα 70: Συνοπτικά αποτελέσματα 5-πλού παλμού έγχυσης

Έγιναν πολλοί συνδυασμοί πιλοτικών εγχύσεων και μετεγχύσεων κυρίως με μια πιλοτική και τρεις μετεγχύσεις, δύο πιλοτικές και δύο μετεγχύσεις, και τριών πιλοτικών με μία μετέγχυση, όπως φαίνεται και από τον πίνακα αποτελεσμάτων. Οι πιλοτικές εγχύσεις και οι μετεγχύσεις, καθώς και οι αποστάσεις τους βασίζονται σε καλές λύσεις προγενέστερων εργασιών, όπως είναι οι παρακάτω:

-Κυρίως λύση 9 του κ. Ξανθούλη:

| A/A | Κριτήρια | | Παράμετροι Προφίλ Έγχυσης | | | | | Περιορισμός | | |
|-----|--------------|-------------|---------------------------|----------|-------------|----------|-----------|------------------|--------------|--------------|
| | SFOC (%ref.) | NOx (%ref.) | SoMI (CA°) | PiMF (%) | SoPiL (CA°) | PoMF (%) | GAP (CA°) | Max Press. (bar) | Work (%ref.) | Soot (%ref.) |
| 1 | 99.52 | 84.91 | 2.24 | 2.70 | -11.03 | 19.20 | 2.41 | 149.62 | 100.48 | 72.90 |
| 2 | 99.58 | 82.13 | 2.23 | 2.88 | -11.68 | 22.68 | 2.58 | 149.88 | 100.42 | 73.09 |
| 3 | 99.71 | 80.29 | 2.29 | 3.00 | -10.51 | 24.35 | 3.04 | 149.47 | 100.29 | 72.40 |
| 4 | 99.78 | 78.04 | 2.35 | 3.64 | -10.22 | 23.62 | 3.69 | 149.68 | 100.22 | 70.33 |
| 5 | 100.01 | 76.27 | 2.45 | 4.28 | -10.56 | 23.59 | 4.33 | 149.59 | 99.99 | 70.43 |
| 6 | 100.15 | 73.79 | 2.28 | 2.73 | -10.65 | 27.24 | 4.29 | 149.25 | 99.85 | 69.84 |
| 7 | 100.33 | 71.97 | 2.37 | 3.64 | -10.21 | 26.28 | 4.91 | 149.48 | 99.67 | 69.97 |
| 8 | 100.45 | 70.76 | 2.17 | 2.25 | -10.07 | 27.58 | 5.12 | 149.61 | 99.56 | 68.93 |
| 9 | 100.71 | 69.91 | 2.57 | 4.19 | -14.41 | 27.47 | 5.44 | 149.08 | 99.30 | 71.72 |
| 10 | 100.88 | 68.86 | 2.54 | 4.03 | -13.87 | 27.72 | 5.74 | 149.04 | 99.13 | 71.17 |

Εικόνα 71: Συνοπτικές βέλτιστες λύσεις πιλοτικής-κύριας-μετέγχυσης έγχυσης

-Κυρίως λύση Case A του κ.Στρατσίανη:

| Optimization parameter | Reference case | Unconstrained | | Constrained | |
|-----------------------------------|----------------|---------------|--------|-------------|--------|
| | | Case A | Case B | Case 1 | Case 2 |
| Design variable | | | | | |
| SOMI (°CA ATDC) | 2.0 | 1.1 | 0.2 | 1.9 | 2.0 |
| PoMF (% of total injected mass) | 0.0 | 38.2 | 1.3 | 24.4 | 17.7 |
| Dwell (°CA) | 0.0 | 7.7 | 7.3 | 3.8 | 2.7 |
| MR (%) | 0.0 | 9.8 | 8.8 | 0.6 | 0.7 |
| Objective function | | | | | |
| SFOC (% of reference case) | 100.0 | 99.9 | 95.8 | 99.9 | 99.6 |
| NOx (% of reference case) | 100.0 | 57.6 | 99.2 | 77.4 | 84.6 |
| Soot (% of reference case) | 100.0 | 57.0 | 71.6 | 67.7 | 71.0 |
| Constrained variable | | | | | |
| Maximum pressure (MPa) | 15.0 | 15.4 | 16.3 | 15.0 | 14.9 |
| Work output (% of reference case) | 100.0 | 90.31 | 95.11 | 99.6 | 99.8 |

Εικόνα 72: Συνοπτικές βέλτιστες λύσεις κύριας- έγχυσης μετέγχυσης

- και δοκιμές για πιλοτικές εγχύσεις στις -12 ή -30 περίπου μοίρες, που είναι και οι καλύτερες για απεριόριστη και περιορισμένη πίεση αντίστοιχα του κ. Ανδρεάδη:

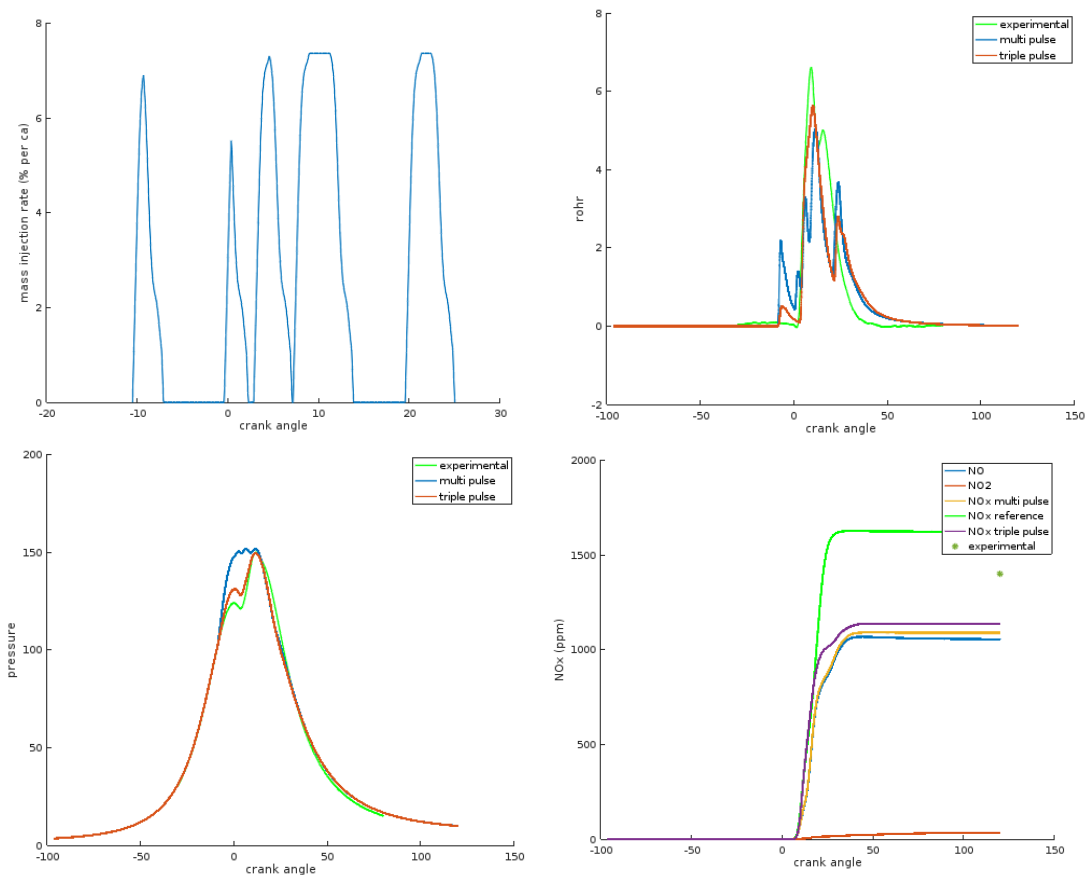
| | Ref. | A | B | C | D | | Ref. | E | F | G | H |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Design Variables | | | | | | Design Variables | | | | | |
| SOPi [° CA aTDC] | -- | -32.6 | -10.9 | -31 | -30.6 | SOPi [° CA aTDC] | -- | -12.2 | -12.6 | -35.0 | -12.4 |
| SOMi [° CA aTDC] | 2.0 | 4.5 | 3.4 | 3.7 | 3.6 | SOMi [° CA aTDC] | 2.0 | 4.8 | 3.1 | 4.3 | 4.1 |
| PMF [% of total injected mass] | -- | 13.7 | 15.4 | 10.3 | 15.3 | PMF [% of total injected mass] | -- | 10.5 | 7.8 | 11.6 | 11.6 |
| MR [%] | 0.0 | 3.9 | 3.7 | 3.7 | 3.5 | MR [%] | 0.0 | 3.4 | 3.8 | 3.6 | 3.7 |
| Objectives | | | | | | Objectives | | | | | |
| NOx [%] | 100 | 75.8 | 91.9 | 82.4 | 84.8 | NOx [%] | 100 | 77.8 | 91.1 | 80.4 | 83.7 |
| SFOC [%] | 100 | 98.4 | 96.0 | 97.6 | 96.4 | SFOC [%] | 100 | 100.4 | 97.5 | 98.2 | 97.6 |
| Cyl. Pressure | | | | | | Cyl. Pressure | | | | | |
| Max. Pressure [bar] | 149.2 | 152.5 | 156.5 | 149.0 | 152.0 | Max. Pressure [bar] | 149.2 | 145.4 | 148.8 | 149.2 | 147.7 |

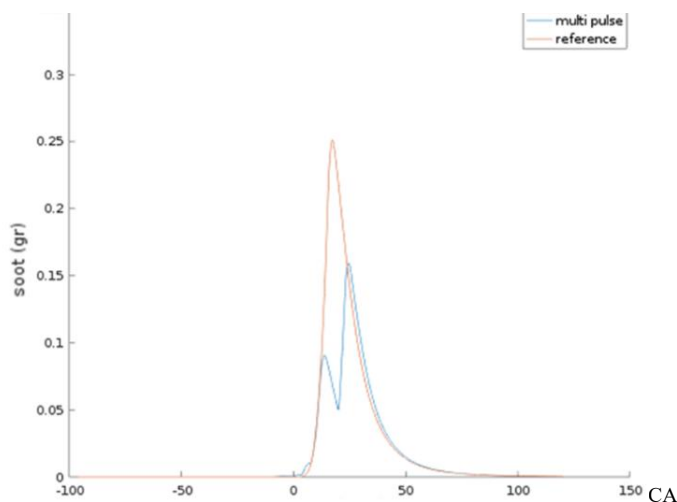
Εικόνα 73: Συνοπτικές βέλτιστες λύσεις πιλοτικής-κύριας έγχυσης

Ο πολλαπλός παλμός ωστόσο επηρεάζει αρκετά τα αποτελέσματα και φαίνεται ότι είναι δύσκολη η περαιτέρω μείωση των οξειδίων και της κατανάλωσης χωρίς την ταυτόχρονη μείωση του φορτίου. Οι λύσεις που ομοιάζουν σε ένα συνδυασμό των λύσεων E του κ. Ανδρεάδη και Case A του κ. Στρατσίανη, με τρεις πιλοτικές εγχύσεις και μία μετέγχυση φαίνεται να δίνουν αρκετά καλά αποτελέσματα.

Τα περισσότερα καλά αποτελέσματα βρέθηκαν είτε για τριπλή προέγχυση είτε για τριπλή μετέγχυση, και όχι για πιο συμμετρικούς παλμούς. Η τριπλή μετέγχυση φαίνεται να δίνει αποτελέσματα με σχετικά αυξημένα NOx και μέγιστη πίεση που εξαρτάται κυρίως από την προέγχυση, η οποία χρειάζεται καλή ρύθμιση. Η ειδική κατανάλωση είναι επίσης σχετικά αυξημένη εξαιτίας της καύσης μεγάλου μέρους καυσίμου μετά το ANΣ. Αυτό είναι κάπως αναμενόμενο, δεδομένου ότι η τεχνική της μετέγχυσης έχει κυρίως ευεργετική επίδραση στη μείωση των soot, και όχι τόσο των NOx. Καλύτερα αποτελέσματα φαίνεται να δίνει η τριπλή πιλοτική έγχυση, η οποία έχει χαμηλά αποτελέσματα πίεσης, άρα και θορύβου, αρκετά χαμηλά NOx και αποδεκτή αυξημένη ειδική κατανάλωση.

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά ο παλμός έγχυσης, ο ειδικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας, η μέγιστη πίεση και η συγκέντρωση NOx στον κύλινδρο ανά γωνία στροφάλου για την λύση No.31, καθώς και ενδεικτικά ο ρυθμός παραγωγής soot και η συγκέντρωσή τους κάθε στιγμή. Στα διαγράμματα φαίνονται και οι αντίστοιχες καμπύλες του τριπλού παλμού του κ. Ξανθούλη για τη λύση του No.1 [SoPI,PiMI,SoPiL,PoMF,GAP]=[2.24, 2.6,-11.3,19.2, 2.41] και αποτελέσματα [SFOC, NOx, soot]=[99.5%, 84.91%, 72.9%]. Σαφώς ο τριπλός παλμός δεν μπορεί να συγκριθεί με τον πενταπλό καθώς το προφίλ της έγχυσης τους δεν είναι σε τίποτα όμοιο, παρά μόνο στο ότι η πιλοτική τους έγχυση ξεκινάει περίπου στις ίδιες μοίρες. Μπορούν ωστόσο και οι δύο να συγκριθούν με την περίπτωση αναφοράς και ως προς τα τελικά τους αποτελέσματα. Βασική προϋπόθεση ώστε η λύση αυτή να είναι εφαρμόσιμη, είναι ο εγχυτήρας να μπορεί να πετύχει χρονική παύση έγχυσης 0.1° , πράγμα ίσως δύσκολο ακόμα και για το ηλεκτρονικό σύστημα έγχυσης με common rail :





Εικόνα 74: Διαγράμματα έγχυσης, ειδικής έκλυσης θερμότητας, πίεσης, NOx, soot για καλή λύση 5-πλού παλμού

Από το διάγραμμα της έκλυσης θερμότητας φαίνεται πόσο ο πολλαπλός παλμός βοηθάει στην πιο ομοιόμορφη κατανομή της καύσης κυρίως χρονικά. Η φλόγα του πιλοτικού παλμού πολλαπλής έγχυσης συμπίπτει σχεδόν με αυτόν του τριπλού παλμού, παρότι οι μάζες των δύο πιλοτικών εγχύσεων διαφέρουν. Αξιοσημείωτο είναι ότι ενώ ο πιλοτικός παλμός της λύσης No.3 είναι μεγαλύτερος και εγχύεται λίγο πιο μετά από αυτόν του τριπλού παλμού, ξεκινάει να φλέγεται λίγο νωρίτερα από τον αντίστοιχο της τριπλής και μάλιστα απότομα. Αυτό καταδεικνύει ότι πιθανότητα η έγχυση αυτή του μεγαλύτερου παλμού βοηθάει στην καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα και μειώνει ελαφρώς την καθυστέρηση έναυσής του, ενώ η καύση του συμβαίνει με φλόγα προανάμειξης. Ο δεύτερος πιλοτικός παλμός αναφλέγεται ενώ ακόμα δεν έχει τελειώσει η καύση του πρώτου ενώ ο τρίτος ξεκινάει να φλέγεται σχεδόν τη στιγμή της πιο έντονης φλόγας του δεύτερου παλμού. Ο κύριος παλμός εγχύεται στις 7.2°, δηλαδή αρκετά αργά, δεδομένου ότι ο τριπλός και ο παλμός αναφοράς εγχύονται περίπου στις 2°. Ωστόσο η καύση του κύριου παλμού συμβαίνει ελάχιστα αργότερα από αυτόν του παλμού αναφοράς, που σημαίνει ότι έχει επιτευχθεί μεγάλη μείωση καθυστέρησης έναυσης της κύριας έγχυσης. Έτσι εξηγείται και η σχετικά χαμηλή πίεση που αναπτύσσεται στο θάλαμο, καθώς η φλόγα πλέον είναι κυρίως ελεγχόμενη φλόγα διάχυσης. Επίσης παρατηρείται ότι έχει μειωθεί πολύ η καθυστέρηση έναυσης της μετέγχυσης, καθώς η μετέγχυση του πολλαπλού παλμού συμβαίνει περίπου στις 20°, σε αντίθεση με αυτή του τριπλού παλμού που συμβαίνει περίπου στις 17.5°, και παρόλα αυτά καίγεται νωρίτερα. Αυτή η μείωση της καθυστέρησης έναυσης είναι κυρίως ευεργετική για τη μείωση κατανάλωσης, καθώς μεταφέρει την παραγωγή έργου σε νωρίτερες γωνίες στροφάλου, κοντά στο ANΣ. Για τα NOx εικάζεται ότι αυτή η μείωση καθυστέρησης έναυσης βοηθάει την παραγωγή τους καθώς η καύση συμβαίνει σε πιο ψηλές θερμοκρασίες. Αυτό που κυρίως ελαττώνει την παραγωγή των NOx του πολλαπλού παλμού φαίνεται να είναι η χαμηλή ποσότητα μάζας κύριας έγχυσης, η οποία είναι και η κύρια πηγή παραγωγής τους (ταχεία καύση σε περιοχή υψηλής θερμοκρασίας). Το σημείο μεγαλύτερης καμψής της καμπύλης των NOx είναι αυτό που αντιστοιχεί στο τέλος της κύριας έγχυσης, και φαίνεται ότι αν η κύρια καύση συνεχιζόταν, τα NOx θα συνέχιζαν να αυξάνονται με γρήγορο ρυθμό. Επίσης, για την παραγωγή των NOx από τις πιλοτικές εγχύσεις φαίνεται ότι οι τρεις πιλοτικές εγχύσεις παράγουν πολύ λιγότερα NOx από αυτά που παράγει η πιλοτική του τριπλού παλμού και καθυστερούν την παραγωγή των NOx της κύριας έγχυσης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη φλόγας προανάμειξης σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και καλή ανάμειξη καυσίμου. Ναι μεν η αναλογία αέρα καυσίμου είναι μεγάλη λόγω της φλόγας προανάμειξης, η θερμοκρασία όμως είναι χαμηλή. Ο διακοπτόμενος τριπλός παλμός έχει βοηθήσει το καύσιμο να προωθηθεί σε διαφορετικά σημεία του θαλάμου συνεπώς η συνολική έκλυση θερμότητας είναι μεγάλη, αλλά συμβαίνει σε διαφορετικά σημεία του θαλάμου, ώστε η θερμοκρασία κατανέμεται στο θάλαμο και δεν αυξάνεται μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές, κάτι που θα προκαλούσε την παραγωγή των οξειδίων. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι οι πιλοτικές εγχύσεις βοηθούν στη μείωση των NOx λόγω της καλής κατανομής της καύσης στο θάλαμο. Η μετέγχυση απ' την άλλη, βοηθάει στη μείωση των NOx καθώς ποσότητα καυσίμου που θα καιγόταν σε ψηλές θερμοκρασίες καύσης και σε περιοχή καυσαερίων καίγεται σε χαμηλότερες. Η καύση αυτή ωστόσο υποθέτουμε ότι συμβαίνει σε μεγαλύτερους λόγους αέρα καυσίμου, κάτι που ενισχύει την παραγωγή τους. Συνεπώς η μετέγχυση έχει αμφίροπη επίδραση στην παραγωγή των NOx.

Για την αυξημένη ειδική κατανάλωση, μια ματιά στο διάγραμμα έκλυσης θερμότητας είναι αρκετή για να την αιτιολογήσει. Είναι σαφές ότι η καύση της πρώτης πιλοτικής έγχυσης συμβαίνει πριν το ANΣ, κάτι που αναμφίβολα αυξάνει την ειδική κατανάλωση. Η ύπαρξη των πιλοτικών εγχύσεων ευεργετούν τη μείωση

της ειδικής κατανάλωσης στο βαθμό που μειώνουν την καθυστέρηση έναυσης της κύριας έγχυσης και της μετέγχυσης και την μεταφέρουν σε προτύπες γωνίες στροφάλου, πιο κοντά στο ΑΝΣ. Μπορούμε επίσης να εικάσουμε ότι ο πολλαπλός παλμός στο σύνολό του βοηθάει την καλύτερη ανάμειξη καυσίμου αέρα και την αύξηση της τύρβης στο θάλαμο, ώστε η καύση τείνει προς τη στοιχειομετρική τέλεια καύση, κάτι που μειώνει την ειδική κατανάλωση. Αντίστοιχα, η ύπαρξη της μετέγχυσης αυξάνει την ειδική κατανάλωση, καθώς έργο παράγεται σε μεγαλύτερες γωνίες στροφάλου, πιο μακριά από το ΑΝΣ. Συμπεραίνεται ότι συνολικά η ειδική κατανάλωση εξαρτάται αρκετά από τις πιλοτικές εγχύσεις και η εξάρτησή της από αυτές είναι επίσης αμφίροπη.

Η μέγιστη πίεση του κυλίνδρου απαιτείται να είναι σχετικά χαμηλή για την αποφυγή καταπόνησης των εξαρτημάτων. Η πίεση είναι ο παράγοντας που απαιτεί τη μείωση της φλόγας προανάμειξης και χρειάζεται τη φλόγα διάχυσης προκειμένου να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε φλόγα προανάμειξης η καύση των στοιχείων συμβαίνει ταυτόχρονα, εκλύοντας απότομα θερμότητα και αυξάνοντας κατά πολύ την πίεση. Αντίθετα, σε φλόγα διάχυσης η καύση ελέγχεται από την ταχύτητα έγχυσης καυσίμου, καθώς μόνο τα στοιχεία στην άκρη του σπρέι αναφλέγονται. Αυτό σημαίνει ότι η καύση και η έκλυση θερμότητας κατανέμεται στο χρόνο, ώστε η πίεση προλαβαίνει να αποτονωθεί και δεν αυξάνεται ανεξέλεγκτα, προκαλώντας ίσως έκρηξη ή κρουστικά φαινόμενα, όπως συμβαίνει με τη φλόγα προανάμειξης. Οι πιλοτικές εγχύσεις επομένως αυξάνουν τη μέγιστη πίεση. Επειδή όμως οι μάζες τους είναι μικρές και κατανέμονται στο χρόνο, η πίεση που προκαλούν δεν ξεπερνάει κατά πολύ τα επιτρεπτά όρια. Μάλιστα η ύπαρξή τους βοηθάει στην ελάττωση της καθυστέρησης έναυσης της κύριας έγχυσης και της μετέγχυσης, μειώνοντας το ποσοστό φλόγας προανάμειξής τους, άρα και περιορίζοντας την πίεση που προκαλείται από αυτούς. Οι πιλοτικές εγχύσεις επομένως έχουν ευεργετικές επιδράσεις στην πίεση, αρκεί η πίεση που προκαλείται από τη δική τους καύση να μην είναι υπερβολική. Η μετέγχυση επίσης βοηθάει στη μείωση της πίεσης καθώς δίνει χρόνο για την αποτόνωση της κύριας καύσης και την καύση της μετέγχυσης σε χαμηλότερες πιέσεις κυλίνδρου.

Η παραγωγή των soot δεν έχει τεθεί σαν παράμετρος βελτιστοποίησης, καθώς οι ελεύθερες μεταβλητές είναι ήδη πολλές, και το πρόβλημα δυσεπίλυτο. Ωστόσο αναφέρεται ότι η λύση No.31 δίνει αποτελέσματα για soot=74.37% της έγχυσης αναφοράς, έναντι του 71.17% που πετυχαίνει η λύση No.10 του κ. Ξανθούλη και του 68.93%, που είναι η ελάχιστη τιμή που μπορεί να επιτευχθεί με τριπλό παλμό (περιορισμένης πίεσης και 100% φορτίου).

Η παραγωγή των soot στις πιλοτικές εγχύσεις είναι εμφανής και ανάλογη της μάζας του εγχόμενου καυσίμου. Η παραγωγή των soot στις πιλοτικές εγχύσεις δεν μπορεί να προβλεφθεί εύκολα καθώς επικρατούν συνθήκες υψηλού λόγου αέρα καυσίμου, που δεν ευνοούν την παραγωγή τους, αλλά χαμηλές θερμοκρασίες, που ευνοούν την δημιουργία τους. Ωστόσο, η παραγωγή των soot στις προεγχύσεις δεν είναι ζήτημα σημαντικό, αφού στις μετέπειτα υψηλές θερμοκρασίες υπάρχει μεγάλη πιθανότητα τα soot να οξειδωθούν και εν τέλει να καούν. Η μείωση των soot ευεργετείται κυρίως από τη μειωμένη μάζα της κύριας έγχυσης και την ύπαρξη της μετέγχυσης, καθώς και σταματάει να τροφοδοτείται η περιοχή του σπρέι με υψηλό λόγο καυσίμου αέρα, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας σε μεγάλες γωνίες στροφάλου, εξαιτίας της καύσης της μετέγχυσης, ευεργετεί την καύση των παραγμένων soot της κύριας έγχυσης και τελικά τη μείωσή τους.

Φαίνεται από τα παραπάνω, η δυσκολία της εξαγωγής γενικού συμπεράσματος για τη συμπεριφορά των αποτελεσμάτων ως προς τις μεταβλητές, και η δυσκολία της μείωσης των παραμέτρων του προβλήματος. Για το λόγο αυτό ο παραπάνω χώρος πιθανών λύσεων δε μελετήθηκε περαιτέρω.

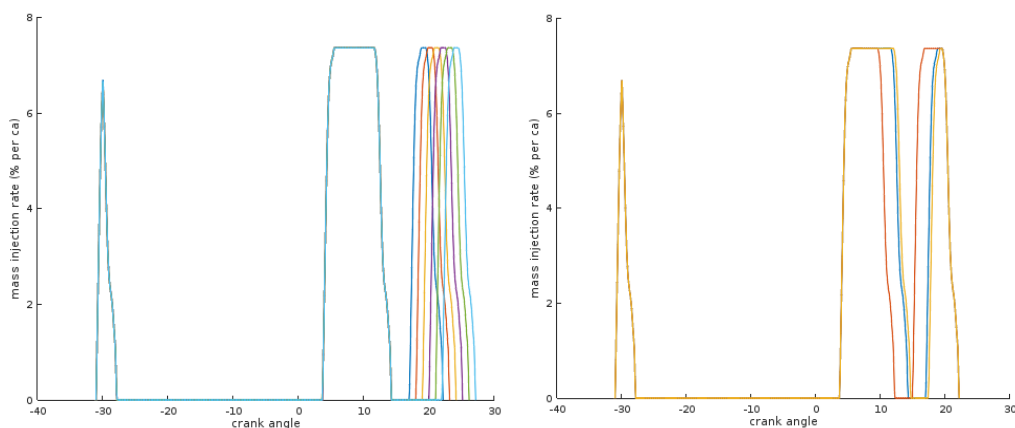
5.2. Μελέτη ευαισθησίας παραμέτρων μετέγχυσης σε 3-πλό παλμό

Στη συνέχεια έγινε μελέτη ευαισθησίας παραμέτρων τριπλού παλμού διατηρώντας σταθερές τις προεγχύσεις, που επιλέγονται μεταξύ αυτών των καλών λύσεων του κ. Ανδρεάδη και με μεταβλητές μετεγχύσεις. Οι πιθανές τιμές της απόστασης της μετέγχυσης από την κύρια και της μάζας της, έγινε μεταξύ αυτών των καλών λύσεων του κ. Στρατσιάνη. Αρχικά δε μελετήθηκε κάποια περίπτωση με μειωμένη μάζα έγχυσης. Το πρόβλημα συνεπώς είναι ίδιο με του κ. Ξανθούλη, με τη διαφορά ότι βασικός σκοπός δεν είναι να βρεθεί μια καλή λύση, αλλά να μελετηθεί η επίδραση των μεταβλητών του προβλήματος στην καύση.

5.2.1. Μελέτη ευαισθησίας ως προς GAP και PoMF

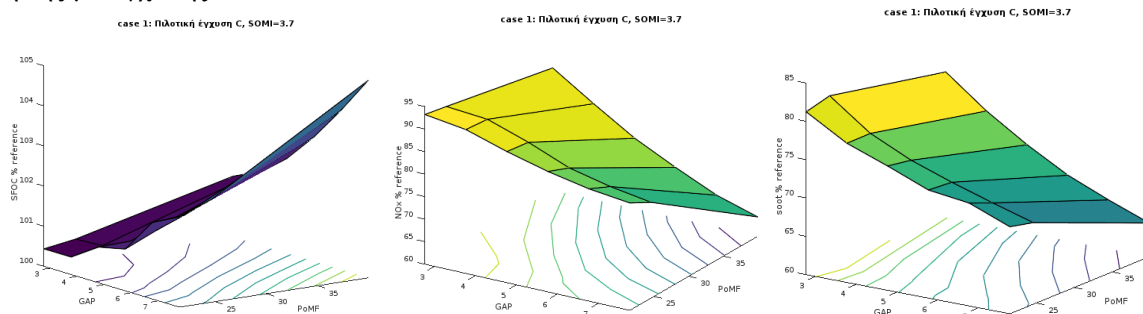
5.2.1.1. Σταθερή πιλοτική έγχυση λύση C (SOPI,PMF,SOMI)=(-31, 10.3%, 3.7)

Η πιλοτική έγχυση διατηρείται σταθερή, ίδια με αυτή του απεριόριστου προβλήματος του κ. Ανδρεάδη με μείωση μάζας καυσίμου 3.7%. Οι μάζες μετέγχυσης επιλέγονται από τις λύσεις 1,2,3 PoMF=[21.548%, 24.636%, 39.924%] και GAP=(2.7°, 7.7°) με βήμα 1°, που είναι και το εύρος καλών λύσεων του κ. Στρατσιάνη. Αναφέρεται ότι οι λύσεις του 1&2 έχουν αρκετά ψηλή μείωση φορτίου MR=(9.12%, 9.5%).



Εικόνα 75: Παράδειγμα μελέτης παλμού μετέγχυσης με σταθερή πιλοτική έγχυση case C κ. Ανδρεάδη

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων για την πιλοτική έγχυση C, ως προς τη μεταβολή της μετέγχυσης:

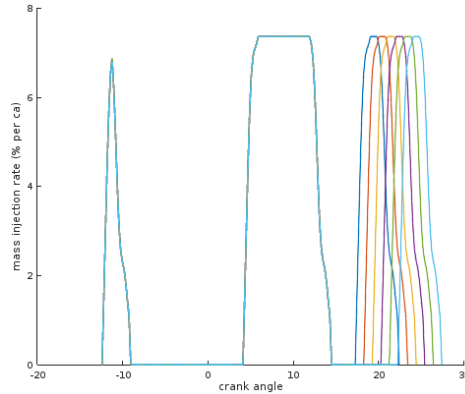


Εικόνα 76: Επιφάνειες παραμετρικής λύσης με πιλοτική έγχυση C

Η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων από τις μεταβλητές της μετέγχυσης συμπίπτουν συμφωνούν με τις μελέτες της βιβλιογραφίας. Παρατηρείται ότι η ειδική κατανάλωση μειώνεται με τη μείωση της μάζας μετέγχυσης και τη μείωση της απόστασης από την κύρια έγχυση, γιατί ποσοστό καυσίμου καίγεται πιο κοντά στο ANΣ, που είναι και το βασικό κριτήριο για καλύτερη απόδοση της καύσης και εκμετάλλευση έργου της μηχανής. Αυτός είναι και ο λόγος που η επίδραση της απόστασης της μετέγχυσης GAP έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στη ειδική κατανάλωση από τη μάζα (ειδικά σε μεγάλες μάζες μετέγχυσης), όπως φαίνεται από τις κλίσεις της επιφάνειας και τις ισοϋψείς καμπύλες. Αντίθετη ακριβώς συμπεριφορά έχουν τα NOx τα οποία μειώνονται με την απομάκρυνση και την αύξηση της μάζας μετέγχυσης, με την επίδραση της μάζας να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή της απόστασης. Όσο η μετέγχυση είναι πιο μικρή ή πιο κοντά στην κύρια, η επίδραση των μεταβλητών στην παραγωγή των NOx δεν είναι τόσο έντονη. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει γιατί μια μικρή μάζα μετέγχυσης σημαίνει και μεγαλύτερη μάζα κύριας έγχυσης η οποία προκαλεί ψηλές θερμοκρασίες και ψηλά NOx. Αντίστοιχα, πολύ κοντινή μετέγχυση σημαίνει ότι η θερμοκρασία στο θάλαμο είναι ακόμα αυξημένη λόγω της κύριας καύσης και συνεπώς η μετέγχυση, όσης μάζας κι αν είναι, καίγεται σε ψηλές θερμοκρασίες. Η συμπεριφορά των soot είναι παρόμοια με αυτή των NOx, με τη διαφορά ότι τα soot εξαρτώνται κυρίως από την αύξηση της απόστασης της μετέγχυσης και δευτερευόντως από την αύξηση της μάζας. Εικάζεται ότι αυτό συμβαίνει γιατί όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση τόσο πιο πολύ έχουν απομακρυνθεί τα καυσαέρια της κύριας έγχυσης και τόσο έχει αυξηθεί ο λόγος αέρα-καυσίμου του εύφλεκτου μίγματος. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το GAP είναι η βασική παράμετρος της μετέγχυσης που επηρεάζει τα αποτελέσματα της καύσης με αντίθετη επίδραση στην ειδική κατανάλωση και τους ρύπους.

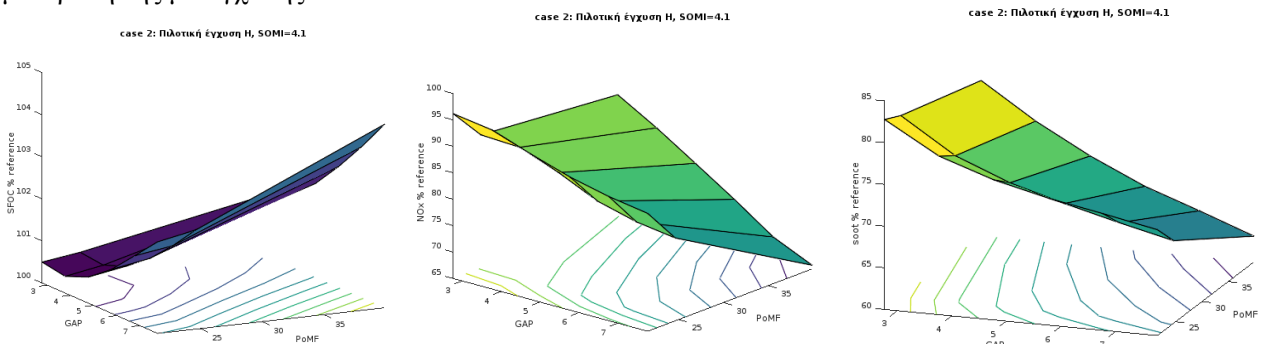
5.2.1.2. Σταθερή πιλοτική έγχυση λύση H (SOPI,PMF,SOMI)=(-12.4, 11.6%, 4.1)

Η πιλοτική έγχυση διατηρείται σταθερή, ίδια με αυτή του περιορισμένου σε πίεση προβλήματος του κ. Ανδρεάδη με μείωση μάζας καυσίμου 3.7%. Οι μάζες μετέγχυσης επιλέγονται πάλι από τις λύσεις 1,2,3 PoMF=[21.548%, 24.636%, 39.924%] και GAP=(3.7°, 7.7°) με βήμα 1°, που είναι και το εύρος καλών λύσεων του κ. Στρατσιάνη. Αυτό που κατά βάση αλλάζει από την προηγούμενη πιλοτική έγχυση είναι ότι εγχύεται πιο κοντά στο ΑΝΣ, και η κύρια έγχυση συμβαίνει περίπου 2° μετά.



Εικόνα 77: Παράδειγμα μελέτης παλμού μετέγχυσης με σταθερή πιλοτική έγχυση case H κ. Ανδρεάδη

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων για την πιλοτική έγχυση H, ως προς τη μεταβολή της μετέγχυσης:



Εικόνα 78: Επιφάνειες SFOC, NOx, soot παραμετρικής λύσης με πιλοτική έγχυση H

Η συμπεριφορά της ειδικής κατανάλωσης, αλλά και οι τιμές, είναι πολύ παρόμοια με αυτή της πιλοτικής έγχυσης C, παρότι έχουν αλλάξει παράμετροι που επηρεάζουν πολύ την τιμή της. Από το γεγονός ότι η κύρια έγχυση, σε συνδυασμό με τη μετέγχυση, έχουν μετακινηθεί ύστερα, θα περιμέναμε η ειδική κατανάλωση να αυξάνεται αρκετά, λόγω της καύσης μετά του ΑΝΣ. Φαίνεται όμως ότι η έγχυση της πιλοτικής μάζας πιο κοντά στο ΑΝΣ αντισταθμίζει την κατάσταση, ώστε τελικά η ειδική κατανάλωση να είναι περίπου η ίδια. Τα NOx έχουν επίσης πολύ παρόμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη περίπτωση, με τη διαφορά ότι στο σύνολό τους είναι ελαφρώς αυξημένα, παρότι η καύση εκτελείται πιο μακριά από το ΑΝΣ και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Πιθανότατα αυτή η μικρή αύξηση στα NOx να οφείλεται στο μειωμένο ποσοστό καύσης προανάμειξης, λόγω έγχυσης του πιλοτικού παλμού πιο κοντά στο ΑΝΣ και πιο γρήγορης έναυσης του λόγω ψηλότερων θερμοκρασιών, και της μειωμένης απόστασης της κύριας έγχυσης από την πιλοτική. Το καύσιμο και της πιλοτικής και της κύριας έγχυσης εισάγεται σε ψηλότερες θερμοκρασίες (η θερμοκρασία μετά την κοντινή πιλοτική έγχυση δεν έχει προλάβει να κατανεμηθεί) οπότε η φλόγα εμφανίζεται πριν το καύσιμο κατανεμηθεί στον κύλινδρο και αναμειχθεί με τον αέρα καύσης, ώστε αντίστοιχα κατανεμημένη να είναι και η αύξηση της θερμότητας στο χώρο. Έτσι ψηλές τοπικές θερμοκρασίες πιθανώς προκαλούν αυτή την αύξηση στα NOx σε όλες τις περιπτώσεις μετέγχυσης. Παρατηρείται επίσης, ότι για μικρές μάζες μετέγχυσης, η μάζα μετέγχυσης έχει μεγάλη επίδραση στην παραγωγή NOx. Τα soot στο σύνολό τους βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα παραγωγής με την περίπτωση C. Η κύρια διαφορά της συμπεριφοράς τους είναι σε μικρές μάζες μετέγχυσης, όπου η μεταβολή της μάζας επηρεάζει αρκετά την παραγωγή των soot. Η πιλοτική έγχυση H συνεπώς, φαίνεται ότι προκαλεί μια μικρή συνολικά αύξηση στα οξείδια του αζώτου, ενώ ταυτόχρονα επιδρά στη συμπεριφορά των ρύπων σε μικρές μάζες έγχυσης. Η εκτεταμένη αύξηση των ρύπων για μείωση της μάζας μετέγχυσης πιθανότατα οφείλεται πάλι στο γεγονός της αυξημένης διάρκειας της κύριας έγχυσης. Επειδή η πιλοτική έγχυση συνέβη πιο κοντά στην κύρια, η θερμότητα δεν έχει προλάβει να απαχθεί από τα

τοιχώματα ή α κατανεμηθεί στον κύλινδρο ομοιόμορφα, ώστε εντοπίζονται τοπικά αυξημένες θερμοκρασίες που αυξάνουν τα NOx. Αντίστοιχα για τα soot, τα καυσαέρια δεν έχουν απομακρυνθεί επαρκώς και κατανεμηθεί στο θάλαμο, ώστε τελικά τοπικά να υπάρχει μειωμένος λόγος αέρα καυσίμου που προκαλεί την παραγωγή soot. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πάλι ωστόσο, ότι η αιτία της συμπεριφοράς των αποτελεσμάτων είναι εικασίες, πιθανόν και λανθασμένες, μιας και το πρόβλημα είναι πολυπαραγοντικό.

5.2.2. Μελέτη ευαισθησίας ως προς GAP

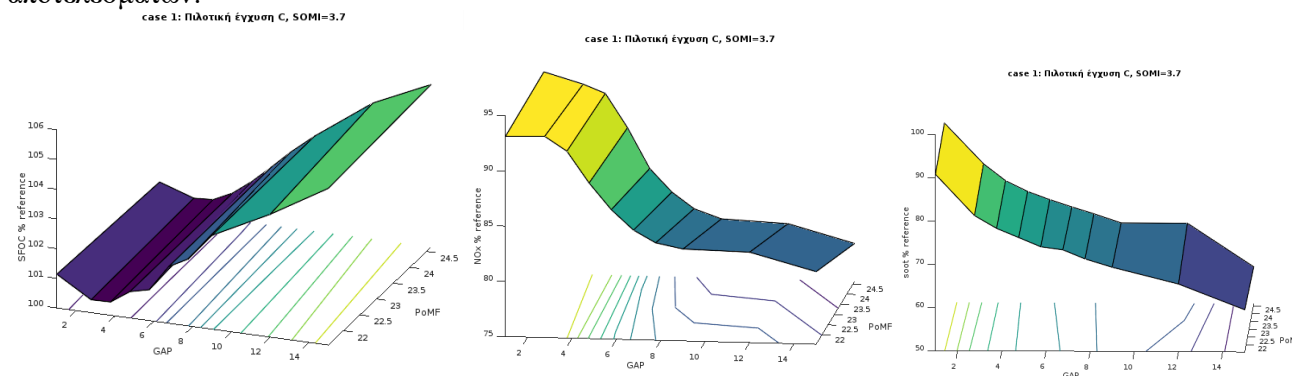
Από την παραπάνω μελέτη 5.2.1, φαίνεται ότι η επίδραση της μάζας μετέγχυσης δεν έχει τόσο μεγάλη στα αποτελέσματα. Συνεπώς, στη συνέχεια μελετώνται οι ίδιες περιπτώσεις σε μεγαλύτερο εύρος λύσεων GAP και για δύο μόνο διαφορετικές μάζες μετέγχυσης PoMF=[21.548%, 24.636%]. Η μάζα 39.924% απορρίπτεται καθώς οδηγεί σε εξαιρετικά ψηλές ειδικές καταναλώσεις καυσίμου. Η μετέγχυση μελετάται σε εύρος τιμών του GAP=(1°, 15°) με βήμα περίπου 1~3°.

5.2.2.1. Σταθερή πιλοτική έγχυση λύση C (SOP1, PMF, SOMI)=(-31, 10.3%, 3.7)

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης. Αναφέρεται ότι η τιμή της πίεσης σε όλες τις περιπτώσεις είναι αποδεκτή:

| | PoMF | GAP | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | | 1° | 2.77° | 3.77° | 4.77° | 5.77° | 6.77° | 7.77° | 9° | 12° | 15° |
| SFOC | 21.548 | 101.14 | 100.44 | 100.45 | 100.89 | 101.04 | 101.91 | 102.25 | 103.16 | 104.13 | 105.28 |
| | 24.636 | 100.94 | 100.56 | 100.60 | 100.91 | 101.39 | 101.96 | 102.56 | 103.21 | 104.59 | 105.48 |
| NOx | 21.548 | 93.138 | 93.228 | 91.933 | 89.100 | 86.732 | 84.929 | 83.828 | 823.331 | 83.194 | 81.579 |
| | 24.636 | 93.275 | 92.248 | 91.461 | 88.398 | 84.752 | 82.664 | 81.207 | 80.351 | 80.067 | 78.462 |
| soot | 21.548 | 90.744 | 81.239 | 78.311 | 76.215 | 74.105 | 73.423 | 71.351 | 69.452 | 65.638 | 59.753 |
| | 24.636 | 91.465 | 82.080 | 78.195 | 75.717 | 73.862 | 72.202 | 70.638 | 68.553 | 68.553 | 58.544 |

Οι αντίστοιχες επιφάνειες του χώρου λύσεων φαίνεται παρακάτω, μαζί με τις ισούψεις καμπύλες αποτελεσμάτων:



Εικόνα 79: Επιφάνειες SFOC, NOx, soot παραμετρικής λύσης με πιλοτική έγχυση C

Η γενική συμπεριφορά των επιφανειών αποτελεσμάτων δεν έχει αλλάξει ιδιαίτερα σε σχέση με τη μελέτη 5.2.1.1. Τα NOx αυξάνονται όσο η μετέγχυση είναι πιο κοντά στην κύρια έγχυση, γιατί το καύσιμο εγχύεται σε περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας λόγω της καύσης της κύριας έγχυσης. Όσο πιο μακριά εγχύεται η μετέγχυση τόσο περισσότερο τα καυσαέρια έχουν προλάβει να μετακινηθούν στο θάλαμο, η θερμοκρασία να απαχθεί από τα τοιχώματα ή να διαμεριστεί σε όλο το θάλαμο και τοπικά η θερμοκρασία του αέρα καύσης να είναι χαμηλότερη. Αξιοσημείωτη σε αυτή τη μελέτη είναι η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων για μικρές αποστάσεις μετέγχυσης, όπου παρατηρείται ότι, ανεξάρτητα από τη μάζα της, η ειδική κατανάλωση παρουσιάζει τάση αύξησης, παρότι σχετικά χαμηλή, αλλά μεγαλύτερη αυτής της αναφοράς. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει λόγω της ρευστομηχανικής στο θάλαμο, και σχετίζεται ίσως και με την αύξηση των soot για μικρό GAP. Οι θερμοκρασίες είναι μεγάλες, επομένως αιτία για τη συμπεριφορά αυτή είναι ο λόγος αέρα καυσίμου. Στην περίπτωση συνεχόμενης έγχυσης το μέτωπο της φλόγας συνεχίζει να τροφοδοτείται ώστε θερμότητα εκλύεται κοντά στο ANΣ. Για μια μικρή παύση της έγχυσης, η φλόγα σταματάει προς στιγμή να τροφοδοτείται, ενώ το σπρέι της μετέγχυσης έχει χάσει την μεγάλη ταχύτητα που θα είχε αν εγχεόταν σαν μέρος της κύριας έγχυσης. Το καύσιμο της μετέγχυσης βρίσκει αντίσταση, έχοντας απομακρυνθεί από τη ροή

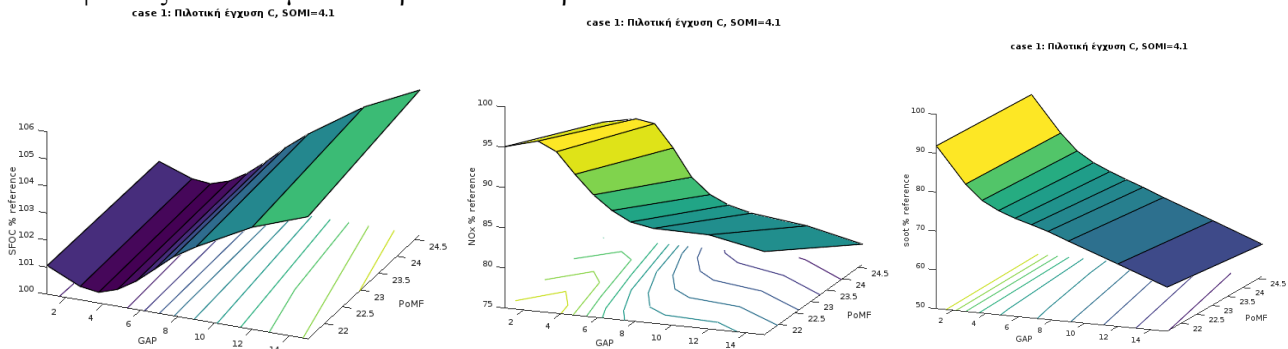
της κύριας έγχυσης και δεν τροφοδοτεί το tip της φλόγας αλλά το ύστερο κομμάτι της, που είναι κυρίως καυσαέρια. Συνεπώς το καύσιμο δεν βρίσκει το απαραίτητο οξυγόνο για να καεί, και η έναυσή του γίνεται με έλλειψη οξυγόνου, απομακρύνεται δηλαδή από την τέλεια καύση. Αυτό αποτυπώνεται και στην επιφάνεια των NOx, που, παρότι αυξημένα, για πολύ μικρά GAP, παρατηρείται μια πολύ μικρή μείωσή τους, οφειλόμενη σε έλλειψη οξυγόνου.

5.2.2.2. Σταθερή πιλοτική έγχυση λύση H (SOPI,PMF,SOMI)=(-12.4, 11.6%, 4.1)

Στη συνέχεια, η ίδια μελέτη επαναλαμβάνεται για πιλοτική έγχυση H του κ. Ανδρεάδη (πιο κοντινή πιλοτική έγχυση και καθυστερημένη κύρια έγχυση). Η πίεση σε όλες τις περιπτώσεις δεν ξεπερνάει τα 149 bar. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:

| | PoMF | GAP | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1° | 2.77° | 3.77° | 4.77° | 5.77° | 6.77° | 7.77° | 9° | 12° | 15° |
| SFOC | 21.548 | 101.06 | 100.50 | 100.40 | 100.62 | 101.04 | 101.60 | 102.18 | 102.70 | 103.77 | 104.52 |
| | 24.636 | 101.06 | 100.63 | 100.56 | 100.78 | 101.02 | 101.74 | 102.36 | 103.01 | 104.37 | 105.35 |
| NOx | 21.548 | 95.077 | 96.162 | 95.059 | 92.523 | 90.205 | 88.498 | 87.307 | 86.800 | 86.708 | 85.340 |
| | 24.636 | 89.386 | 90.197 | 89.840 | 87.044 | 83.652 | 81.722 | 80.660 | 79.944 | 79.078 | 77.505 |
| soot | 21.548 | 91.894 | 82.768 | 78.995 | 76.787 | 75.220 | 73.987 | 72.682 | 70.707 | 66.076 | 61.355 |
| | 24.636 | 90.924 | 81.750 | 77.565 | 74.953 | 73.093 | 71.422 | 69.884 | 67.769 | 63.060 | 58.232 |

Οι επιφάνειες αποτελεσμάτων παρατίθενται παρακάτω:



Εικόνα 80: Επιφάνειες SFOC, NOx, soot παραμετρικής λύσης με πιλοτική έγχυση H

Η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων είναι παρόμοια με αυτή της μελέτης 5.2.2.1, με την κύρια διαφορά ότι τα NOx είναι σχετικά αυξημένα για μικρές αποστάσεις μετέγχυσης, αλλά το φαινόμενο μικρής μείωσής τους για εξαιρετικά μικρά GAP, πιο έντονο.

Σε όλες τις περιπτώσεις η τριπλή έγχυση ευνοεί τη μείωση των ρύπων, ενώ έχει αρνητική επίδραση στην ειδική κατανάλωση. Δεδομένου ότι οι ρύποι είναι ανάλογοι της ποσότητας έγχυσης καυσίμου, η μείωση του φορτίου και του έργου, άρα και η μείωση του εγγεόμενου καυσίμου θα μειώσει κι άλλο τους ρύπους. Συνεπώς στη συνέχεια μελετάται η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων σε μειωμένο φορτίο, επιλέγοντας από τις παραπάνω λύσεις αυτές με την καλύτερη συμπεριφορά σε ειδική κατανάλωση, με στόχο την εύρεση περιοχής με ταυτόχρονα χαμηλούς ρύπους και χαμηλή ειδική κατανάλωση σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η μετέγχυση (PoMF, GAP)=(24.636%, 3.7°) στις δύο περιπτώσεις πιλοτικής έγχυσης C&H.

5.2.3. Μελέτη ευαισθησίας ως προς MR για σταθερή μετέγχυση (PoMF, GAP)=(24.636%, 3.7°)

Στην προσπάθεια ταυτόχρονης μείωσης της ειδικής κατανάλωσης και των ρύπων γίνεται μελέτη σε μειωμένο φορτίο μηχανής στο εύρος MR=(0%, 2%) με βήμα 0.5%.

5.2.3.1. Σταθερή πιλοτική έγχυση λύση C (SOPI,PMF,SOMI)=(-31, 10.3%, 3.7)

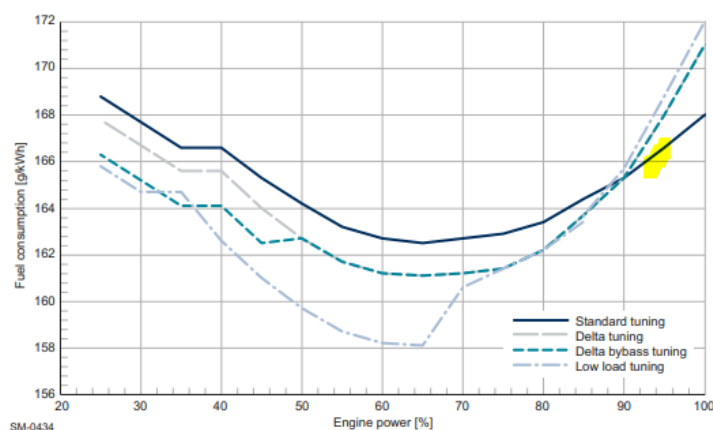
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για σταθερή πιλοτική έγχυση και μετέγχυση, και μόνη μεταβλητή τη μείωση μάζας MR. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σαν ποσοστά των αντίστοιχων

αποτελεσμάτων του κίνα3 για την περίπτωση αναφοράς, με εξαίρεση τα NOx, που παρουσιάζονται σαν ποσοστά της πειραματικής τιμής.

| MR % | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| NOx % | 91.461 | 81.279 | 80.022 | 80.166 | 79.192 |
| SFOC % | 100.599 | 100.445 | 100.397 | 100.160 | 100.169 |
| Soot % | 78.195 | 75.92.6 | 74.222 | 73.263 | 71.727 |
| Work % | 99.44 | 99.44 | 98.14 | 98.14 | 98.14 |

Παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση των ρύπων με τη μείωση του εγχεόμενου καυσίμου, μιας και τα αποτελέσματα των ρύπων παρουσιάζονται σαν ποσοστά των ολικών παραγόμενων σε πλήρες φορτίο της περίπτωσης αναφοράς. Ιδιαίτερα τα soot είναι εύλογο να παρουσιάζονται μειωμένα, αφού η δημιουργία τους προκύπτει από συστατικά του καυσίμου. Τα NOx από την άλλη, εξαρτώνται πολύ από το μέγεθος της κύριας έγχυσης και τη τροφοδοσία του μετώπου φλόγας με καύσιμο, όπου επικρατούν ψηλές θερμοκρασίες και λόγοι αέρα καυσίμου, ιδανικές συνθήκες για την παραγωγή τους. Όσο πιο πολύ διαρκεί η φλόγα διάχυσης τόσο τα οξείδια αυξάνονται. Συνεπώς μια μικρότερη κύρια έγχυση σαφώς μειώνει και τους ρύπους της. Η ειδική κατανάλωση δεν έχει τόσο σταθερή συμπεριφορά, καθώς παρουσιάζει ένα σημείο καμψής για μείωση περίπου MR=1.5%, μέχρι το οποίο η ειδική κατανάλωση μειώνεται με τη μείωση του φορτίου, ενώ μετά από αυτό παρουσιάζει μικρή αύξηση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η μείωση της ειδικής κατανάλωσης με τη μείωση του φορτίου δεν οφείλεται στον τριπλό παλμό έγχυσης απαραίτητα, καθώς και σε συνεχόμενο παλμό, η μείωση του φορτίου, σε υψηλά φορτία, επιφέρει μείωση της ειδικής κατανάλωσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης της μηχανής [106]:



Εικόνα 81: Διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης RT-flex58T.

Συνεπώς η ειδική κατανάλωση εξαρτάται από δύο αντικρουόμενους παράγοντες. Από τη μία η μείωση του φορτίου τείνει να μειώσει την ειδική κατανάλωση, ενώ από την άλλη ο τριπλός παλμός τείνει να την αυξήσει, γι' αυτό και η συμπεριφορά της δεν είναι σταθερή με τη μείωση του φορτίου. Τελικά, λειτουργώντας κάποιος τη μηχανή σε πλήρες φορτίο, φαίνεται ότι μπορεί να έχει πολύ καλή μείωση στους ρύπους με μικρή μείωση του έργου της μηχανής και αμελητέα αύξηση ειδικής κατανάλωσης.

5.2.3.2. Σταθερή πιλοτική έγχυση λύση H (SOPI,PMF,SOMI)=(-12.4, 11.6%, 4.1)

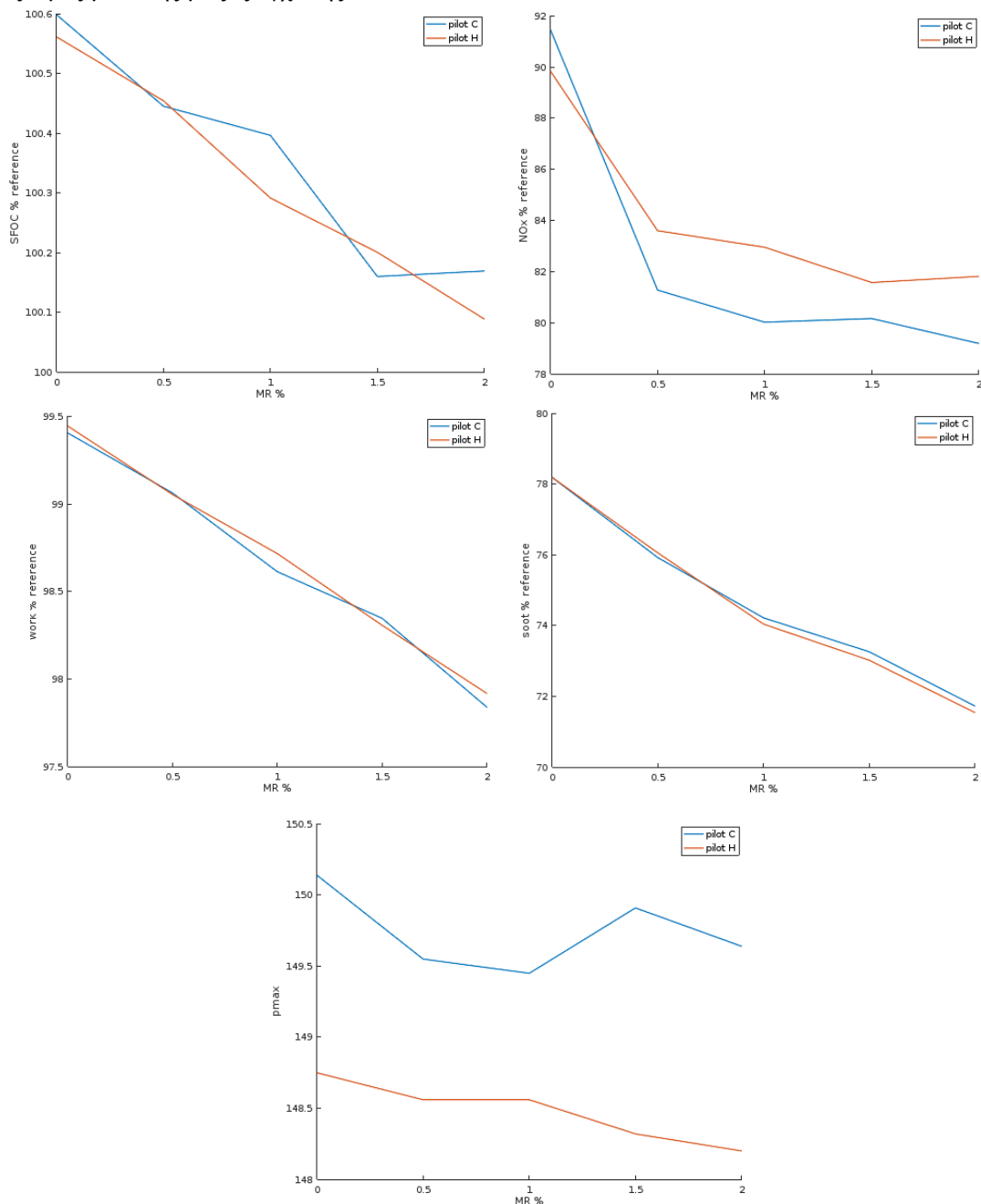
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη μείωση μάζας έγχυσης καυσίμου για πιλοτική έγχυση H:

| MR % | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| NOx % | 89.840 | 83.602 | 82.953 | 81.575 | 81.816 |
| SFOC % | 100.562 | 100.455 | 100.291 | 100.201 | 100.089 |
| Soot % | 78.195 | 76.059 | 74.045 | 73.024 | 74.926 |
| Work % | 99.44 | 99.05 | 98.72 | 98.31 | 97.92 |

Η συμπεριφορά των αποτελεσμάτων είναι περίπου ίδια με την περίπτωση πιλοτικής C, με τη διαφορά ότι η ειδική κατανάλωση είναι σταθερά μειούμενη με τη μείωση της μάζας καυσίμου, πράγμα που αποδεικνύει και την υπόθεση ότι το σημείο καμψής στη μελέτη 5.2.3.1 οφείλεται στις αντικρουόμενες τάσεις μείωσης,

λόγω φορτίου, και αύξησης λόγω τριπλού παλμού. Στην περίπτωση πιλοτικής έγχυσης H, η καύση της πιλοτικής έγχυσης συμβαίνει πιο κοντά στο ANΣ, οπότε ο παράγοντας της μείωσης φορτίου υπερτερεί οδηγώντας στη συνολική μείωση της SFOC για όλες τις μειώσεις φορτίου τριπλού παλμού. Εξάλλου, η μείωση του φορτίου φέρνει πιο κοντά στο ANΣ την μετέγχυση, οπότε η ειδική κατανάλωση έχει κι άλλο λόγο να παρουσιάζει μείωση.

Παρακάτω φαίνονται συγκριτικά αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων πιλοτικών εγχύσεων για τις διάφορες τιμές μείωσης μάζας έγχυσης:



Εικόνα 82: Συγκριτικά αποτελέσματα των δύο πιλοτικών εγχύσεων, συναρτήσει του ποσοστού της μάζας μετέγχυσης.

Φαίνεται ότι η μεταβολή της πιλοτικής έγχυσης για περιπτώσεις μειωμένου φορτίου έχει επίδραση κυρίως στην ειδική κατανάλωση και τα NOx, και δευτερευόντως στο έργο. Η επίδραση στην πίεση είναι λογική και αναμενόμενη, αν αναλογιστούμε τις τόσες μελέτες και τον λόγο που αρχικά μελετήθηκε η πιλοτική έγχυση, με στόχο δηλαδή τη μείωση του θορύβου. Η επίδραση της μείωσης μάζας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έχει ταυτόχρονη ευεργετική επίδραση και στη μείωση των ρύπων και στην ειδική κατανάλωση. Ωστόσο πάλι η ειδική κατανάλωση δεν επιτυγχάνεται να πέσει κάτω από αυτή της περίπτωσης αναφοράς. Από

τις παραπάνω λύσεις φαίνεται ότι αξίζει να μελετηθούν περαιτέρω αυτές με μείωση μάζας 0.5%~1.5%, που παρουσιάζουν καλή μείωση ρύπων με σχετικά αποδεκτή μείωση φορτίου.

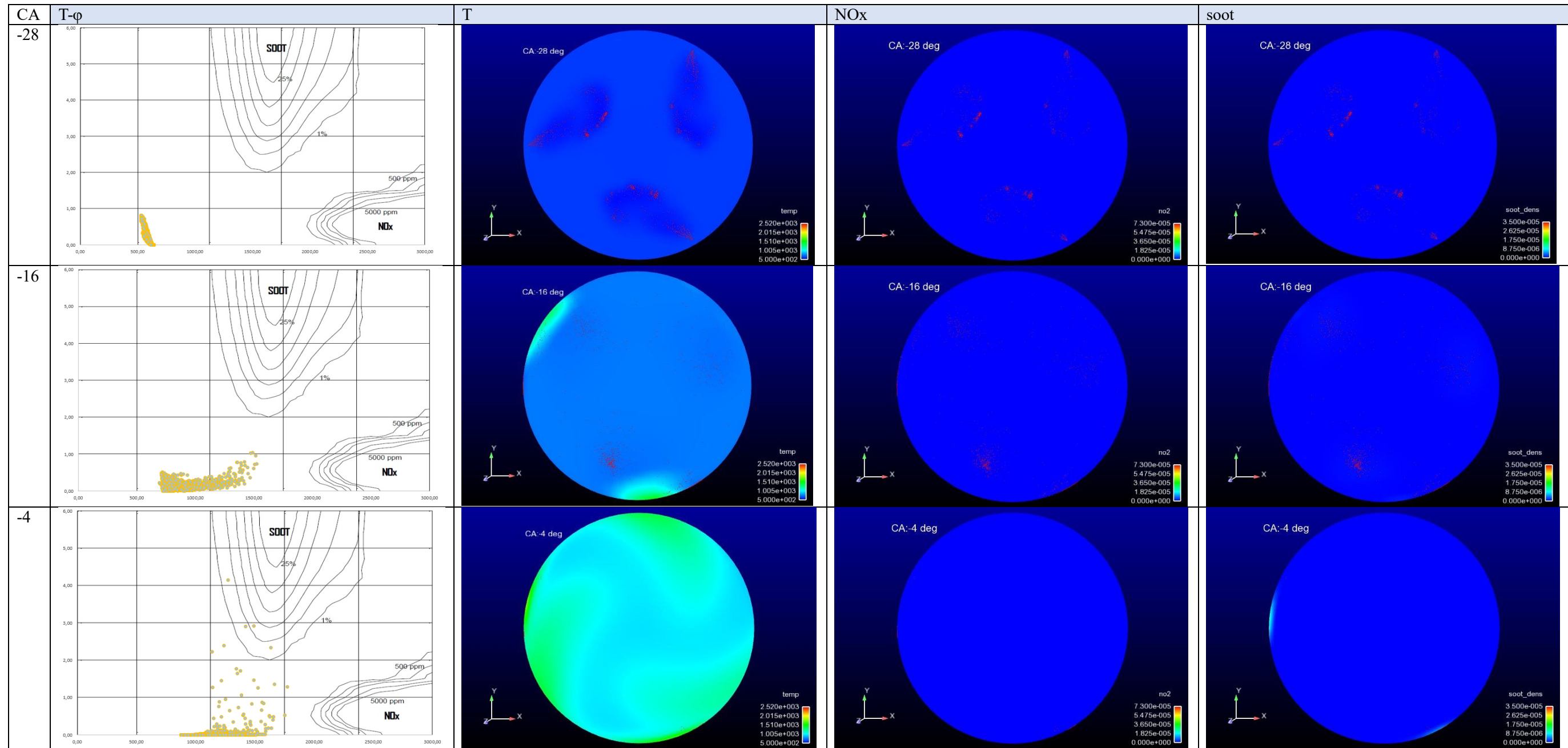
5.3. Οπτικοποίηση και περαιτέρω διερεύνηση του τριπλού παλμού σε μειωμένο φορτίο

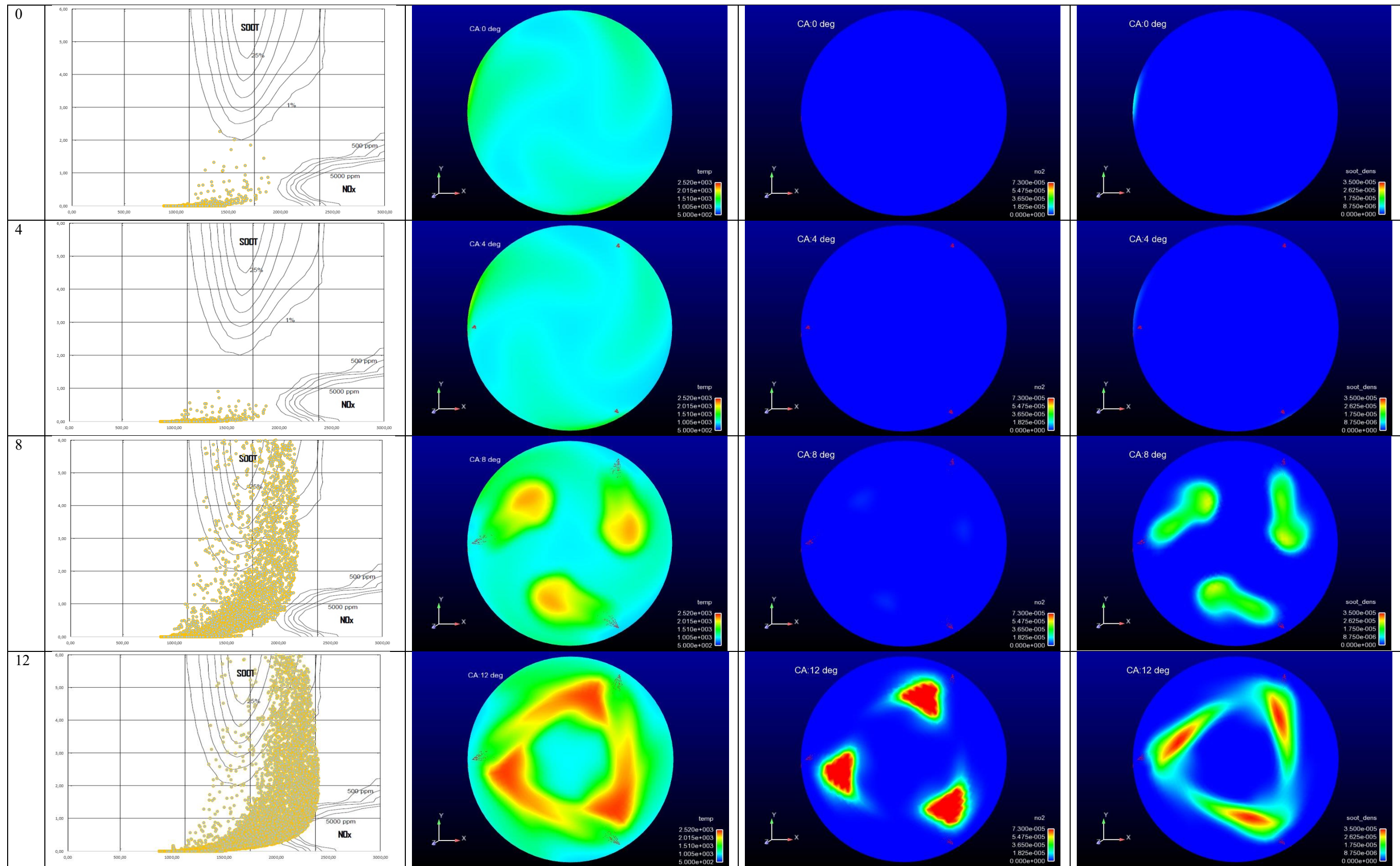
Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθούν τα ροικά πεδία στο θάλαμο καύσης και οι παράγοντες που οδηγούν στα συγκεκριμένα αποτελέσματα, ιδιαίτερα για τις λύσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω: μείωση μάζας 0.5% & 1% σε δύο πιλοτικές εγχύσεις C & H, καθώς και η περίπτωση πιλοτικής C με MR=1.5 % (που παρουσιάζει καλή μείωση ειδικής κατανάλωσης), και με σταθερή μετέγχυση (PoMF, GAP)=(24.636%, 3.7°), όπως προέκυψε από τη μελέτη 5.2.2.

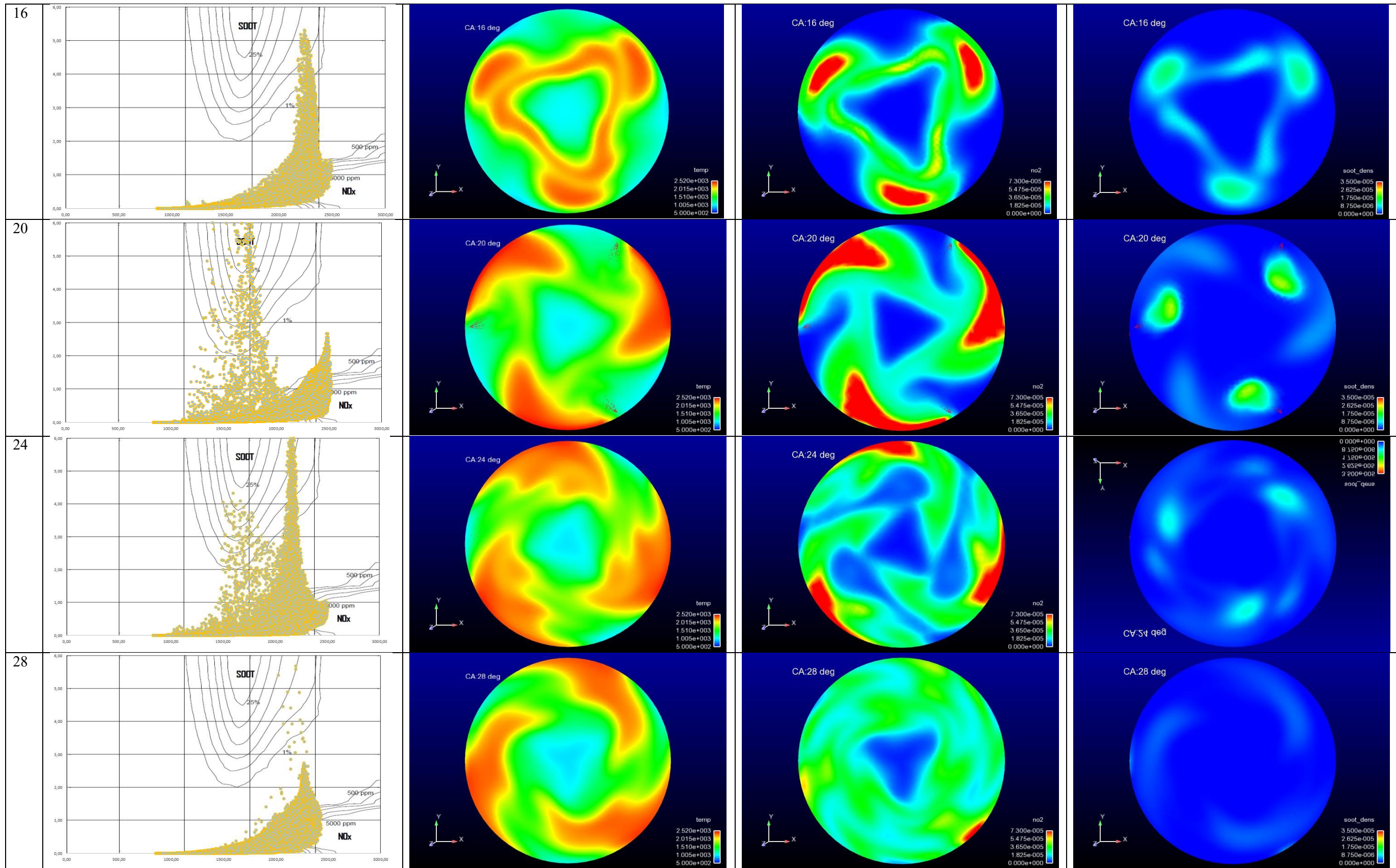
Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τους χάρτες T-φ και τα οπτικοποιημένα αποτελέσματα του θαλάμου καύσης για τη θερμοκρασία, τα NOx, SFOC & soot.

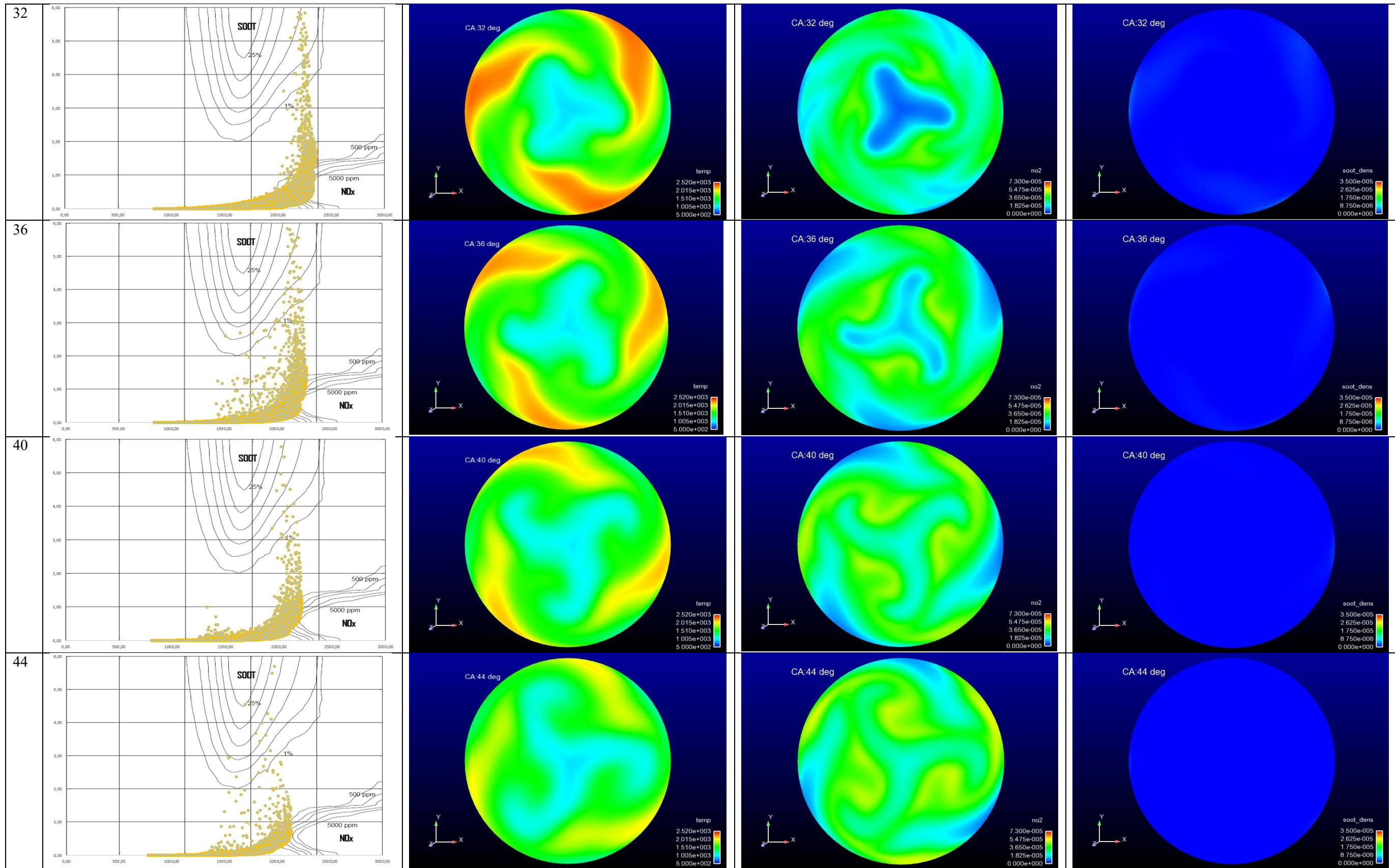
5.3.1. Οπτικοποίηση παλμού με πιλοτική έγχυση C

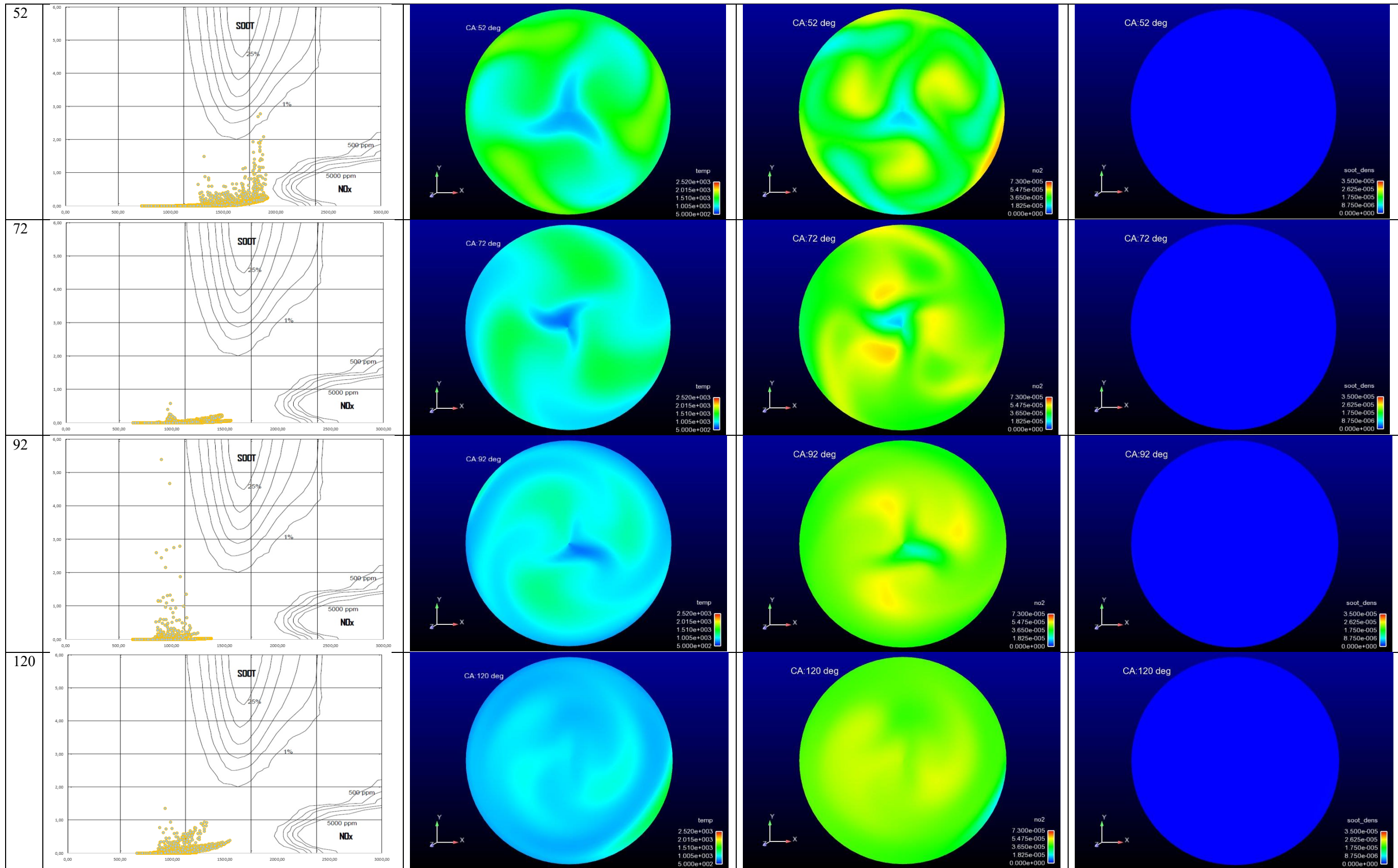
5.3.1.1. Οπτικοποίηση έγχυσης CO.5 (PiMF,SPil,SOI,GAP, PoMF, MR)=(10.3%,-31°,3.7°,24.636%,3.7°,0.5%)



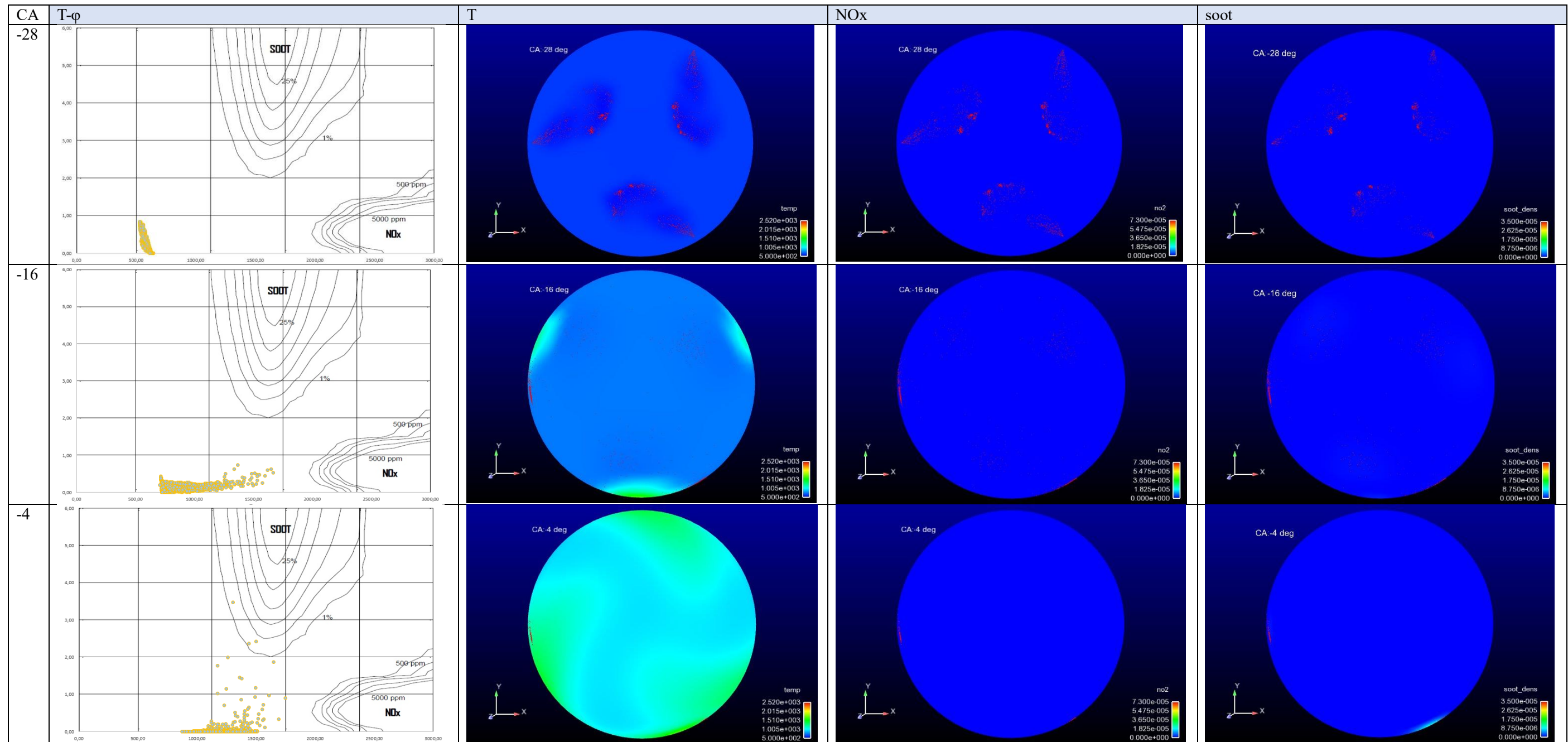


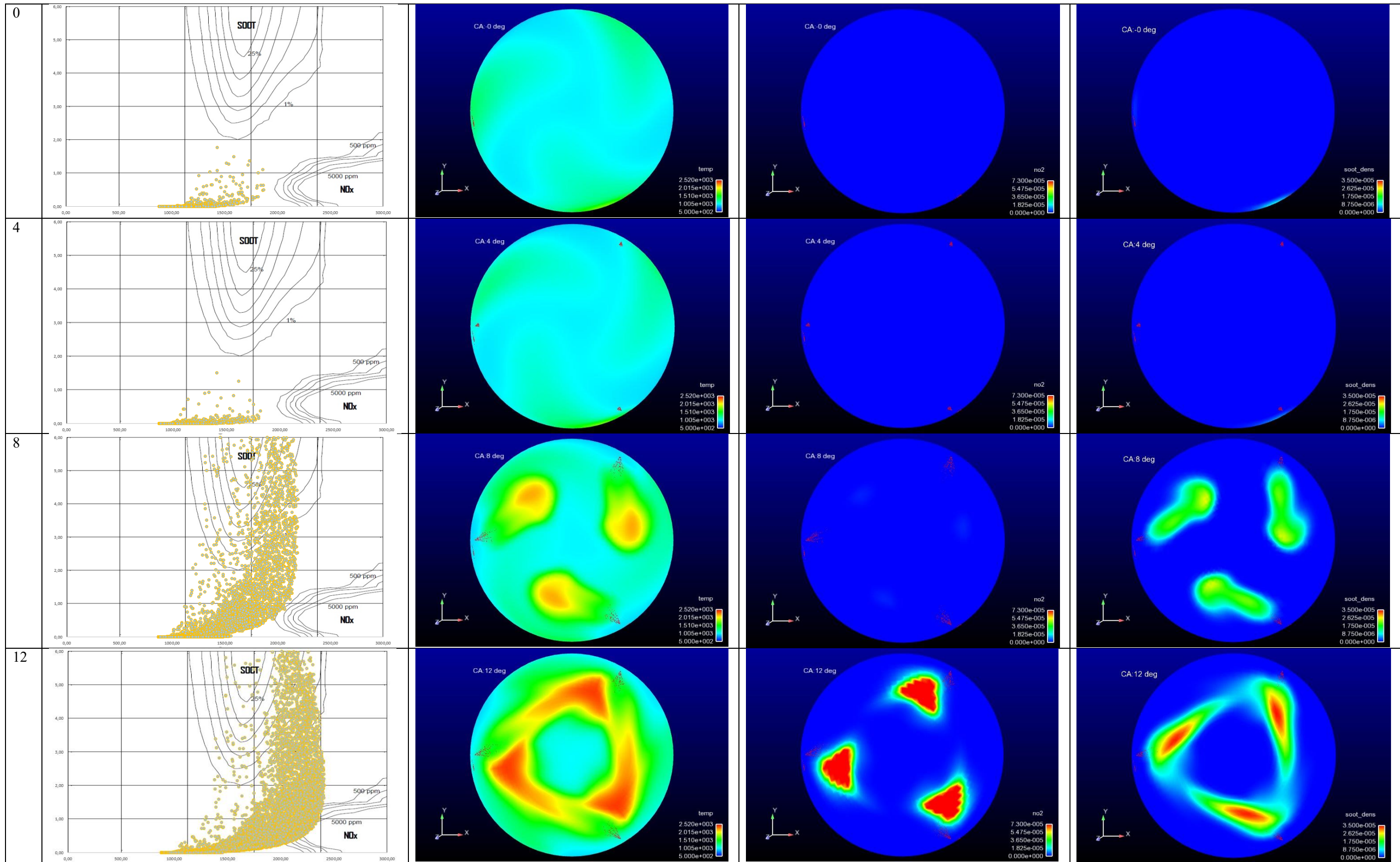


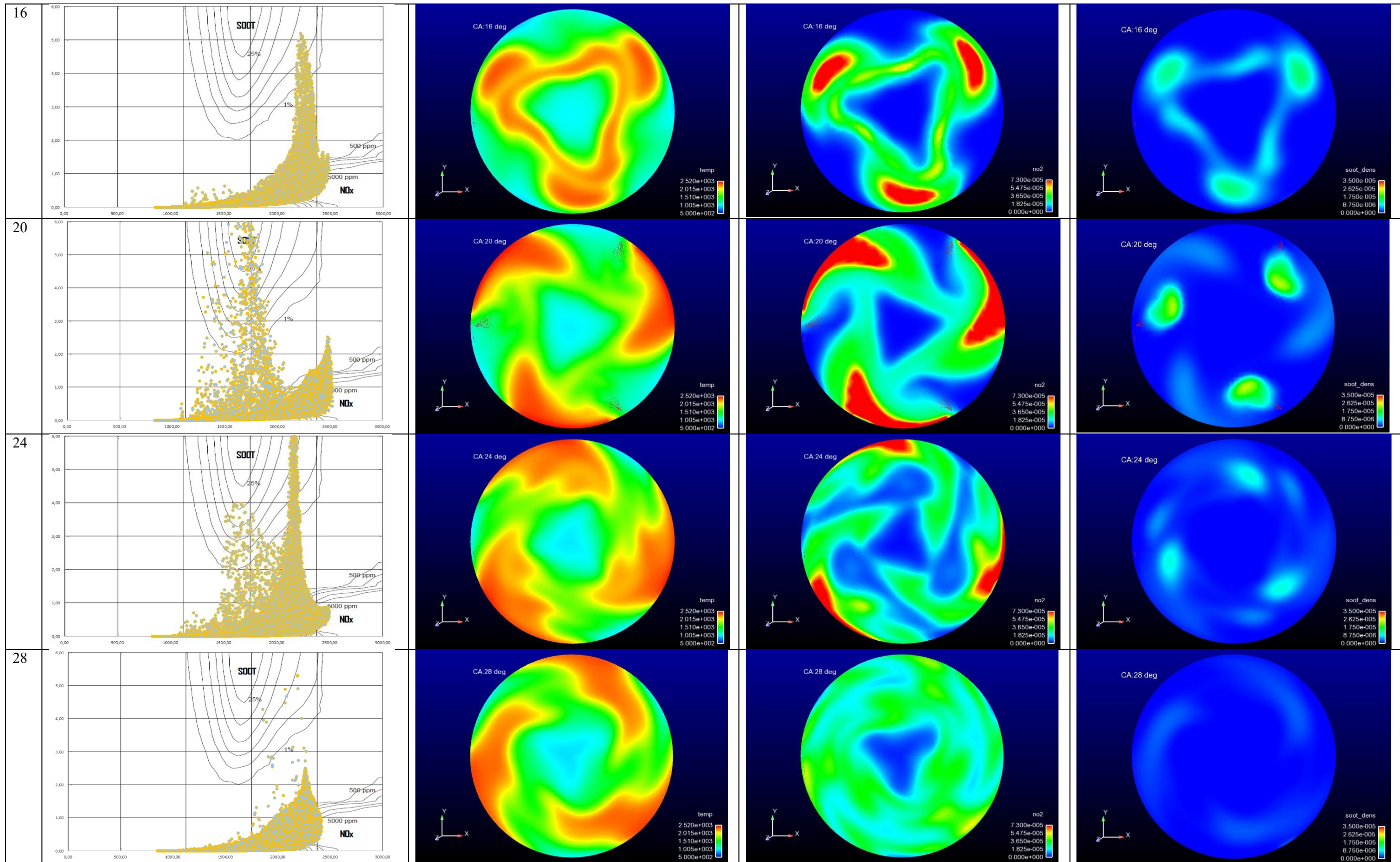


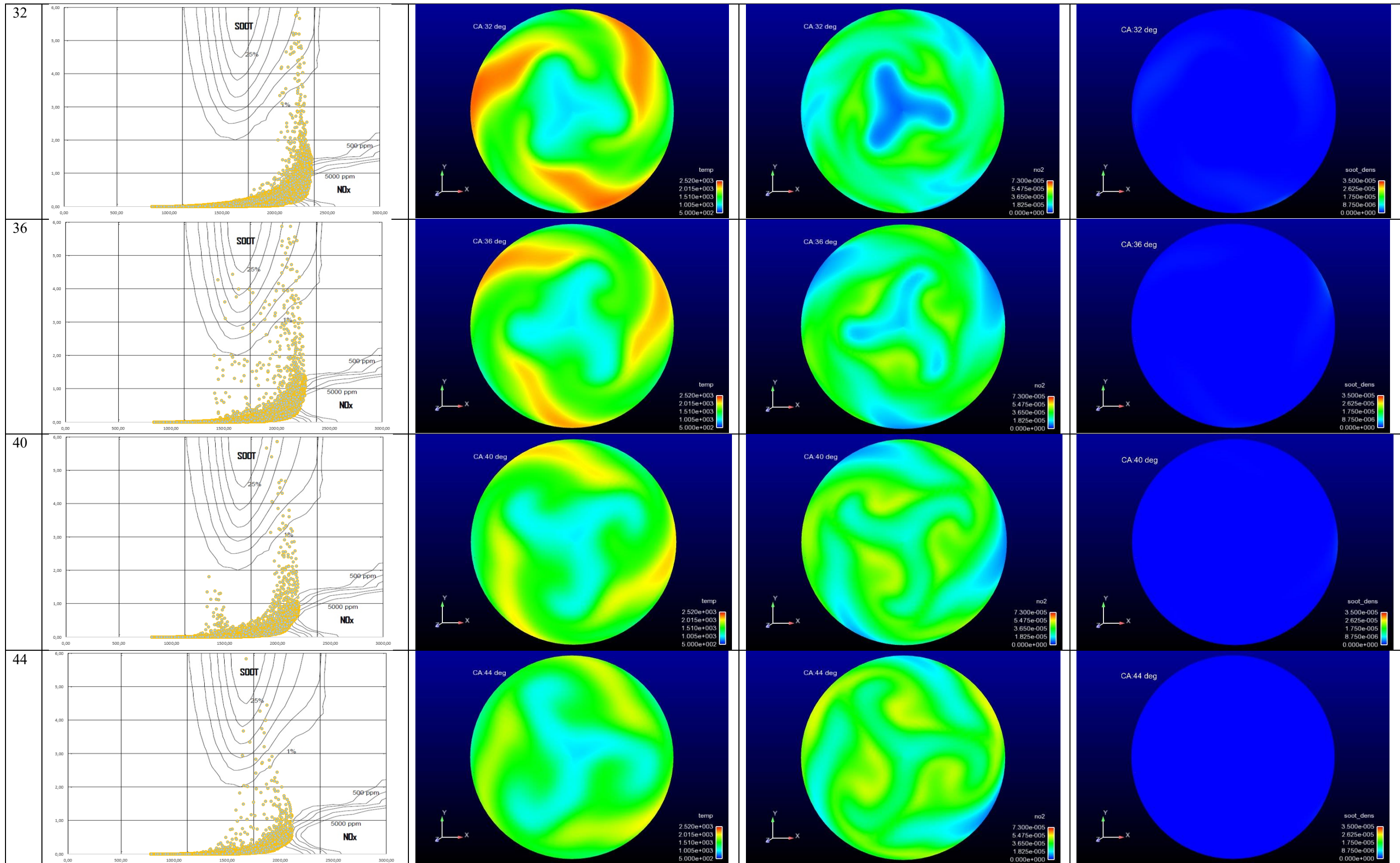


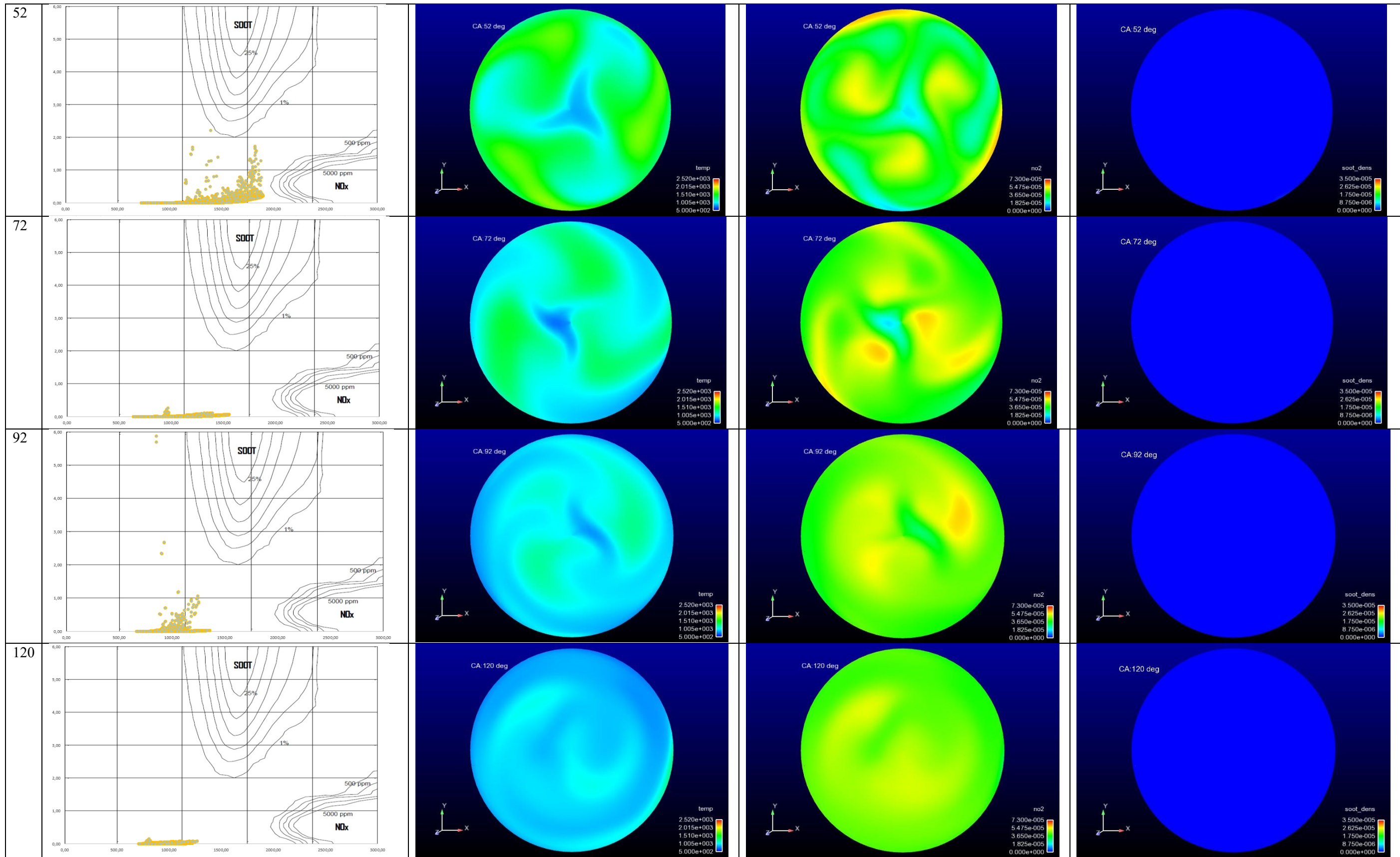
5.3.1.2. Οπτικοποίηση έγχυσης C1 (PiMF,SPiI,SOI,GAP, PoMF, MR)=(10.3%,-31°,3.7°,24.636%,3.7°,1%)



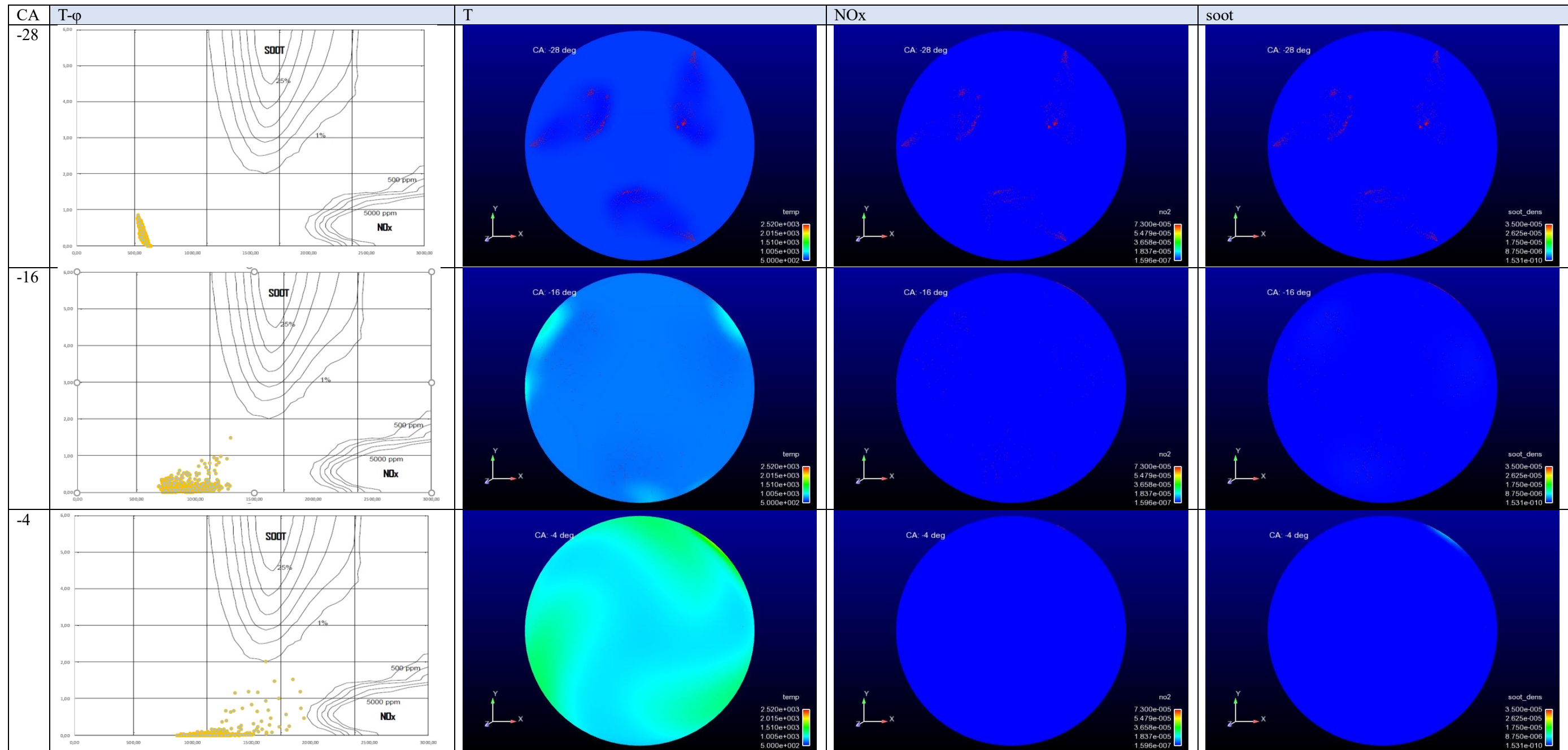


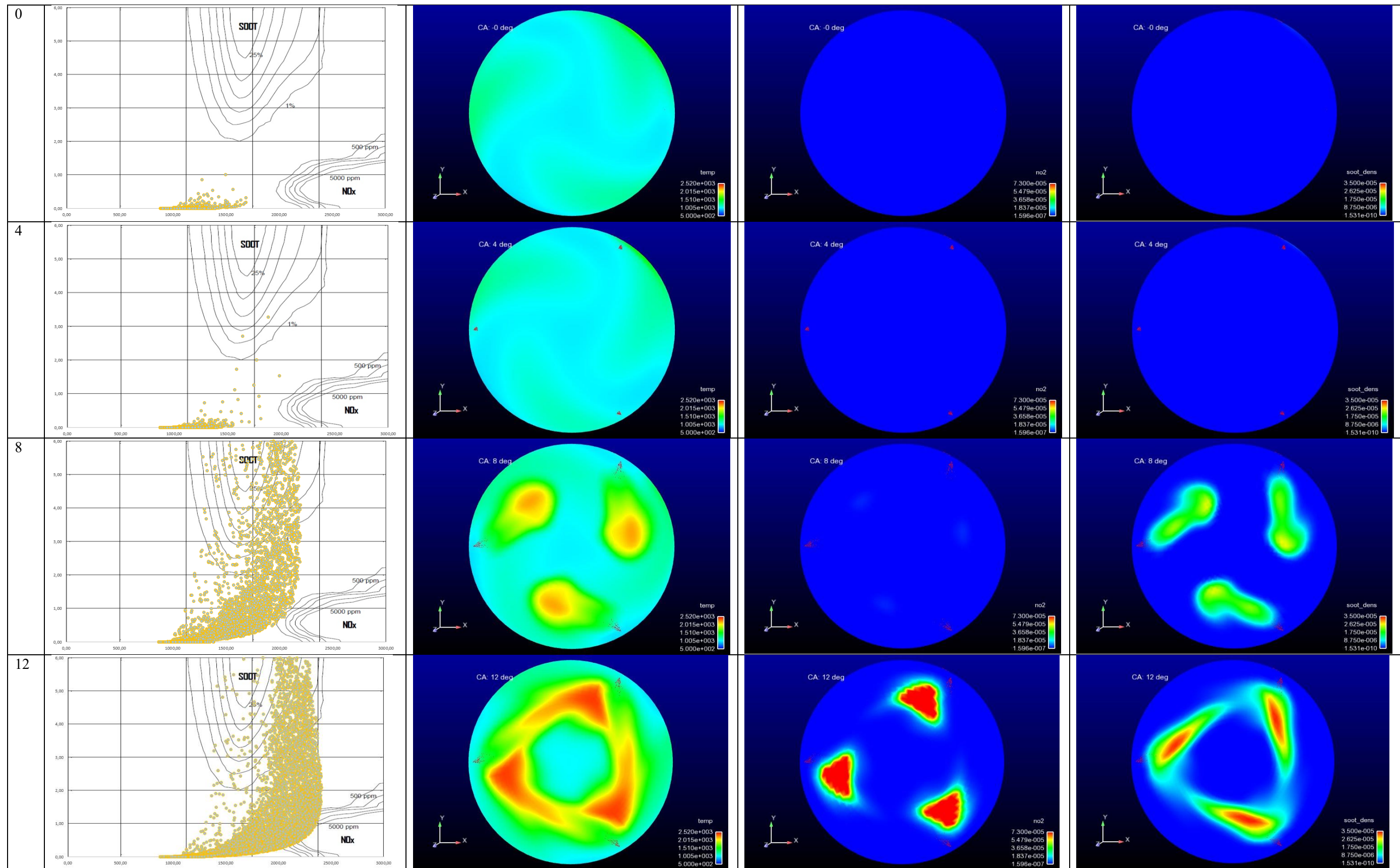


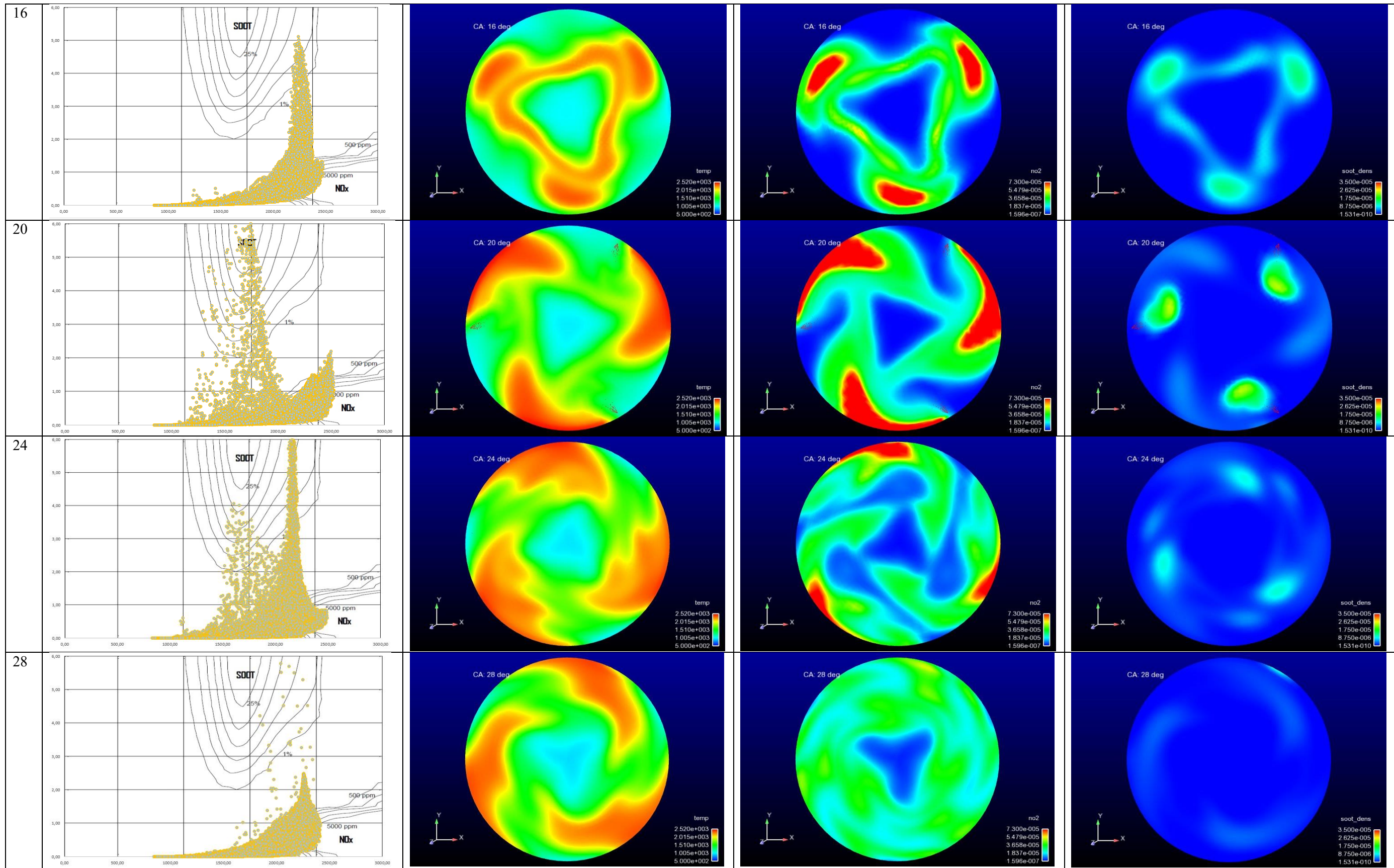


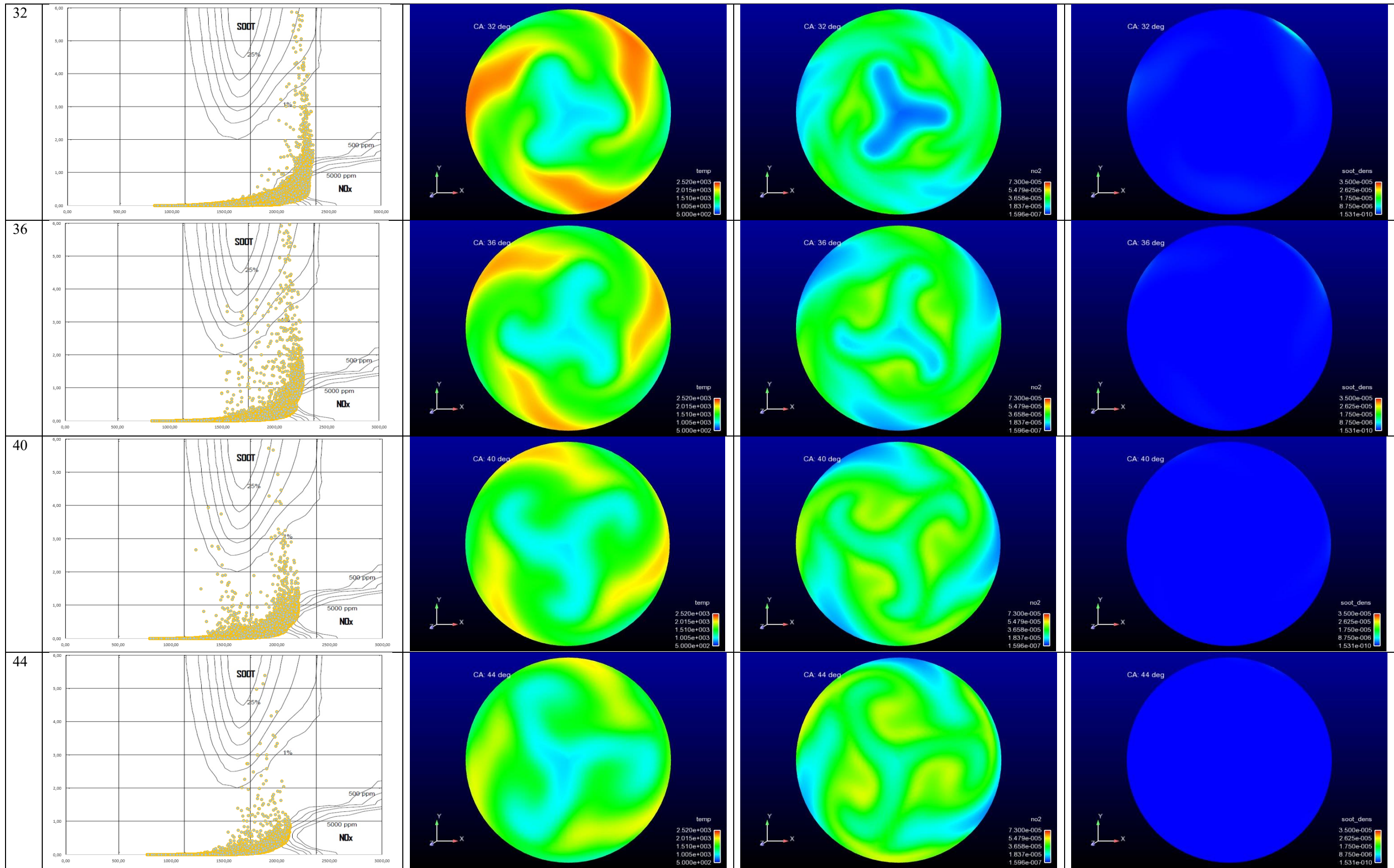


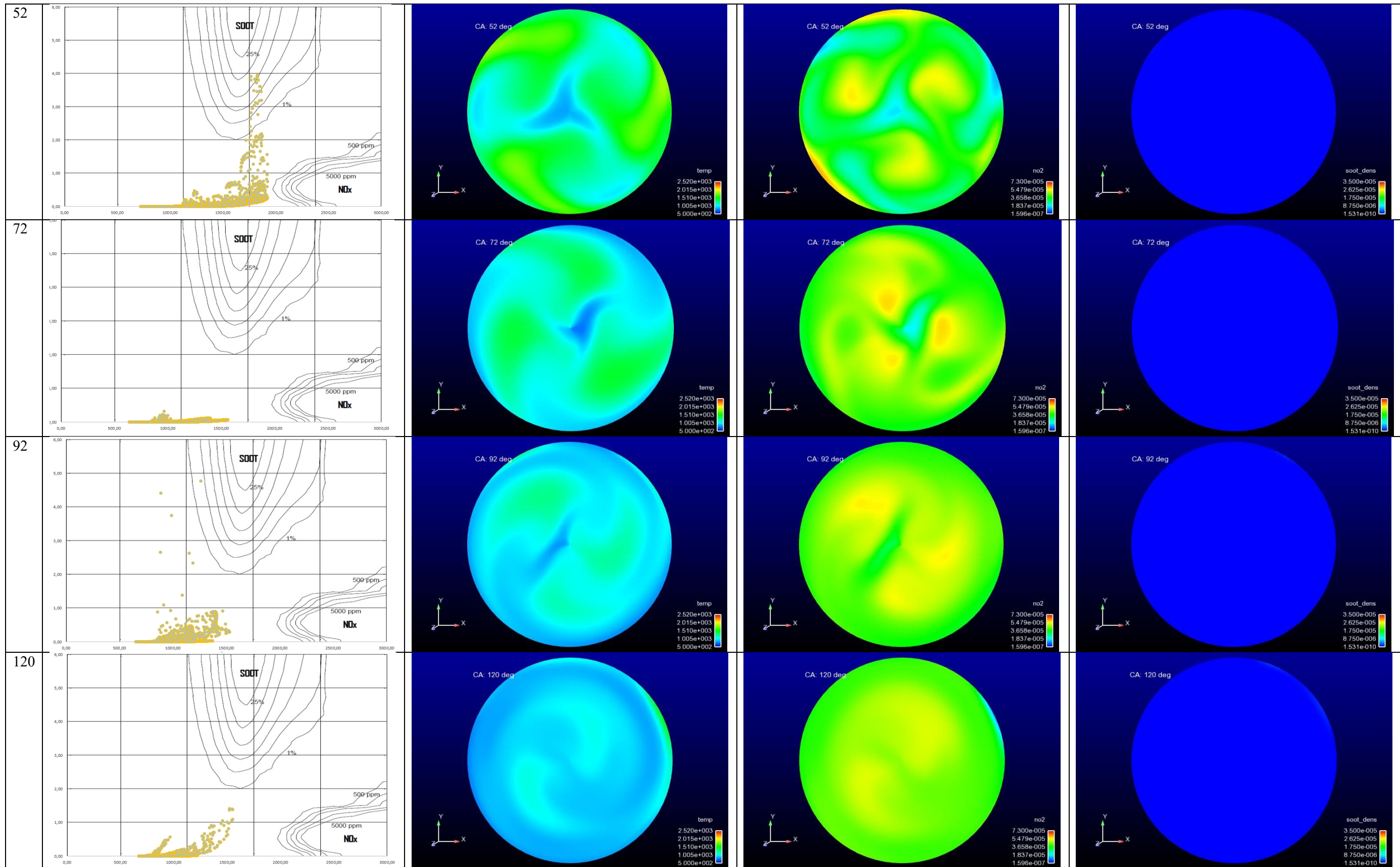
5.3.1.3. Οπτικοποίηση έγχυσης C1.5 (PiMF,SPiI,SOI,GAP, PoMF, MR)=(10.3%,-31°,3.7°,24.636%,3.7°,1.5%)









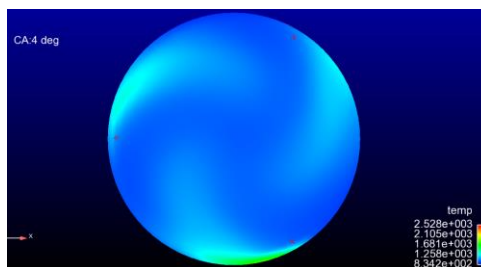


5.3.1.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων μείωσης μάζας MR για πιλοτική έγχυση C

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μείωση της μάζας έγχυσης επιφέρει μείωση σε ρύπους και ειδική κατανάλωση. Η μείωση της ειδικής κατανάλωσης οφείλεται κυρίως στην καμπύλη ειδικής κατανάλωσης του κινητήρα καθώς και στη μετακίνηση της μετέγχυσης πιο κοντά στο ΑΝΣ. Η μείωση των NOx υποθέτουμε ότι γίνεται λόγω της διακοπής τροφοδοσίας της φλόγας κύριας έγχυσης νωρίτερα από την περίπτωση αναφοράς ή την περίπτωση πλήρους φορτίου, ενώ η μείωση της αιθάλης λόγω της μείωσης του καυσίμου, άρα και μείωσης των μορίων που τελικά ποσοστιαία θα μετατραπούν σε αιθάλη. Ωστόσο οι χάρτες T-φ και τα οπτικοποιημένα αποτελέσματα βοηθάνε να παρατηρηθούν κι άλλα φαινόμενα, καθώς και να επιβεβαιώσουν ή να διαψεύσουν τις παραπάνω υποθέσεις.

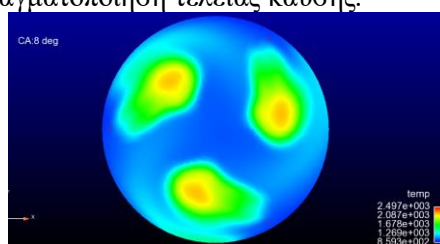
Πρώτα απ' όλα παρατηρείται η γενική εικόνα της καύσης με πιλοτική έγχυση C και στη συνέχεια θα σχολιαστεί και η επίδραση της μείωσης μάζας σε αυτή. Σε όλες τις περιπτώσεις αρχικά παρατηρείται η εμφάνιση υγρού φιλμ επικαθήμενων σταγονιδίων στα τοιχώματα κατά την πιλοτική έγχυση, που παραμένουν άκαυστα ως το τέλος του κύκλου. Το υγρό αυτό φιλμ σαφώς έχει κακή επίδραση στην ειδική κατανάλωση, καλή επίδραση στη μείωση των NOx, και κακή επίδραση στην παραγωγή soot. Γενικά το υγρό φιλμ πρέπει να αποφεύγεται γιατί εκτός της αυξημένης κατανάλωσης, καταπονεί θερμικά και τα τοιχώματα του κινητήρα.

Ως προς την κύρια έγχυση παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η έναρξη της κύριας έγχυσης συμβαίνει σε περιοχή ύστερα από το πέρασμα του πεδίου υψηλότερης θερμοκρασίας παραγμένης από την καύση του πρώτου παλμού.



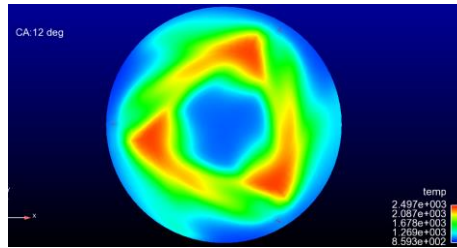
Εικόνα 83: Στιγμιότυπο CA=4 deg λίγο μετά την έναρξη της κύριας έγχυσης.

Στις 8 μοίρες, που η κύρια έγχυση συνεχίζεται, τα σωματίδια της αρχίζουν να καίγονται, χωρίς όμως να έχουν ακόμα εισέλθει στο πεδίο ψηλότερης θερμοκρασίας του πρώτου παλμού. Στο σημείο αυτό παρατηρείται η έναρξη της παραγωγής των άκαυστων σωματιδίων αιθάλης, εντοπισμένης στις περιοχές έναρξης της καύσης όπου η θερμοκρασία είναι σχετικά υψηλή αλλά ο λόγος αέρα καυσίμου δεν είναι αρκετά υψηλός για την πραγματοποίηση τέλει καύσης.



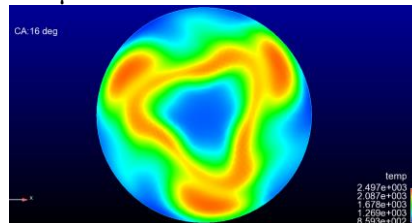
Εικόνα 84: Στιγμιότυπο CA=8 deg, φάση καθυστέρησης έναυσης και προανάμιξης καυσίμου.

Η επίδραση της πιλοτικής έγχυσης στην καύση του κύριου παλμού φαίνεται περίπου στις 12 μοίρες, οπότε και η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα και αισθητά. Η καύση ωστόσο των σωματιδίων του κάθε εγχυτήρα φαίνεται να παρεμποδίζεται από τα εγχυόμενα τελευταία υγρά σωματίδια του γειτονικού εγχυτήρα. Το αρχικά σφαιρικό σχήμα της φλόγας φαίνεται να μετατρέπεται σε τριγωνικό καθώς τα σωματίδια του γειτονικού εγχυτήρα εξατμίζόμενα «σβήνουν» τη φλόγα των ήδη καιόμενων αερίων. Αντίστοιχα η παραγωγή των NOx είναι ραγδαία και εντοπίζεται στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας, ενώ η παραγωγή soot είναι μεγάλη στα σημεία κοντά στους εγχυτήρες όπου το καύσιμο είναι πιο πυκνό.



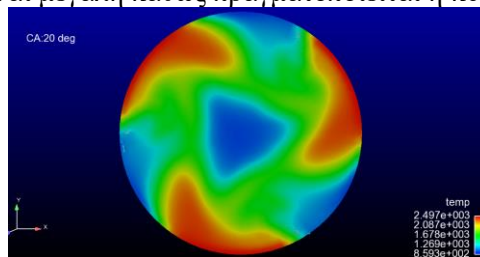
Εικόνα 85: Στιγμιότυπο CA=12 deg, φλόγα προανάμειξης και υψηλές θερμοκρασίες

Συνεπώς, στις 16 περίπου μοίρες παρατηρείται ελάχιστη έως μηδενική αύξηση της υψηλότερης θερμοκρασίας του κυλίνδρου, αφού η καύση της αρχικής φλόγας έχει αναχαιτιστεί. Η ροή των σωματιδίων του γειτονικού εγχυτήρα φαίνεται να έχει επίσης διαταραχθεί καθώς κάποια σωματίδια φαίνεται να καίγονται από τη φλόγα των σωματιδίων του ίδιου εγχυτήρα, ενώ κάποια καίγονται στη φλόγα του γειτονικού. Η φλόγα της έγχυσης του ενός εγχυτήρα διακόπτεται από μια ζώνη χαμηλότερης θερμοκρασίας που οφείλεται στο πέρασμά της από τον γειτονικό εγχυτήρα. Η παραγωγή των NOx, σε αντιστοιχία με τη θερμοκρασία φαίνεται να έχει μειωθεί, ενώ τα soot είναι αισθητά μειωμένα, καθώς η ανάμιξη των ροών των εγχυτήρων φαίνεται να προκαλεί διαταραχή που ευνοεί την ανάμιξη των αερίων και τον καλύτερο τοπικό λόγο αέρα καυσίμου.



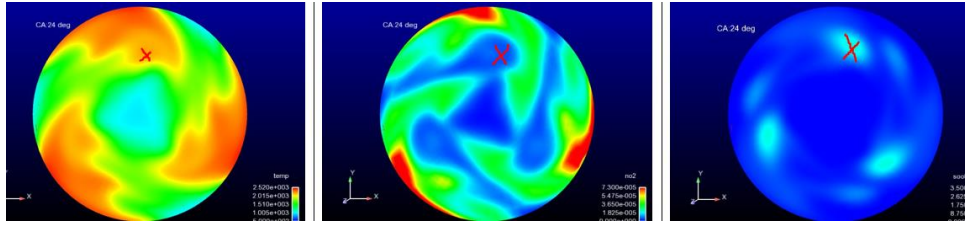
Εικόνα 86: Στιγμιότυπο CA=16 deg, φλόγα διάχυσης κινείται μαζί με το καύσιμο μίγμα

Στις 20 περίπου μοίρες οι δυο φλόγες ενώνονται και προσκρούουν στο τοίχωμα του κυλίνδρου. Παρατηρείται σε αυτό το σημείο, ότι το σημείο πρόσκρουσης της φλόγας στο απέναντι τοίχωμα είναι διαφορετικό από αυτό της πρόσκρουσης των άκαυστων σωματιδίων τη προέγχυσης. Ενώ τα άκαυστα σωματίδια επικάθονται λίγο πριν τον γειτονικό εγχυτήρα, η φλόγα προσκρούει μετά τον γειτονικό εγχυτήρα, λόγω της μεγαλύτερης στροβιλότητας που έχει δημιουργηθεί στο κύλινδρο εξαιτίας της καύσης. Η παραγωγή των NOx είναι μεγάλη καθώς πραγματοποιείται η κύρια καύση.



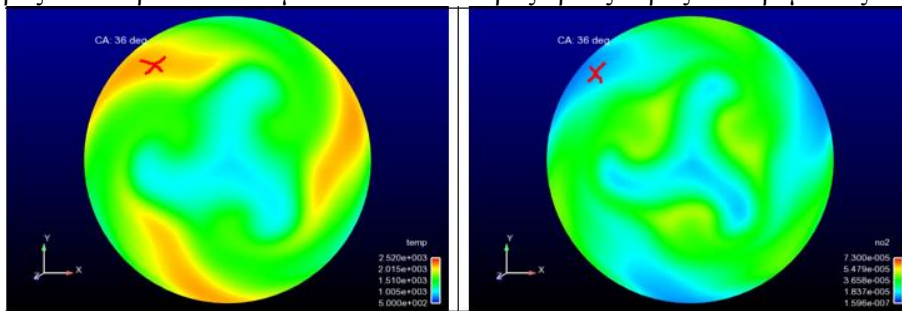
Εικόνα 87: Στιγμιότυπο CA=20, κύρια καύση

Στις 24 περίπου μοίρες και ενώ συμβαίνει η κύρια καύση, συμβαίνει και η μετέγχυση σε περιοχή υψηλής θερμοκρασίας αλλά σχετικά μακριά από την κύρια φλόγα. Σε αυτή την έγχυση, παρότι δεν παρατηρείται 'σβήσιμο' της φλόγας, μια πτώση της τοπικής θερμοκρασίας από την παρουσία άκαυστων σωματιδίων πάλι είναι αισθητή. Η περιοχή τη μετέγχυσης έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τη γύρω φλόγα, με αποτέλεσμα τη μηδενική παραγωγή NOx στο σημείο αυτό. Η παραγωγή των soot είναι αισθητά μικρότερη συγκρινόμενη με αυτή του κύριου παλμού, καθώς η μετέγχυση φαίνεται ότι δημιουργεί νέες δίνες ανάμειξης των αερίων στον κύλινδρο, πράγμα που φαίνεται και από τους χάρτες T-φ.

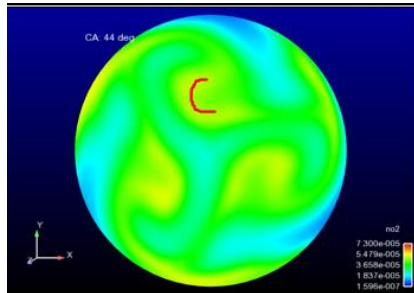


Εικόνα 88: Στιγμιότυπο CA=24deg, μετέγχιση και αναχαίτηση φλόγας

Στις επόμενες μοίρες τα σωματίδια αιθάλης οξειδώνονται, τα NOx διαχέονται σε όλο τον κύλινδρο και η καύση ολοκληρώνεται. Στην παρακάτω περιοχή ψηλής θερμοκρασίας δεν παράγεται σημαντική ποσότητα NOx, παρότι η θερμοκρασία είναι περίπου ~2000 K. Εικάζεται ότι αυτό συμβαίνει λόγω της έλλειψης οξυγόνου στην περιοχή, το οποίο παρεμποδίζεται από τα καυσαέρια. Τα NOx που φαίνονται στην τομή αυτή του θαλάμου έχουν ήδη παραχθεί και περιδινούνται εξαπλώνόμενα στο θάλαμο. Η περιδίνηση αυτή στο οριζόντιο επίπεδο φαίνεται να προκαλείται καθώς ζεστά καυσαέρια κατευθύνονται προς το κέντρο του θαλάμου όπου πυκνότερος κρύος αέρας τα παρεμποδίζει.



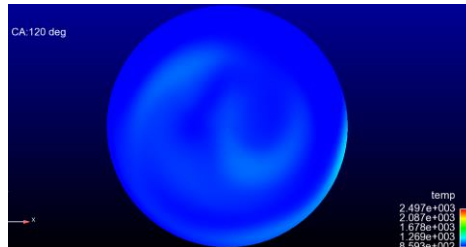
Εικόνα 89: Στιγμιότυπο CA=36 deg, επίκλιση σε χαμηλές θερμοκρασίες



Εικόνα 90: Στιγμιότυπο CA=44deg, στροβιλισμός και καύση σε χαμηλές θερμοκρασίες

Στις 52° κανένα κελί δε βρίσκεται σε συνθήκες παραγωγής NOx, ωστόσο τα NOx φαίνεται να αυξάνονται στο επίπεδο μελέτης, υποδηλώνοντας μια κατακόρυφη κίνηση των NOx και των λοιπών καυσαερίων των κατώτερων στρωμάτων στο επίπεδο μελέτης (tumble motion).

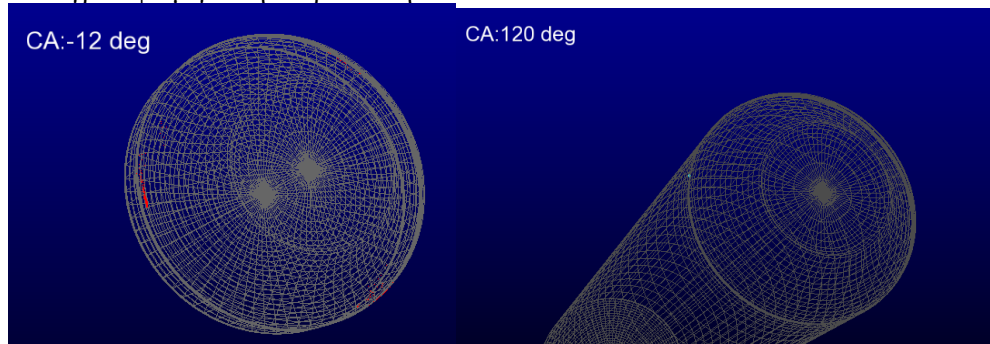
Προς το τέλος της καύσης φαίνεται και μια μικρή έκλυση θερμότητας από μέρος του υγρού φιλμ που καίγεται στα τοιχώματα:



Εικόνα 91: Στιγμιότυπο CA=120 deg, άνοιγμα θύρας εξαγωγής καυσαερίων

5.3.1.4.1. Επίδραση MR στην εμφάνιση Υγρού film

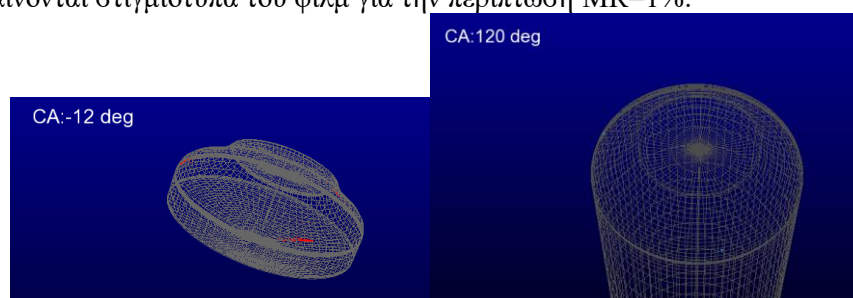
Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει επικάλυψη υγρού φιλμ σωματιδίων στα τοιχώματα του κυλίνδρου προερχόμενο από την αρκετά πρόωρη προέγχυση. Τα σωματίδια έχοντας μεγάλη ταχύτητα, δεν καίγονται στις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στον κύλινδρο διασχίζοντάς τον, και επικαθονται στην απέναντι μεριά του κυλίνδρου. Παρακάτω φαίνονται στιγμιότυπα του υγρού φιλμ για την περίπτωση $MR=0.5\%$:



Εικόνα 92: Υγρό φιλμ σωματιδίων στην αρχή και το πέρας της κύριας καύσης για $MR=0.5\%$

Από την οπτικοποίηση όλης της καύσης είναι σαφές ότι μέρος των σωματιδίων της προέγχυσης δεν καίγεται κατά τη διάρκεια της καύσης και παραμένει αναλλοίωτο στα τοιχώματα του κυλίνδρου μέχρι το τέλος της. Τα σωματίδια της κύριας έγχυσης και της μετέγχυσης, αντίθετα, καίγονται άμεσα και δεν προλαβαίνουν να επικαθίσουν στα τοιχώματα.

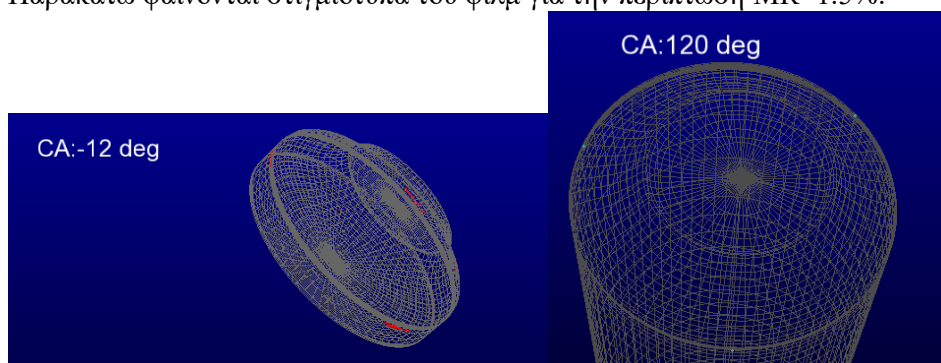
Παρακάτω φαίνονται στιγμιότυπα του φιλμ για την περίπτωση $MR=1\%$:



Εικόνα 93: Υγρό φιλμ σωματιδίων στην αρχή και το πέρας της κύριας καύσης για $MR=1\%$

Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι τα υγρά σωματίδια επικαθονται σε δύο μέρη του κυλίνδρου και ελαφρώς πιο ψηλά από το σημείο των εγχυτήρων. Παρότι θα περιμέναμε το φιλμ να βρίσκεται χαμηλότερα από τους εγχυτήρες, δεδομένου ότι οι εγχυτήρες ψεκάζουν το καύσιμο με γωνία προς τα κάτω, αυτό δε συμβαίνει και πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς το έμβολο ανέρχεται, δημιουργεί μεταφορά μάζας και αέρα προς τα πάνω παρασέρνοντας και τη μικρή μάζα καυσίμου προς τα πάνω.

Παρακάτω φαίνονται στιγμιότυπα του φιλμ για την περίπτωση $MR=1.5\%$:



Εικόνα 94: Υγρό φιλμ σωματιδίων στην αρχή και το πέρας της κύριας καύσης για $MR=1.5\%$

Φαίνεται ότι για αυτή την περίπτωση στο τέλος της έγχυσης μένουν άκαυστα σωματίδια σε τρία διαφορετικά σημεία του κυλίνδρου προερχόμενα και από τους τρεις εγχυτήρες.

Τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης ωστόσο δεν είναι αρκετά για να διεξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με το άκαυστο καύσιμο στον κύλινδρο. Παρότι φαίνεται από τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης ότι όσο μεγαλύτερη η μείωση μάζας τόσο μεγαλύτερη και η επικάλυψη στα τοιχώματα, στην πραγματικότητα συμβαίνει το αντίθετο, όπως πρέπει να αναμένουμε, δεδομένου ότι και τα αποτελέσματα της κατανάλωσης καυσίμου για μεγαλύτερη MR είναι καλύτερα. Ο αριθμός των σωματιδίων για τις τρεις περιπτώσεις σε CA=-28°, CA=-4° & 120° φαίνεται παρακάτω, όπως προκύπτει από τους φακέλους DPG του postprocessing, που περιέχει τον αριθμό των σταγονιδίων με τις συντεταγμένες τους κάθε μετρούμενη χρονική στιγμή:

| No. of Particles | CA=-28° | Total pilot particles(app) | CA=-4° initial film | CA=120° final film | initial film/ initial pn | final/ initial film | final/ Initial ‰ |
|------------------|---------|----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|------------------|
| MR=0.5% | 8407 | 5330038 | 739 | 77 | 0.0138% | 10.4% | 0.14 |
| MR=1% | n/a | 5383877 | 719 | 16 | 0.0133% | 2.2% | 0.03 |
| MR=1.5% | n/a | 5411206 | 600 | 11 | 0.0111% | 1.8% | 0.02 |

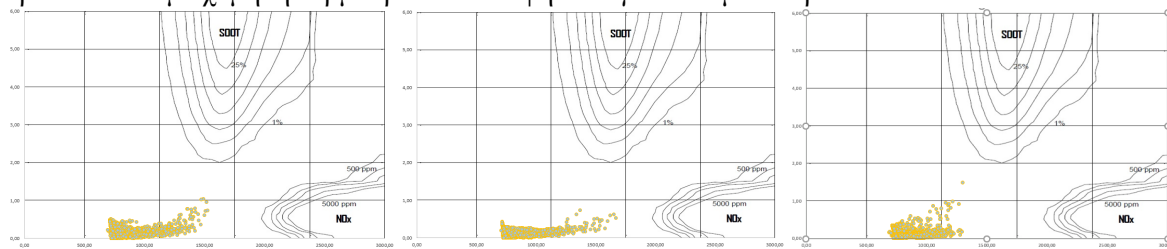
Στον παραπάνω πίνακα ο αρχικός ολικός αριθμός των σταγονιδίων της έγχυσης είναι προσεγγιστικός. Υπενθυμίζεται ότι η ποσότητα των σταγονιδίων που εγχέονται κάθε στιγμή και η διάμετρος τους προκύπτει από συνάρτηση τυχειότητας με ίδιο κέντρο σύγκλισης. Θεωρούμε ότι κάθε $dt=10^{-6}$ και όσο διαρκεί η πιλοτική έγχυση, εγχέεται αριθμός σωματιδίων όσα και στο χρονικό παράθυρο -28°, δηλαδή 8407 σωματίδια. Ο συνολικός αριθμός σωματιδίων που εγχέεται καθ' όλη την πιλοτική έγχυση ολοκληρώνεται στο χρονικό διάστημα Δt που διαρκεί η πιλοτική έγχυση. Για την περίπτωση MR=0.5%, θεωρούμε ότι η πιλοτική έγχυση διαρκεί περίπου 4°, οι οποίες διανύονται σε συνολικό χρόνο περίπου $4 \cdot 60 / (360 \cdot 195) = 6.34 \cdot 10^{-6}$ sec. Επομένως 8407 σωματίδια εγχέονται $6.34 \cdot 10^{-4} / 10^{-6}$ φορές στο χρονικό διάστημα της πιλοτικής έγχυσης, άρα εγχέονται συνολικά περίπου $634 \cdot 8407 = 5330038$ σωματίδια. Για μείωση μάζας MR=1% & 1.5% η ποσότητα των συνολικά εγχόμενων σωματιδίων μειώνεται αντίστοιχα με τη συνολική μείωση μάζας. Σε γωνία στροφάλου θεωρείται ότι η καύση της πιλοτικής έχει τελειώσει και η έγχυση της κύριας δεν έχει αρχίσει, επομένως τα συνολικά σωματίδια που υπάρχουν στο θάλαμο, είναι και αυτά που έχουν επικαθίσει στα τοιχώματα σχηματίζοντας το αρχικό φιλμ. Αντίστοιχα, ο αριθμός των σωματιδίων που υπάρχουν στο θάλαμο σε γωνία 120° είναι το τελικό άκαυστο φιλμ.

Είναι σαφές ότι μεγαλύτερη μείωση καυσίμου επιφέρει μικρότερο ποσό άκαυστων σωματιδίων στο θάλαμο καύσης. Αν θεωρήσουμε προσεγγιστικά ότι στις -4° σχεδόν όλα τα άκαυστα σωματίδια έχουν σχηματίσει το υγρό φιλμ στα τοιχώματα του κυλίνδρου, συμπεραίνουμε από το ποσοστό (initial film prt no.) / (initial prt No.) ότι όσο μεγαλύτερη η MR, όσο μικρότερη δηλαδή η μάζα της προέγχυσης, τόσο μικρότερο είναι και το ποσοστό των σωματιδίων που επικαθόνται στα τοιχώματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη η μάζα του καυσίμου που εγχύεται, τόσο μεγαλύτερος και ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων που εξέρχονται από τον κάθε εγχυτήρα και τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα των ύστερων σωματιδίων, τα οποία δε βρίσκουν μεγάλη αντίσταση αέρα κατά το ταξίδι τους στον κύλινδρο, αφού τα προπορευόμενα σωματίδια έχουν δημιουργήσει για αυτά τους αεροδιαδρόμους χαμηλότερης αντίστασης. Αυτό έχει σαν συνέπεια περισσότερα σωματίδια να φτάνουν γρηγορότερα στο απέναντι τοίχωμα σχηματίζοντας πιο γρήγορα το υγρό φιλμ, απ ό,τι σχηματίζει μια έγχυση μικρότερης μάζας, της οποίας τα σωματίδια κινούνται στο σύνολό τους πιο αργά. Μάλιστα, η μεγαλύτερη μάζα προέγχυσης και η μεγαλύτερη ταχύτητα των σωματιδίων έχει σαν αποτέλεσμα πιθανώς και τη δημιουργία πιο πυκνού φιλμ, συγκεντρωμένου σε μικρότερη επιφάνεια του τοιχώματος. Αυτό φαίνεται και από την οπτικοποίηση, αφού η μεγαλύτερη μάζα προέγχυσης δημιουργεί ένα τελικό παχύ και άκαυστο φιλμ σε αντίθεση με τις μικρότερες μάζες προέγχυσης που δημιουργούν πιο λεπτά και 'απλωμένα' φιλμ, τα οποία καίγονται πιο εύκολα, όπως φαίνεται και από το λόγο τελικού φιλμ προς αρχικό.

5.3.1.4.2. Επίδραση MR στην πιλοτική έγχυση

Μελετώντας τους χάρτες T-φ στις -16°, όταν δηλαδή έχουν τελειώσει όλες οι πιλοτικές εγχύσεις παρατηρείται ότι η περίπτωση MR=0.5% εμφανίζει αρκετά κελιά με σχετικά υψηλή θερμοκρασία και

υψηλή αναλογία καυσίμου-αέρα, η περίπτωση $MR=1\%$ εμφανίζει αρκετά κελιά με υψηλή θερμοκρασία και σχετικά χαμηλή αναλογία καυσίμου-αέρα, ενώ η περίπτωση μεγαλύτερης μείωσης μάζας εμφανίζει αρκετά κελιά με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλό λόγο καυσίμου-αέρα:



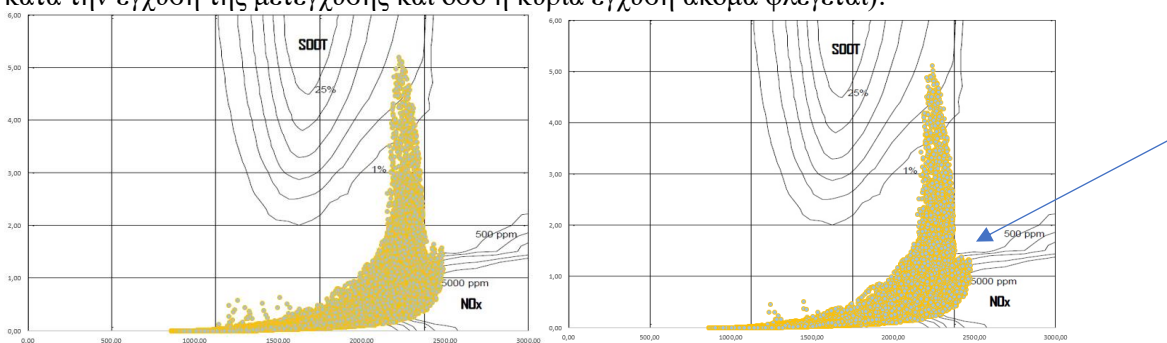
Εικόνα 95: Χάρτες T-φ για $MR=0.5\%$, 1% , 1.5% αντίστοιχα στις -16°

Δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη ρευστομηχανική κατάσταση στο θάλαμο, καθώς οι διαφορές στους χάρτες οφείλονται κυρίως στο διαφορετικό πέρας της πιλοτικής έγχυσης. Πιο πολύ θα μπορούσαμε να κρίνουμε τους παραπάνω χάρτες σαν αλληλουχία στιγμιότυπων, οπότε κατά το πέρας της έγχυσης αρχικά τα κελιά έχουν ψηλούς λόγους αέρα-καυσίμου, στη συνέχεια με την καλύτερη ανάμειξή τους, ο λόγος καυσίμου-αέρα μειώνεται ενώ αυξάνεται η θερμοκρασία πολλών κελιών λόγω της καύσης, και τέλος, η θερμοκρασία μειώνεται διασκορπιζόμενη στο θάλαμο και τα άκαυστα σωματίδια συσσωρεύονται και είτε σχηματίζουν soot, είτε επικάθονται στα τοιχώματα.

Πολύ κοντά στην κύρια έγχυση παρατηρούμε ότι οι πιλοτικές εγχύσεις με μεγαλύτερη μάζα έχουν δημιουργήσει περισσότερα κελιά με αυξημένη θερμοκρασία, ενώ οι πιλοτικές με μικρότερη μάζα δημιουργούν πιο πολλά soot και άκαυστο καύσιμο. Φαίνεται λοιπόν, ότι μικρότερες πιλοτικές εγχύσεις δεν καίγονται τόσο εύκολα, πιθανώς λόγω του φαινομένου της ψυχρής φλόγας. Οι καύσεις της πιλοτικής έγχυσης και η εκλυόμενη θερμότητα δεν είναι αρκετή να υπερνικήσει τις απώλειες τοιχωμάτων και τελικά η πιλοτική έγχυση καθυστερεί να καεί. Αντίθετα, μεγαλύτερη πιλοτική έγχυση (μικρότερη MR) φαίνεται να έχει μεγαλύτερο ποσοστό καύσης.

5.3.1.4.3. Επίδραση MR στην κύρια έγχυση

Στην καύση της κύριας έγχυσης δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές για διαφορετικές τιμές μείωσης μάζας. Αυτό που ίσως μπορούμε να επισημάνουμε είναι η ελαφρώς μειωμένη αναλογία καυσίμου-αέρα στην περίπτωση $MR=1.5\%$ για ψηλές θερμοκρασίες περίπου στις $16^\circ \sim 20^\circ$ (πριν και κατά την έγχυση της μετέγχυσης και όσο η κύρια έγχυση ακόμα φλέγεται):



Εικόνα 96: Πίνακες T-φ για $MR=1\%$, 1.5% αντίστοιχα για $CA=160$

Αυτό πιθανότατα οφείλεται πάλι στην πρόωρη παύση της κύριας έγχυσης, οπότε σε ίδιες γωνίες το καύσιμο έχει προλάβει να αναμειχθεί καλύτερα ή να καεί.

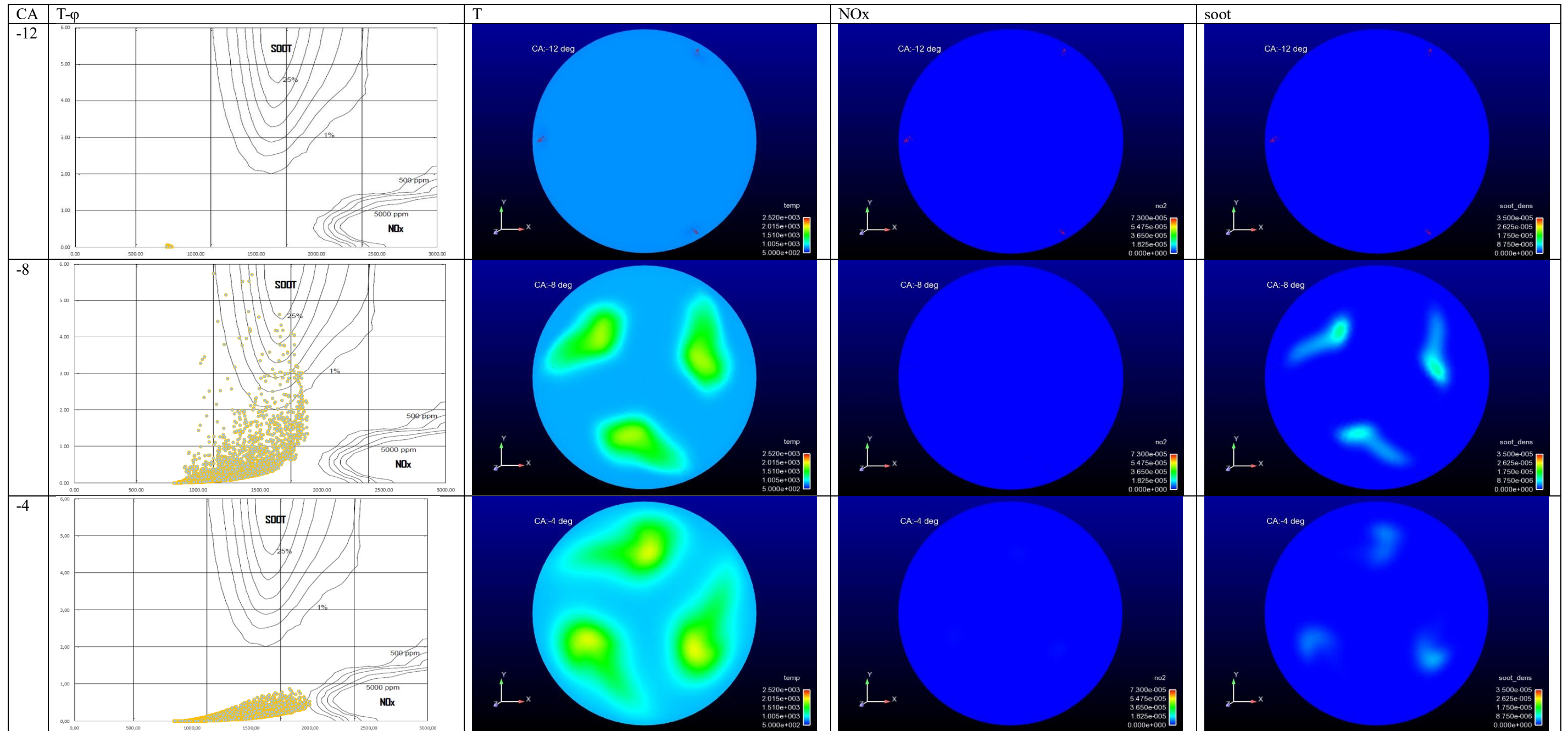
5.3.1.4.4. Επίδραση MR στη μετέγχυση

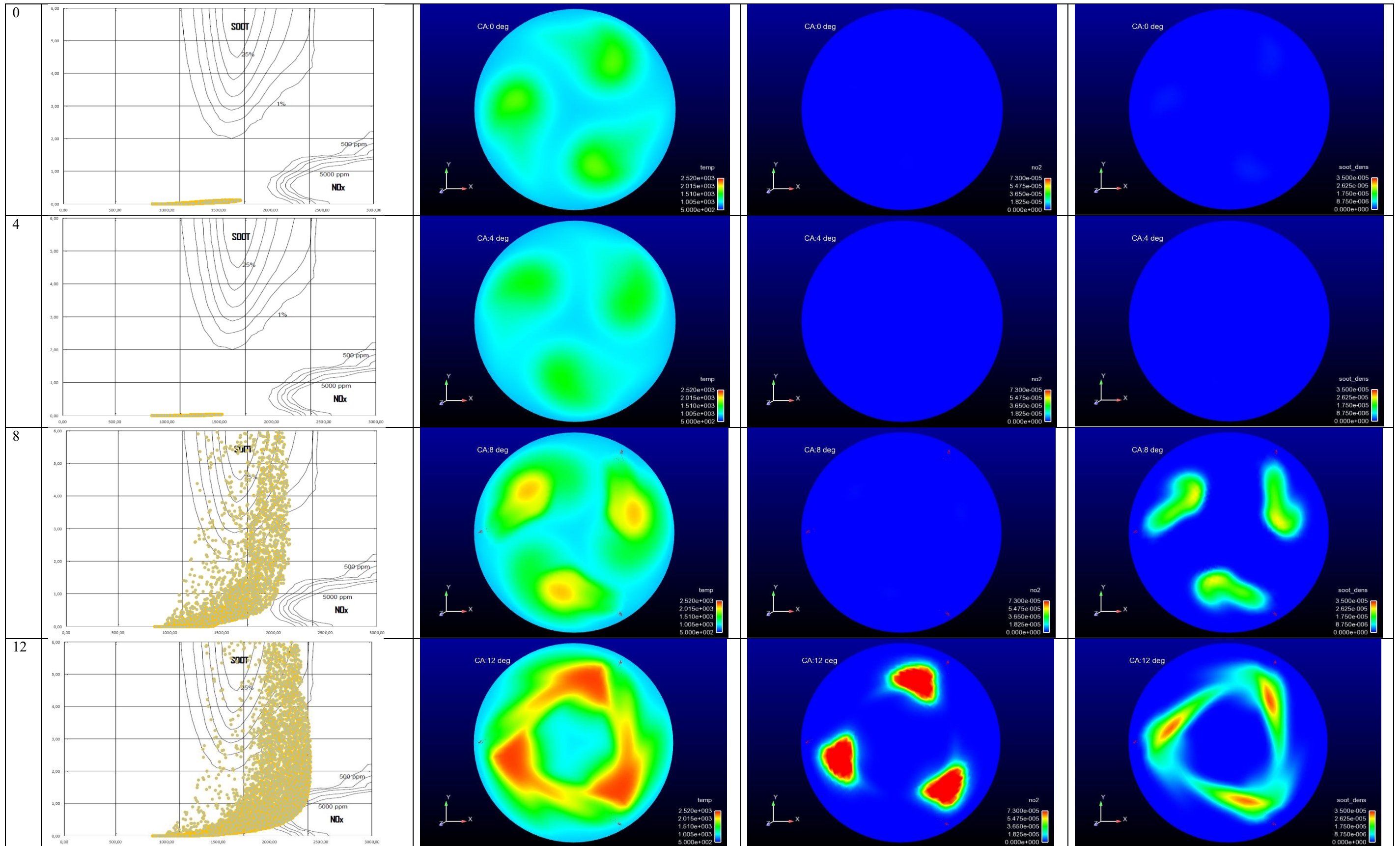
Η καύση της μετέγχυσης επίσης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές. Τα στιγμιότυπα στις 24° φαίνονται πανομοιότυπα για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό δείχνει ότι παρόλο που η μετέγχυση με μεγάλο MR εγχέεται πιο νωρίς, εν τέλει καταλήγει να καίγεται όμοια με τις άλλες περιπτώσεις. Φαίνεται επομένως ότι η μετέγχυση μειωμένης μάζας καίγεται πιο αργά. Αυτό είναι αρκετά περίεργο, δεδομένου ότι η έγχυση της μετέγχυσης μικρότερης μάζας συμβαίνει σε ψηλότερες θερμοκρασίες, άρα θα περίμενε

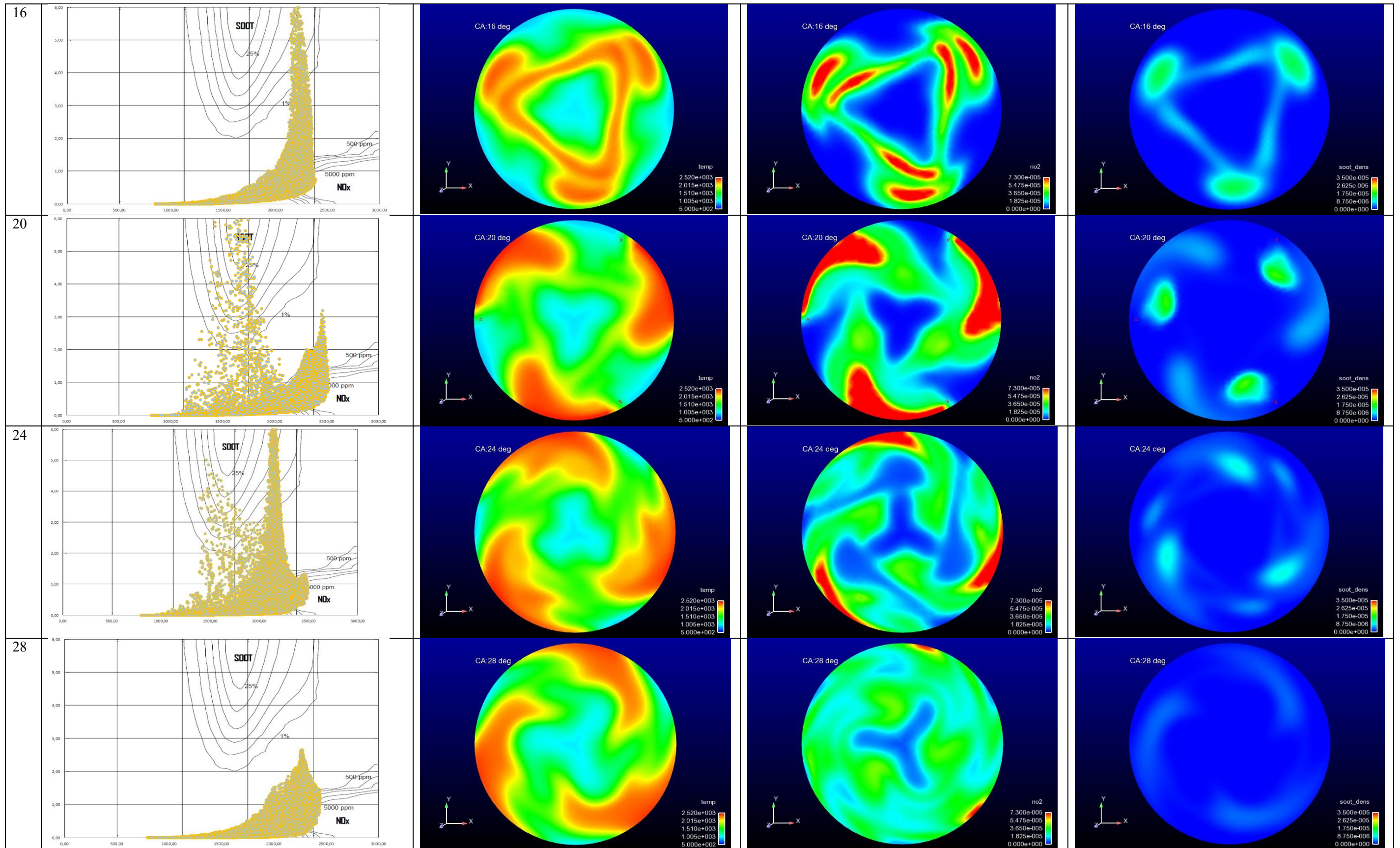
κανείς και η καύση της να είναι πιο γρήγορη. Εικάζεται συνεπώς ότι η αιτία μικρής καθυστέρησης της καύσης της οφείλεται στη ρευστομηχανική του θαλάμου, και στην ελαφρώς μειωμένη ταχύτητα των σωματιδίων, λόγω του μικρότερου αριθμού τους. Η καθυστέρηση της καύσης της μετέγχυσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη για μεγάλο MR, με αποτέλεσμα τελικά η μετέγχυση να καίγεται περίπου στις ίδιες μίξεις για όλες τις περιπτώσεις.

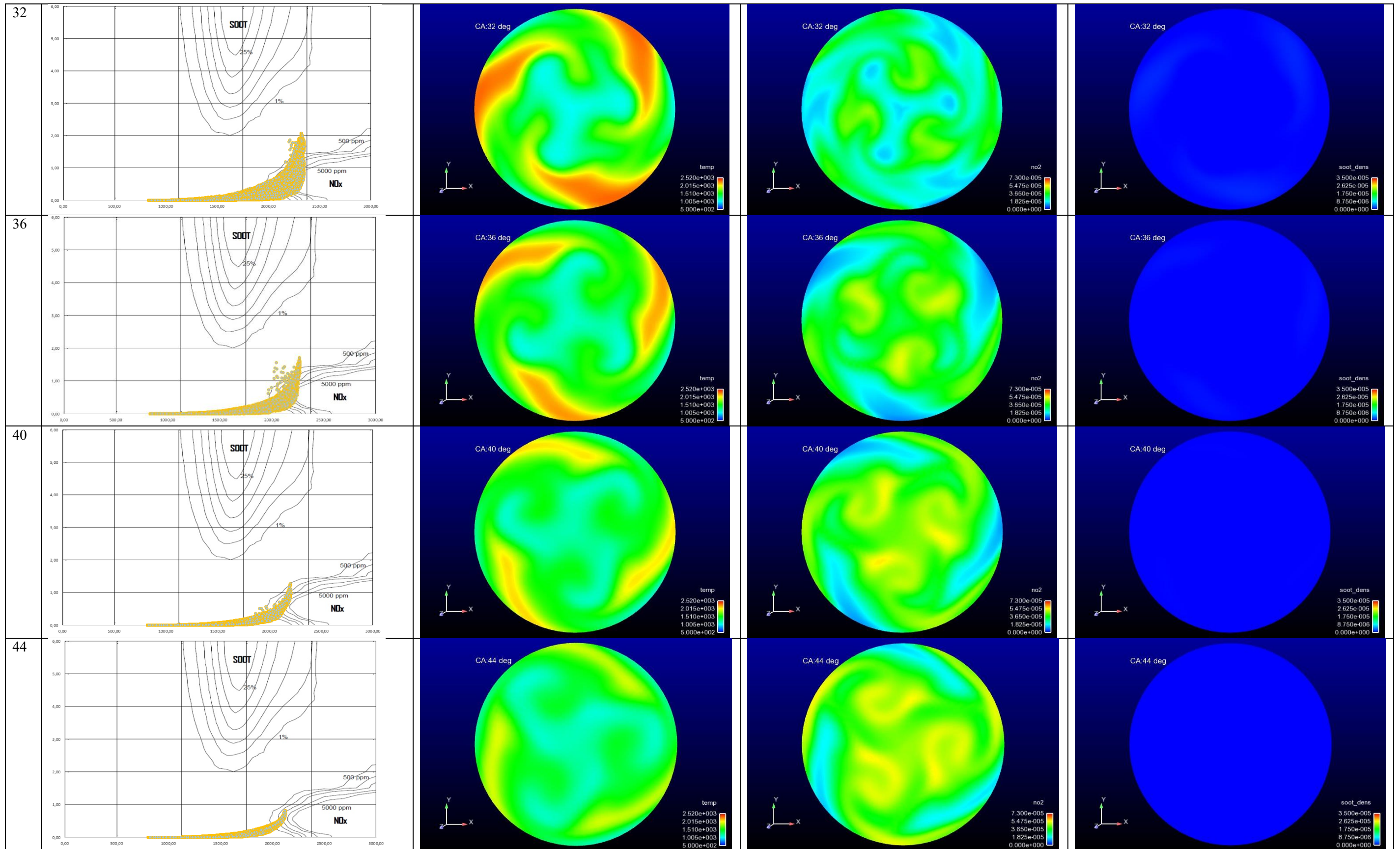
5.3.2. Οπτικοποίηση παλμού με πιλοτική έγχυση H

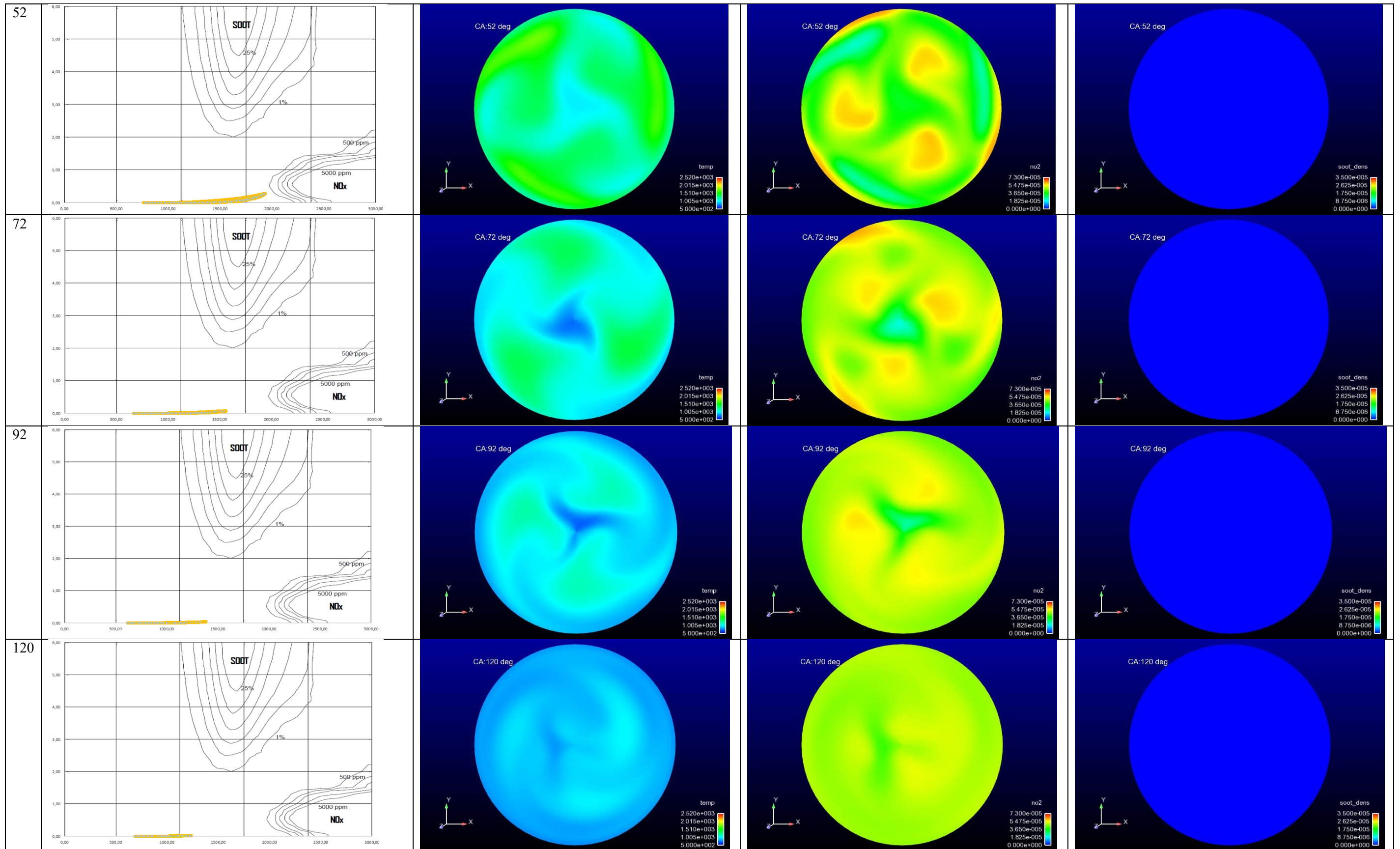
5.3.2.1. Οπτικοποίηση έγχυσης H0.5 (PiMF,SPil,SOI,GAP, PoMF, MR)=(11.6%,-12.4°,4.1°,24.636%,3.7°,0.5%)



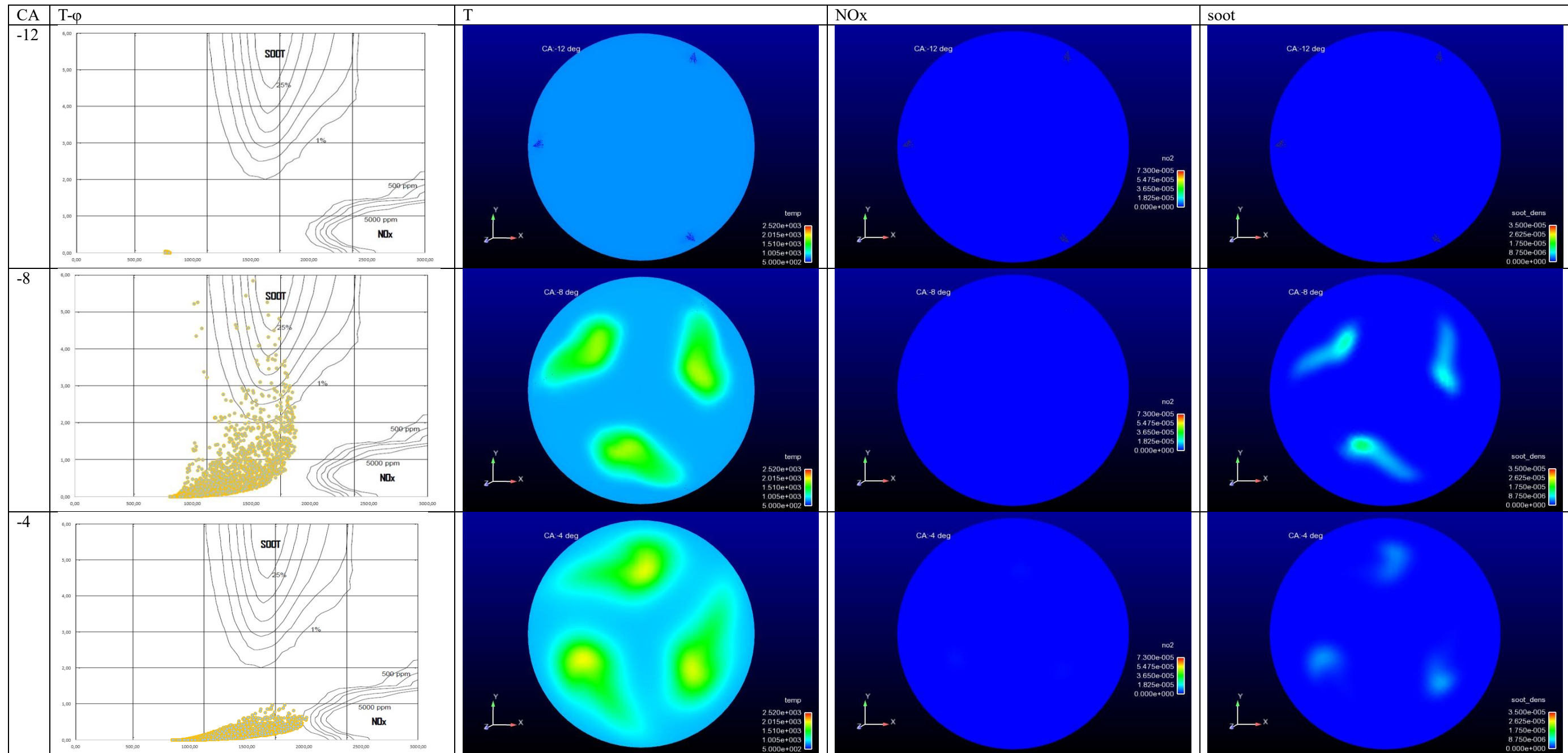


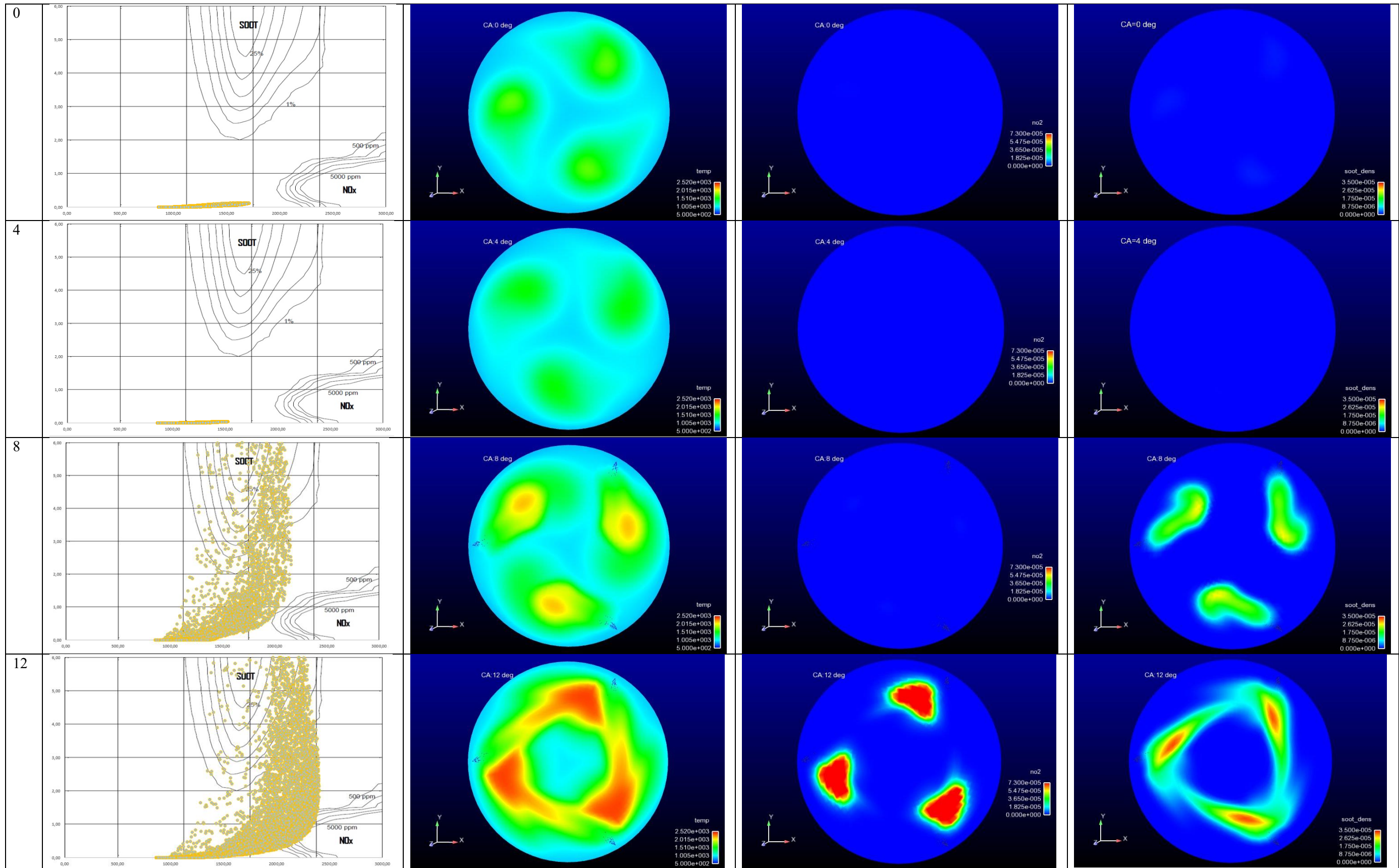


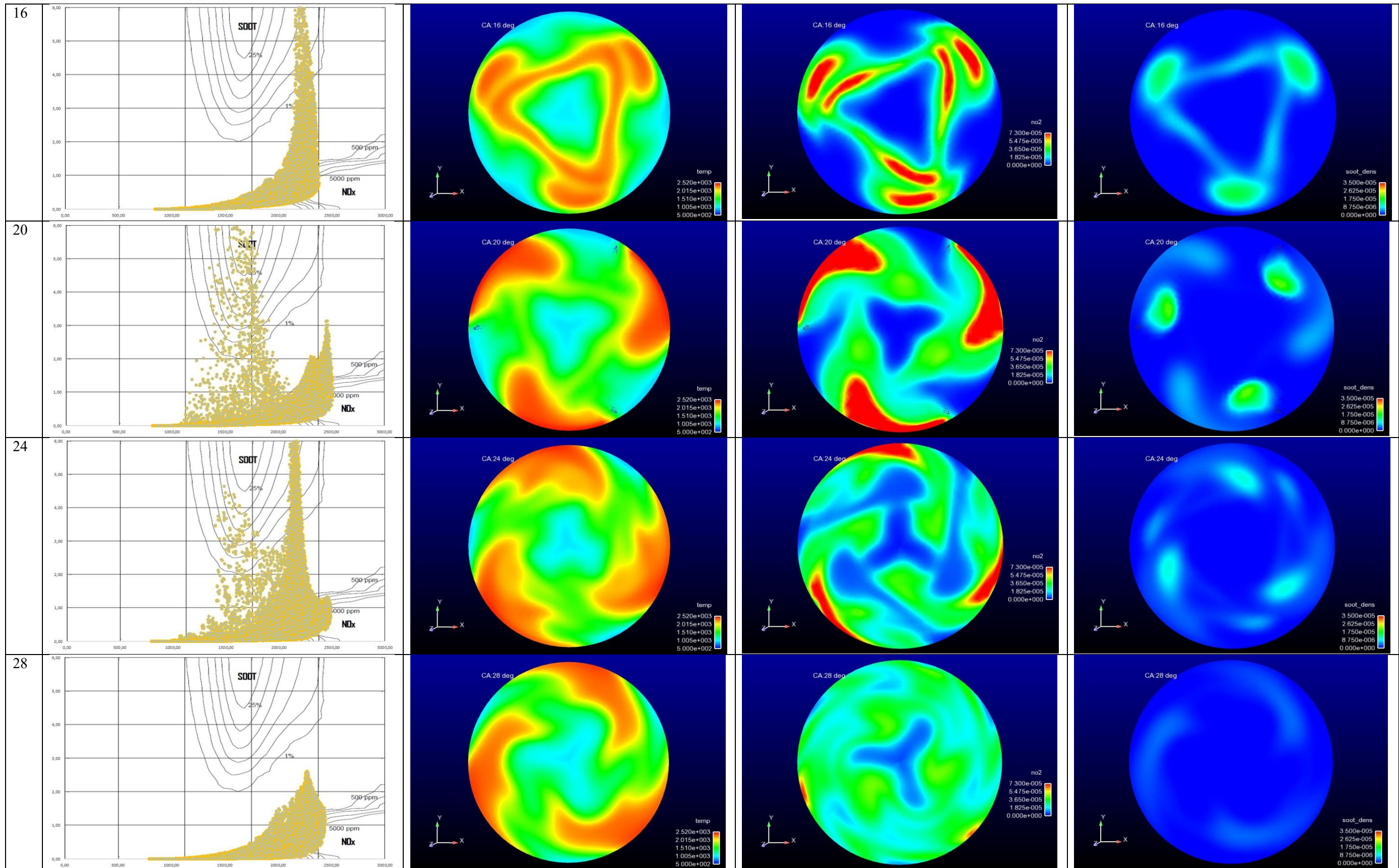


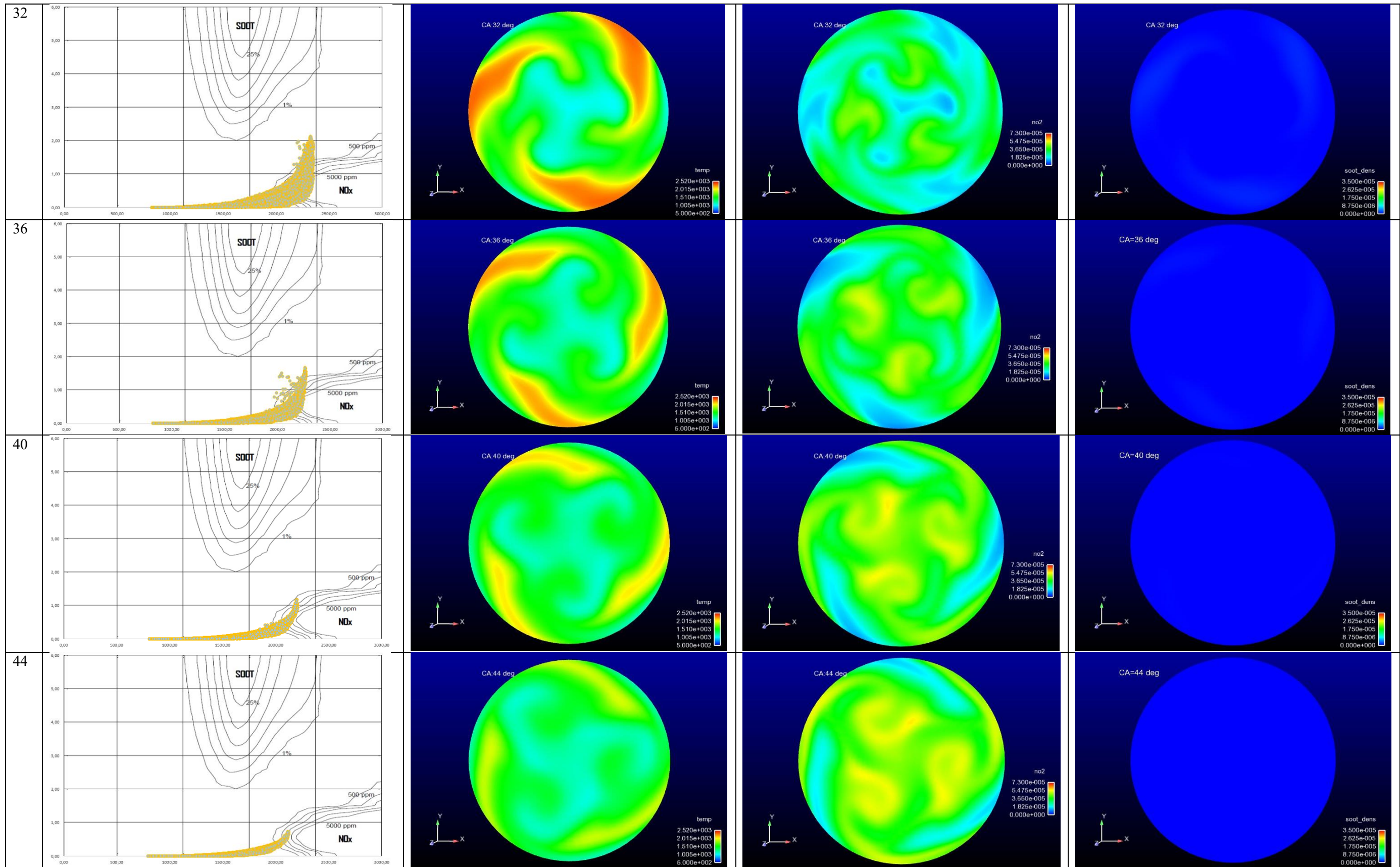


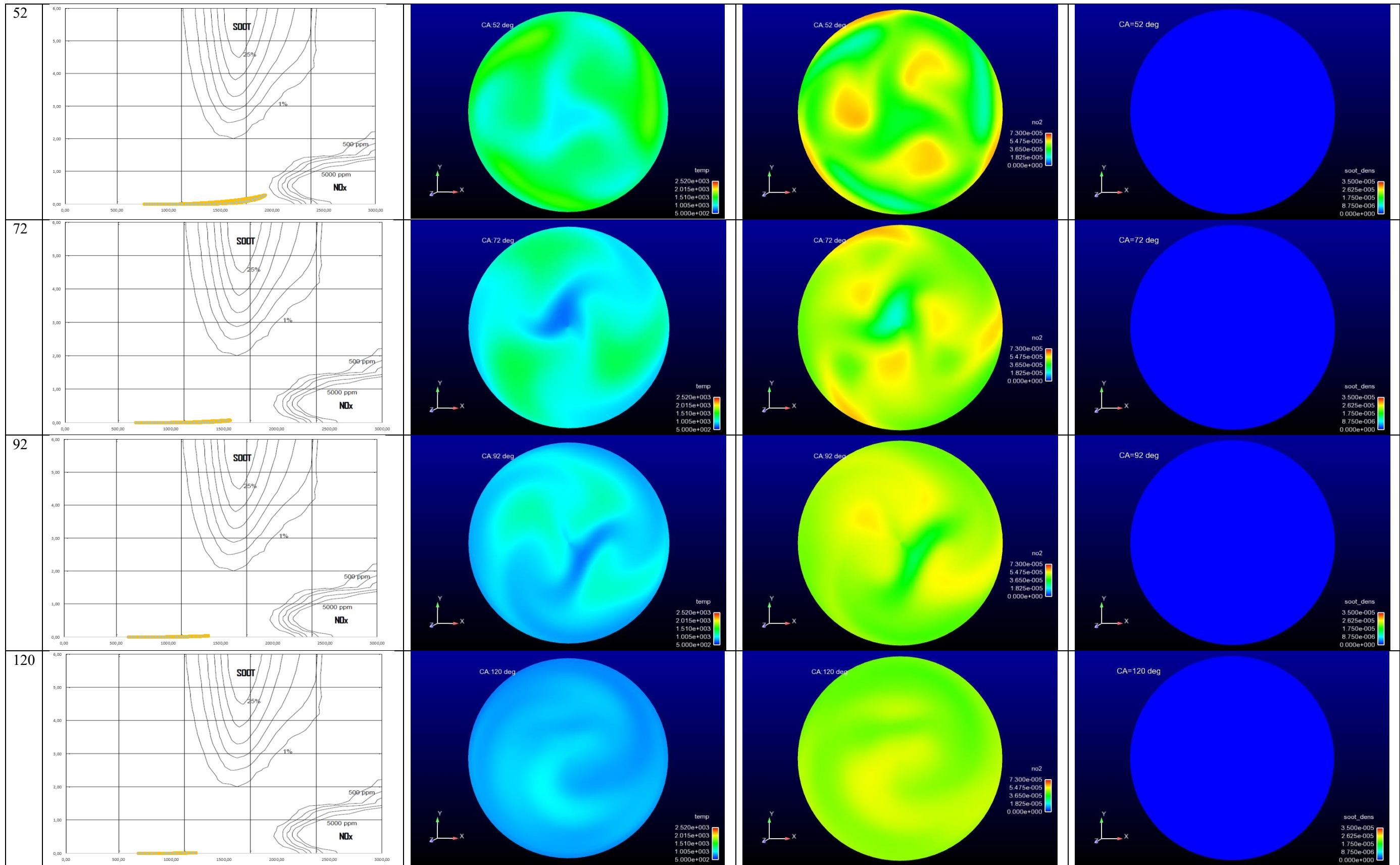
5.3.2.2. Οπτικοποίηση έγχυσης H1 (PiMF,SPiI,SOI,GAP, PoMF, MR)=(11.6%,-12.4°,4.1°,24.636%,3.7°,1%)





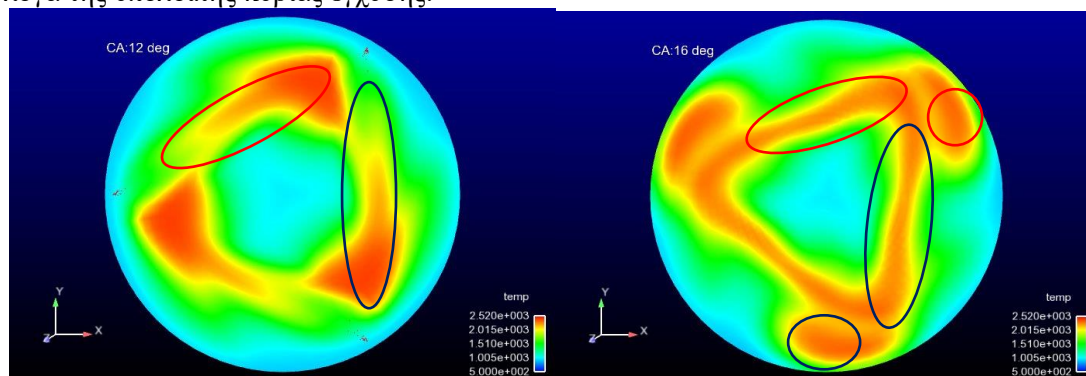






5.3.2.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μείωσης μάζας MR για πιλοτική έγχυση H

Στην οπτικοποίηση του θαλάμου παρατηρούνται περίπου τα ίδια θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά καύσης με την περίπτωση πιλοτικής έγχυσης C. Η καύση της πιλοτικής έγχυσης ολοκληρώνεται χωρίς την εμφανή δημιουργία NOx, και με σχετικά ψηλές θερμοκρασίες. Η κύρια έγχυση εγχέεται στη περιοχή αυξημένης θερμοκρασίας της πιλοτικής έγχυσης και αναφλέγεται άμεσα. Όταν το μέτωπο της φλόγας περνάει μπροστά από το γειτονικό εγχυτήρα, η καύση παρεμποδίζεται από το υγρό καύσιμο που εγχέεται ακόμα και παρασύρεται προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου όπου και φλέγεται μακριά από τη φλόγα της υπόλοιπης κύριας έγχυσης:



Εικόνα 97: Στιγμιότυπα 12° και 16° κύριας καύσης με πιλοτική έγχυση H

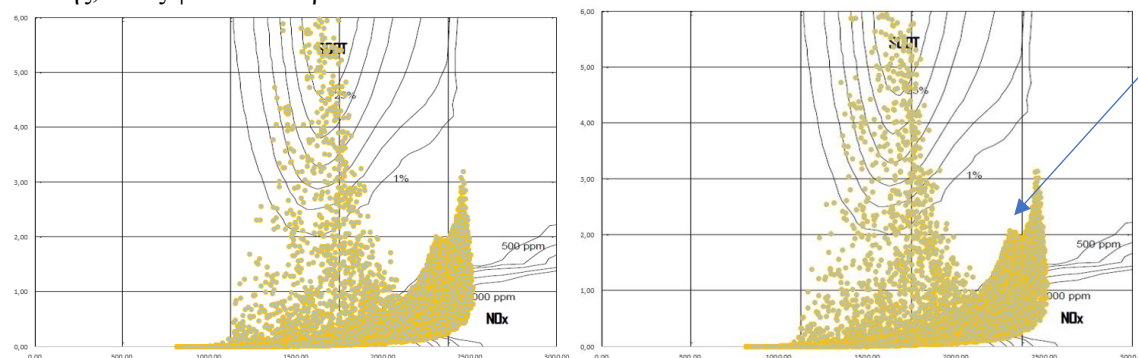
Στις 20° περίπου συμβαίνει και η μετέγχυση, η οποία εγχέεται σε περιοχή ελαφρώς αυξημένης θερμοκρασίας, αλλά όχι κατευθείαν στη φλόγα της κύριας έγχυσης. Για το λόγο αυτό παρατηρείται και μια μικρή παραγωγή soot. Καθώς το σπρέι έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από τη φλόγα, τελικά το σπρέι της μετέγχυσης τροφοδοτεί την κύρια φλόγα, αλλά δεν τη σβήνει, καθώς έχει περάσει ο απαραίτητος χρόνος προετοιμασίας του μίγματος για ανάφλεξη. Οι θερμοκρασίες δεν αυξάνονται πολύ παραπάνω με τον παλμό της μετέγχυσης, καθώς το καύσιμο διασκορπίζεται καλύτερα στο θάλαμο και καίγεται σε περιοχές με χαμηλότερη θερμοκρασία. Μέχρι το τέλος του κύκλου συνεχίζεται η καύση και η έκλυση θερμότητας.

5.3.2.3.1. Επίδραση MR στην πιλοτική έγχυση

Η μείωση της μάζας της πιλοτικής έγχυσης δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στην καύση της. Μέχρι τις 4° οι χάρτες T-φ είναι πανομοιότυποι.

5.3.2.3.2. Επίδραση MR στην κύρια έγχυση

Στις 4 μοίρες έχει ξεκινήσει να εμφανίζεται η φλόγα της κύριας έγχυσης και για τις δύο περιπτώσεις. Κάποια διαφορά στην καθυστέρηση ή επιτάχυνση έναυσης λόγω της μειωμένης μάζας πιλοτικής έγχυσης δεν παρατηρείται στους χάρτες ή το θάλαμο καύσης. Μέχρι τις 16°, οι χάρτες είναι πανομοιότυποι. Στις 20° περίπου παρατηρείται μια αμυδρή διαφοροποίηση στη φλόγα της κύριας καύσης, όπως φαίνεται παρακάτω:

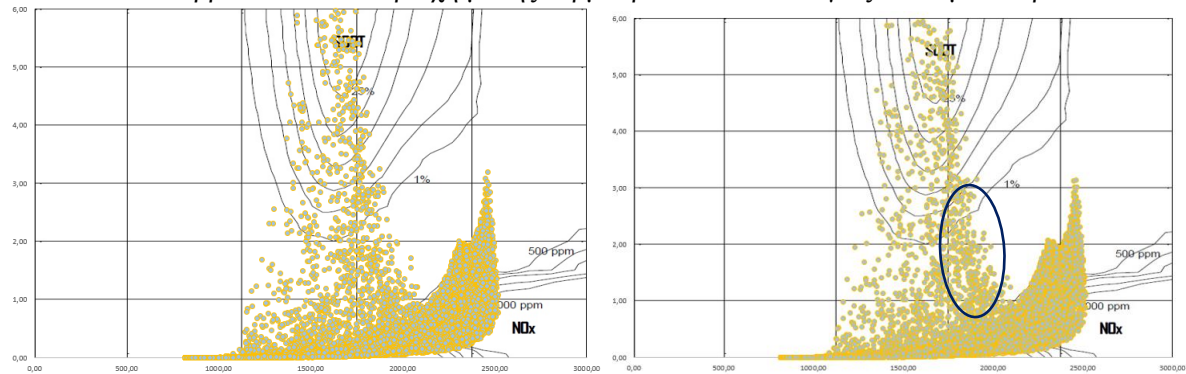


Εικόνα 98: Χάρτες T-φ για πιλοτική έγχυση H με MR=0.5%, 1% στις CA=20° της κύριας έγχυσης

Για την ίδια γωνία φαίνεται ότι μέρος των καϊόμενων σωματιδίων της κύριας έγχυσης βρίσκεται σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας. Καθώς η κύρια καύση είναι η ίδια, το γεγονός ότι τερματίζει νωρίτερα λόγω της μείωσης ποσότητας εγγεόμενου καυσίμου, οδηγεί και στη γρηγορότερη πτώση της θερμοκρασίας των κελιών της καύσης, άρα και σε μειωμένα NOx, αποδεικνύοντας την υπόθεση ότι τα NOx μειώνονται με τη μείωση της μάζας καυσίμου εξαιτίας της νωρίτερης περάτωσης της κύριας καύσης.

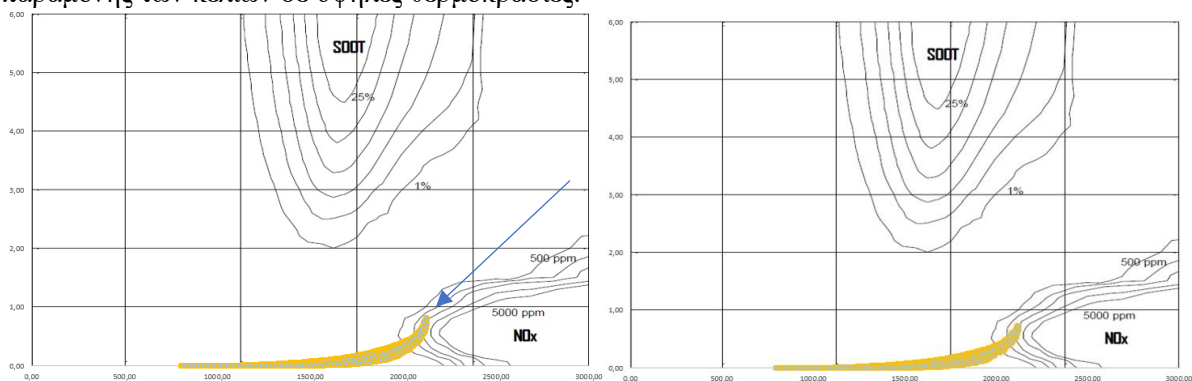
5.3.2.3.3. Επίδραση MR στη μετέγχυση

Στις 20° περίπου, που συμβαίνει η μετέγχυση παρατηρείται μια πολύ μικρή αύξηση της πυκνότητας των κελιών που βρίσκονται σε περιοχή μέσης θερμοκρασία και αναλογίας καυσίμου-αέρα:



Εικόνα 99: Χάρτες T-φ για πιλοτική έγχυση H με MR=0.5%, 1% στις CA=20° της μετέγχυσης

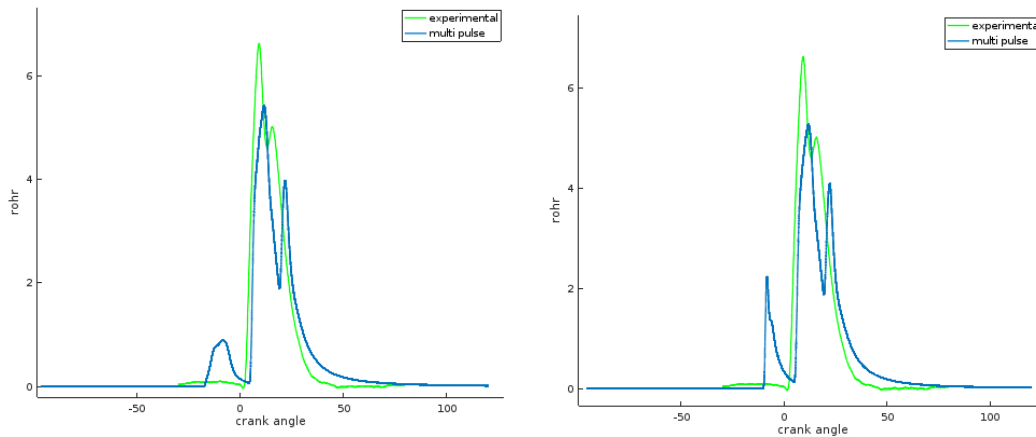
Αυτό καταδεικνύει πιθανότατα ότι η μετέγχυση, που συνέβη νωρίτερα για μειωμένη μάζα, έχει ήδη αρχίσει να εκλύει θερμότητα και να αυξάνει τη θερμοκρασία των κελιών. Η μετέγχυση συνεπώς, εγγέεται και ξεκινάει να καίγεται νωρίτερα για μικρότερες μάζες έγχυσης. Στις επόμενες μοίρες οι χάρτες φαίνονται πανομοιότυποι. Στις 44° φαίνεται μια ελαφριά υποχώρηση των κελιών υψηλής θερμοκρασίας, που επίσης αποδεικνύει ότι η μειωμένη μάζα έγχυσης οδηγεί και σε μειωμένο χρόνο παραμονής των κελιών σε υψηλές θερμοκρασίες:



Εικόνα 100: Χάρτες T-φ για πιλοτική έγχυση H με MR=0.5%, 1% στις CA=44°

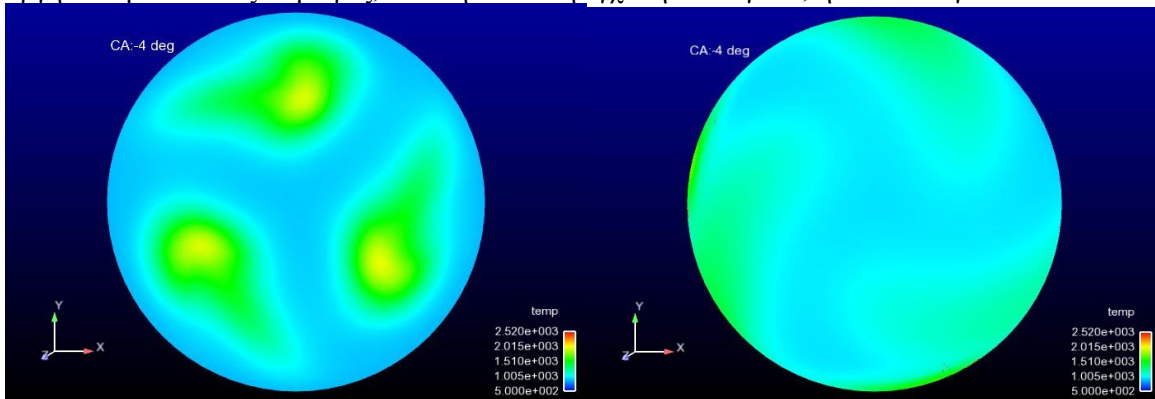
5.3.3. Σύγκριση περιπτώσεων πιλοτικής έγχυσης H & C

Βασική διαφορά των δύο πιλοτικών εγχύσεων είναι ότι η πιλοτική έγχυση C συμβαίνει τόσο νωρίς ώστε παρατηρείται επικάλυψη υγρού καυσίμου στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Η επικάλυψη αυτή, όπως αναφέραμε αυξάνει την ειδική κατανάλωση, εφόσον δεν καεί και κατά τη διάρκεια του κύκλου, και καταπονεί θερμικά τη μηχανή. Γενικότερα, η νωρίτερη πιλοτική έγχυση αργεί πάρα πολύ να καεί και μέρος της συνεχίζει να καίγεται ακόμα και κατά την έγχυση της κύριας. Αντίθετα, η αργότερη πιλοτική έγχυση καίγεται με πολύ μικρή καθυστέρηση και μέχρι την έναρξη της κύριας έχει καεί ολόκληρη. Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα ROHR των δύο περιπτώσεων, όπου παρότι έχουν περίπου ίδιες μάζες, η ύστερη πιλοτική καίγεται πολύ πιο απότομα και συντομότερα.



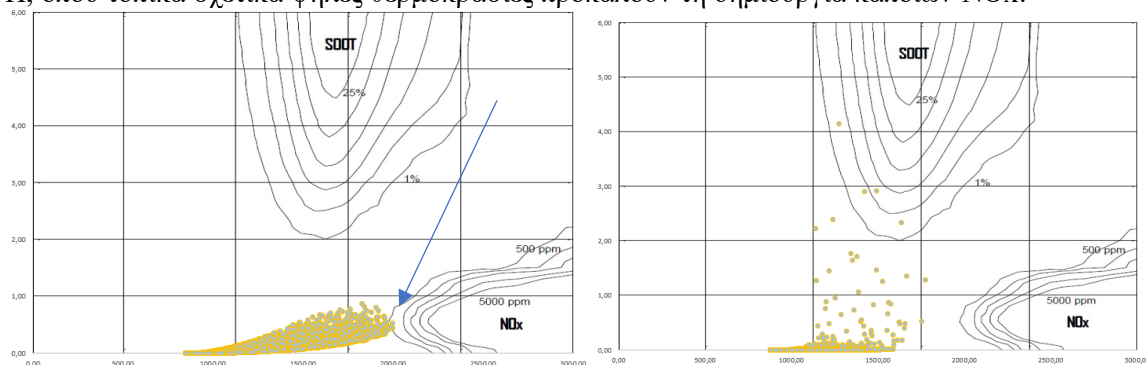
Εικόνα 101: Διαγράμματα ειδικής έκλυσης θερμότητας για περίπτωση C & H

Από τους χάρτες T-φ, τα παραπάνω είναι επίσης εμφανή. Στην περίπτωση H, η πιλοτική έγχυση ξεκινάει στις -12.4° και στις -8° έχει ήδη αρχίσει να καίγεται με έντονη έκλυση θερμότητας και αυξάνοντας τοπικά τη θερμοκρασία. Αντίθετα, η πιλοτική C εγχέεται στις -31° και στις -16° υπάρχει κάποια αύξηση της θερμοκρασίας κάποιων κελίων. Η καύση δηλαδή ξεκινάει πολλές μοίρες μετά και είναι εξαιρετικά αργή. Ακόμα και στις -4 μοίρες, όπου η πιλοτική έγχυση H καίγεται, η C δεν καίγεται.:



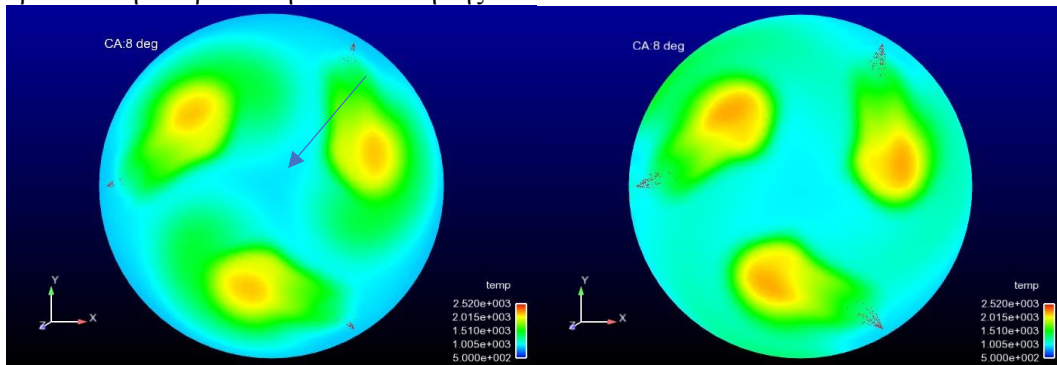
Εικόνα 102: Στιγμιότυπο $CA = -4^\circ$ για πιλοτικές εγχύσεις H και C αντίστοιχα

Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι τα σωματίδια της C έχουν αναμιχθεί καλά με τον αέρα της καύσης και έχουν διασκορπιστεί στο θάλαμο. Αυτό σημαίνει ότι αφενός δεν έχουν μεγάλη ταχύτητα που θα τα βοηθήσει να εξατμιστούν και να αναφλεγούν και αφετέρου η καύση του ενός σωματιδίου δεν μεταδίδει τη θερμότητά του σε άλλο προκειμένου να υποβοηθήσει τη μεταφορά της φλόγας. Έτσι, τα σωματίδια καίγονται μεμονωμένα και κάποια δεν καταφέρνουν καν να αναφλεγούν λόγω χαμηλών τοπικών θερμοκρασιών. Η συμπεριφορά αυτή έχει καλές συνέπειες και για την ειδική κατανάλωση και για τα NOx. Όσο η πρόωγη προέγχυση αργεί να αποδώσει έργο, τόσο πιο κοντά στο ANΣ θα αποδοθεί αυτό. Με την πιλοτική έγχυση C δεν παρατηρείται παραγωγή οξειδίων, σε αντίθεση με την πιλοτική H, όπου τοπικά σχετικά ψηλές θερμοκρασίες προκαλούν τη δημιουργία κάποιων NOx:



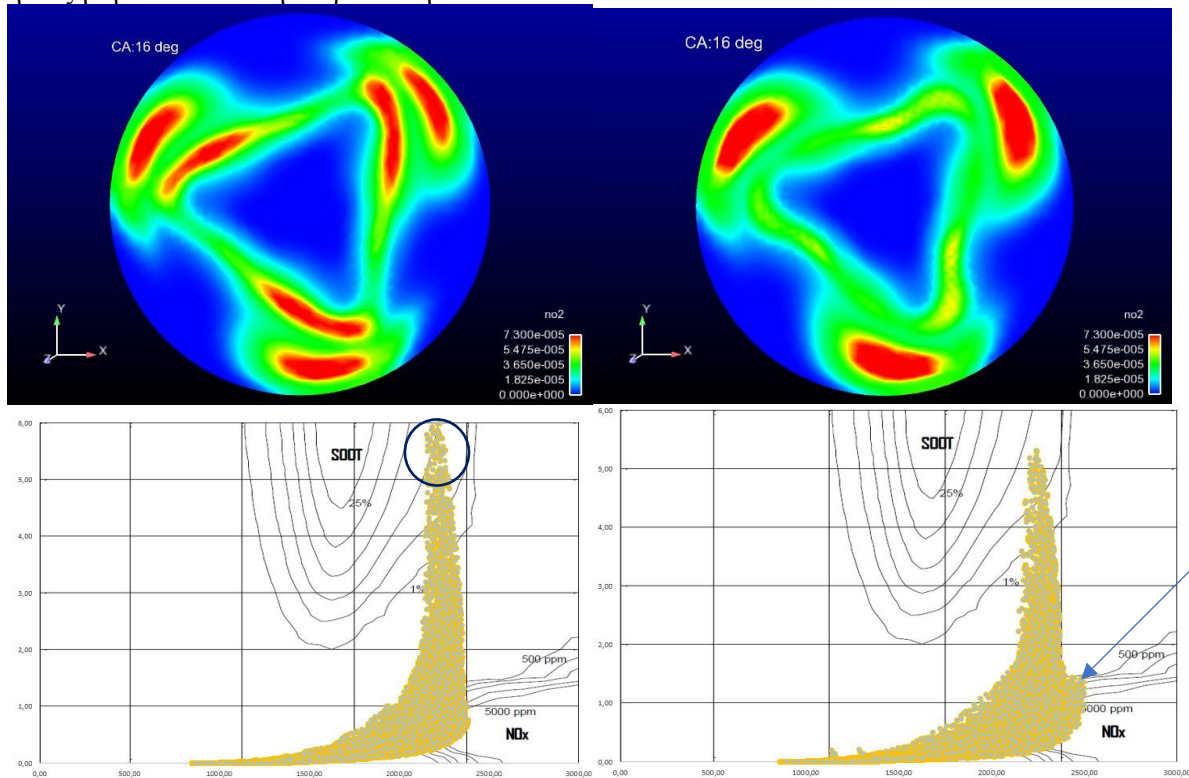
Εικόνα 103: Χάρτης T-φ στις -4° για πιλοτική έγχυση H & C αντίστοιχα

Η καλύτερη κατανομή της θερμοκρασίας στον κύλινδρο λόγω της πιλοτικής C φαίνεται στο στιγμιότυπο της κύριας έγχυσης, όπου γίνεται σαφές ότι το κέντρο του κυλίνδρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία στην περίπτωση C από αυτή της H:



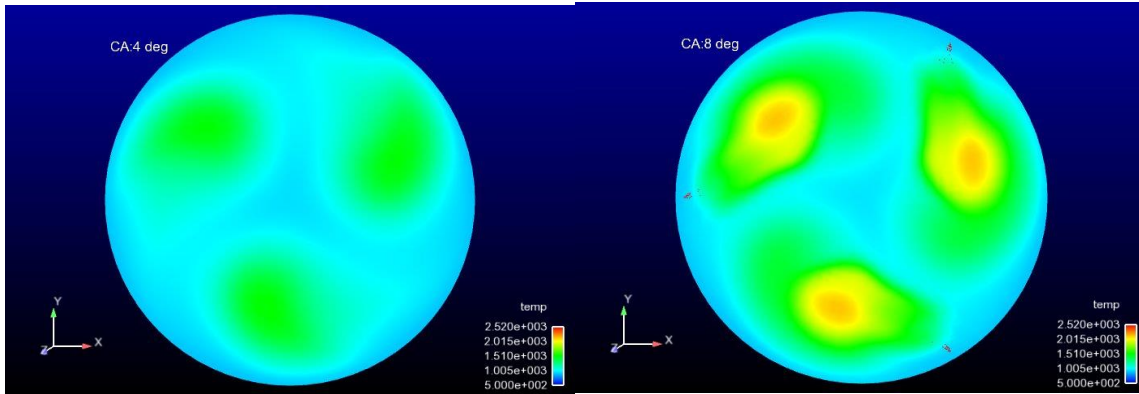
Εικόνα 104: Στιγμιότυπο $CA=8^\circ$ για περίπτωση H & C

Στην κύρια καύση των δύο περιπτώσεων, αξιοσημείωτο είναι το στιγμιότυπο 16° , όπου είναι εμφανής η αύξηση των NO_x στην περίπτωση C:



Εικόνα 105: Στιγμιότυπο $CA=16^\circ$ για περίπτωση H & C

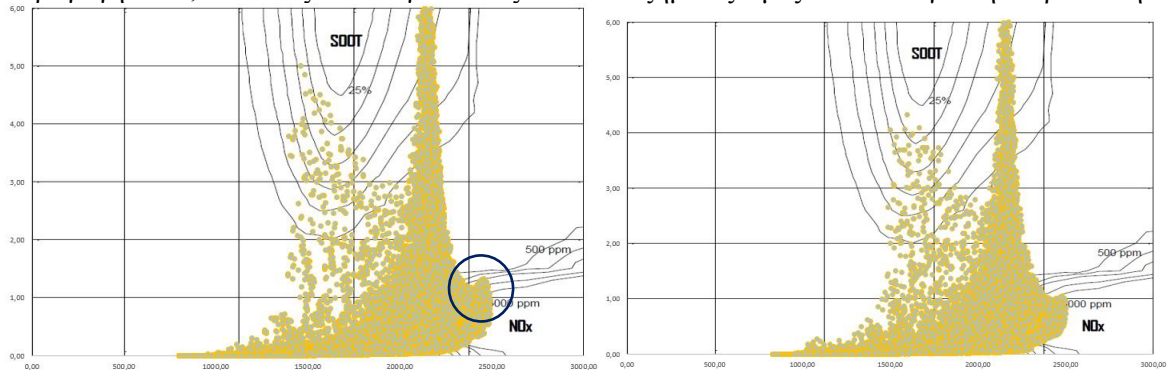
Φαίνεται ότι η περίπτωση C έχει ένα κομμάτι της φλόγας που καίγεται σε ψηλούς λόγους αέρα-καυσίμου και μεγάλες θερμοκρασίες, σε αντίθεση με την H, που έχει κυρίως αυξημένο λόγο καυσίμου-αέρα. Στη μία περίπτωση παρατηρείται παραγωγή NO_x και στην άλλη παραγωγή soot. Πιο ανησυχητική είναι η παραγωγή των NO_x , καθώς τα soot υπάρχει πιθανότητα να οξειδωθούν στην πορεία. Ο αυξημένος αυτός λόγος αέρα-καυσίμου για την περίπτωση C, πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η κύρια έγχυση εγχέεται σε ομοιόμορφο αέρα με υψηλή αναλογία καυσίμου-αέρα και αναφλέγεται πιο γρήγορα με πιο έντονη έκλυση θερμότητας, που δεν επηρεάζεται από το σπρέι του γειτονικού εγχυτήρα. Αντίθετα, στην περίπτωση H, η γρήγορη καύση της πιλοτικής έγχυσης έχει αφήσει πίσω της ένα σύννεφο καυσαερίων στο οποίο εγχέεται η κύρια έγχυση:



Εικόνα 106: Στιγμιότυπο 4° και 8° για περίπτωση H

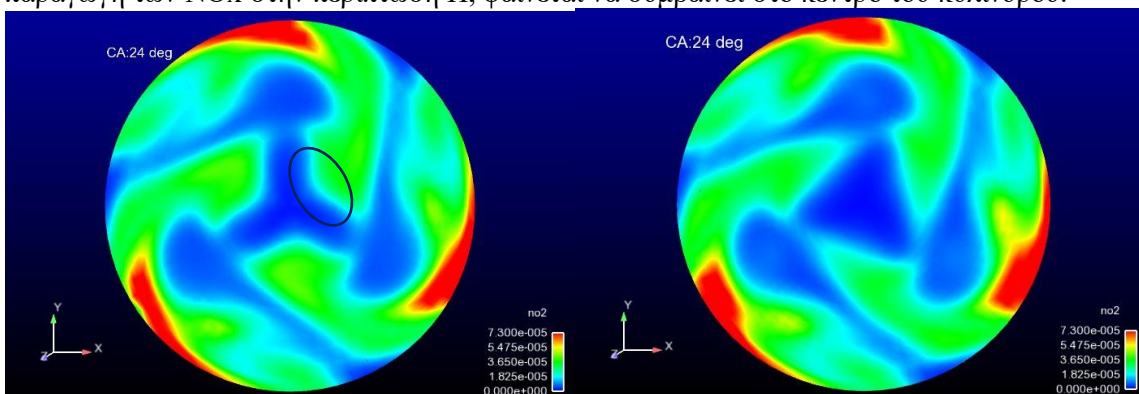
Τα καυσαέρια είναι μεν θερμά και βοηθούν στην εξάτμιση του υγρού καυσίμου, δεν βοηθούν όμως την καύση του σε υψηλούς λόγους αέρα-καυσίμου. Η επίδραση των καυσαερίων στη κύρια έγχυση έχει για τα NOx, ό,τι και η μέθοδος της ανακυκλοφορίας καυσαερίων. Σαφώς κάτι τέτοιο καθυστερεί την πλήρη καύση του καυσίμου, απομακρύνοντας την κύρια παραγωγή έργου από το ΑΝΣ και αυξάνοντας την ειδική κατανάλωση, έχει όμως ευεργετικές ιδιότητες για τη μείωση των NOx.

Στη συνέχεια παρ' όλα αυτά και στις 24° φαίνεται ότι η περίπτωση H εμφανίζει μεγαλύτερη παραγωγή NOx, που ίσως αιτιολογεί και τις τελικά αυξημένες τιμές των NOx για την περίπτωση H.



Εικόνα 107: Χάρτες T-φ στις 24° για πιλοτική H & C

Η συγκέντρωση αυτή υψηλών θερμοκρασιών σε μεγάλους λόγους αέρα-καυσίμου, που προκαλούν την παραγωγή των NOx στην περίπτωση H, φαίνεται να συμβαίνει στο κέντρο του κυλίνδρου:

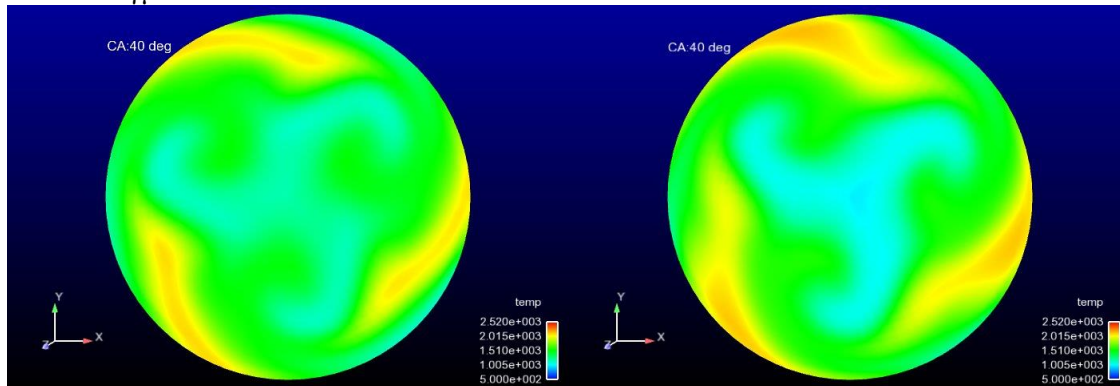


Εικόνα 108: Διαγράμματα NOx στις 24° για πιλοτική H & C

Η πορεία αυτή των καυσαερίων προς το κέντρο του κυλίνδρου στην περίπτωση H πιθανότατα οφείλεται στις πιο έντονα διαφορετικές θερμοκρασίες και πυκνότητες αέρα του κυλίνδρου. Στην περίπτωση C, η θερμοκρασία όλου του κυλίνδρου είναι ελαφρώς αυξημένη συνεπώς οι πυκνότητες και των αερίων πιο ομοιόμορφες. Αντίθετα, στην περίπτωση H, η πρόσκρουση των θερμών καυσαερίων στα πιο ψυχρά

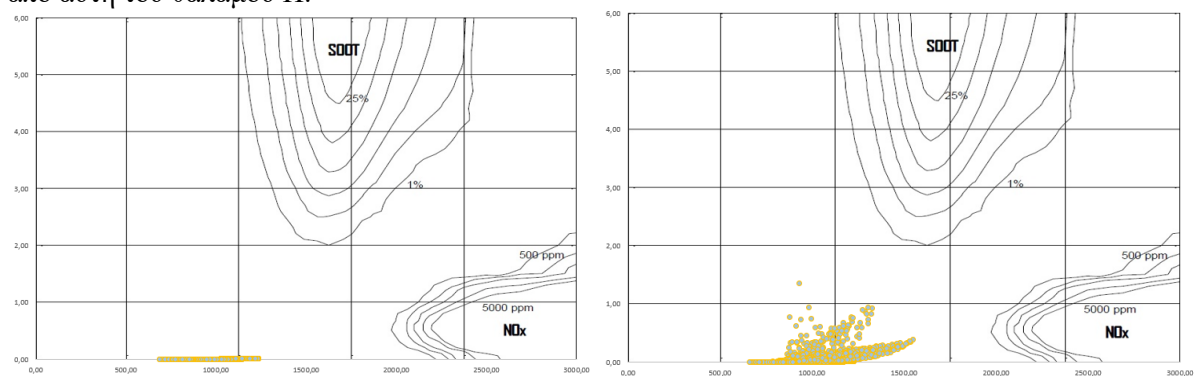
στρώματα αέρα των τοιχωμάτων τα ωθεί προς το κέντρο του θαλάμου όπου το άζωτο του αέρα οξειδώνεται θερμαινόμενο.

Στη συνέχεια της καύσης, είναι σαφές ότι στην περίπτωση Η υπάρχει μεγάλη ομοιομορφία κελών (είναι όλα συσσωρευμένα σχηματίζοντας ένα συμπαγή όγκο στους χάρτες T-φ), σε αντίθεση με την περίπτωση C που εμφανίζει πολλά κελιά με αυξημένο λόγο καυσίμου -αέρα. Ενώ η καύση συνεχίζει να συμβαίνει και στις δύο περιπτώσεις κοντά στα τοιχώματα του κυλίνδρου, στην περίπτωση Η η θερμοκρασία είναι αυξημένη σε μεγαλύτερο όγκο του κυλίνδρου και προς το κέντρο του, όπως φαίνεται από τα στιγμιότυπα:



Εικόνα 109: Στιγμιότυπο 40° για τις περιπτώσεις Η & C αντίστοιχα

Αυτό σημαίνει ότι ενώ κατά την κύρια καύση η αναλογία αέρα-καυσίμου είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση C, μετά την κύρια έγχυση και προς το πέρας της καύσης, ο ίδιος λόγος είναι μεγαλύτερος για την περίπτωση Η, προκαλώντας αυξημένα τελικά NOx. Ο αυξημένος αυτός λόγος για την περίπτωση Η φαίνεται να οφείλεται στην έντονη περιδίνηση των καυσαερίων προς το κέντρο του κυλίνδρου, η οποία προκύπτει από τις ήδη αυξημένες ταχύτητες της πιλοτικής έγχυσης. Στο θάλαμο της περίπτωση C, συνεχίζει να παράγεται μικρή ποσότητα από soot, λόγω της όχι τόσο καλής περιδίνησης και τελικά στο πέρας τη καύσης πολλά κελιά έχουν αυξημένη θερμοκρασία, μεγαλύτερη από αυτή του θαλάμου Η:



Εικόνα 110: Χάρτες T-φ στις 120° για πιλοτική Η & C

Αυτή η αυξημένη τελική θερμοκρασία σαφώς υποδηλώνει και μειωμένο έργο, αφού θερμότητα δεν αποδόθηκε ως έργο και ενέργεια θα χαθεί με την έξοδο των καυσαερίων. Η περαιτέρω χρήση των καυσαερίων και του έργου τους δεν μπορεί να θεωρηθεί πλεονέκτημα στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

Συνολικά, μια προτύπτερη πιλοτική έγχυση καίγεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες χωρίς την παραγωγή NOx και με πολύ καλή ανάμειξη ,θερμαίνοντας το θάλαμο σε όλο του τον όγκο και βοηθώντας τη νωρίτερη καύση της κύριας έγχυσης. Αντίθετα, μια πιλοτική έγχυση πιο κοντά στην κύρια, αφήνει καυσαέρια στην περιοχή έγχυσης του κύριου καυσίμου εμποδίζοντας την επαφή με τον αέρα καύσης. Η ανομοιομορφία των ιδιοτήτων του ρευστού καθώς και η ορμή από την κοντινή πιλοτική έγχυση βοηθούν στην καλύτερη ανάμειξη του καυσίμου μετά τη μετέγχυση, ώστε η μετέγχυση καίγεται πιο ολοκληρωτικά αυξάνοντας τα NOx.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε, με χρήση CFD, η θερμορευστομηχανική και η καύση στον δίχρονο ναυτικό κινητήρα RTflex58T, στο πλαίσιο της χρήσης προφίλ έγχυσης πολλαπλού παλμού, με στόχο την ποσοτικοποίηση της επίδρασης διαφορετικών προφίλ στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και σωματιδίων αιθάλης, καθώς και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Εδώ, δόθηκε έμφαση στη χρήση πενταπλού παλμού έγχυσης, στο πλαίσιο της διαμόρφωσης προφίλ με προέγχυση, κύρια έγχυση και μετέγχυση.

Τα παρόντα αποτελέσματα πιστοποιούν ότι η χρήση πολλαπλού παλμού, κατάλληλα διαμορφωμένου, μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση των εκπομπών NO_x κατά 33%, η οποία όμως δεν είναι επαρκής στο πλαίσιο των κανονισμών του Tier III για τις περιοχές ελέγχου ρύπων, και soot κατά 25% με διατήρηση των επιπέδων SFOC. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι σε ποιοτική συμφωνία με προγενέστερες έρευνες, οι οποίες έχουν κάνει χρήση τμηματικής έγχυσης με απλούστερα προφίλ (χρήση απλών παλμών προέγχυσης ή/και μετέγχυσης).

Για την πληρέστερη κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την καύση και την παραγωγή ρύπων, έγινε παραμετρική διερεύνηση με χρήση διαφορετικών προφίλ, συνολικά τριπλού παλμού (προέγχυση, κύρια έγχυση και μετέγχυση). Εδώ, διαμορφώθηκαν προφίλ λαμβάνοντας υπόψη και μεταβάλλοντας βέλτιστα προφίλ έγχυσης για προέγχυση και κύρια έγχυση (Andreadis et al., 2010), και κύρια έγχυση και μετέγχυση (Stratsianis et al., 2016). Τα αποτελέσματα κατέδειξαν τη σημαντική σημασία της μετέγχυσης στη μείωση των παραγόμενων ρύπων. Πιο συγκεκριμένα, είναι ιδιαίτερα σημαντική η απόσταση της μετέγχυσης από την κύρια έγχυση, σημαντικότερη από το ποσοστό της μάζας της μετέγχυσης. Τέλος, τα παρόντα αποτελέσματα πιστοποιούν ότι η μάζα της πιλοτικής έγχυσης είναι σημαντική προκειμένου να ελέγχεται η μέγιστη πίεση του θαλάμου, αποτελώντας μια εξίσου σημαντική μεταβλητή.

Η παρούσα, σε συνδυασμό με προγενέστερες μελέτες χρήσης πολλαπλού παλμού έγχυσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης προφίλ έγχυσης με παρουσία ανακύκλωσης καυσαερίων (EGR) για την περαιτέρω μείωση των εκπομπών NO_x. Τέλος, μπορεί να αποτελέσει οδηγό για μελέτες βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης στην περίπτωση χρήσης εναλλακτικών καυσίμων, όπως η μεθανόλη, με επιπλέον σημαντικό στόχο τη μείωση της απαιτούμενης μάζας του καυσίμου έγχυσης. Τέλος, στο πλαίσιο της χρήσης μετεπεξεργασίας καυσαερίων, η βελτιστοποίηση της τμηματικής έγχυσης μπορεί να έχει ως κύριο στόχο τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, χωρίς επικέντρωση στη μείωση των εκπομπών NO_x.

Βιβλιογραφία:

1. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2020, Reston, Virginia: January 31, 2020. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
2. Walter R., Marine Emissions Abatement Archived, 2015-04-02, at the Wayback Machine. ,SFA International
3. NASA/Goddard Space Flight Center. "Lightning's 'NOx-ious' Impact On Pollution, Climate." ScienceDaily. ScienceDaily, 6 November 2009, www.sciencedaily.com/releases/2009/10/091030100022.htm
4. Adam Voiland, Aerosols: Tiny Particles, Big Impact, The Earth Observatory, NASA, November 2, 2010, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>
5. Hannah Ritchie and Max Roser (2017) – “Air Pollution”. Published online at OurWorldIn-Data.org. <https://ourworldindata.org/air-pollution>
6. Waddams, A.L. , Solomon, Lee H. and Carruthers, John E. "petroleum refining". Encyclopedia Britannica, 9 Nov. 2018, <https://www.britannica.com/technology/petroleum-refining>
7. Eurostat, Air Pollution Statistics-Emission Inventories, Data from September 2021, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Air_pollution_statistics_-_emission_inventories
8. United States Environmental Protection Agency (USEPA), History of Air Pollution, July 5, 2022, <https://www.epa.gov/air-research/history-air-pollution>
9. Multilateral Treaties Deposited with the Secretary-General, United Nations Treaty Collection, Certified True Copies, <https://treaties.un.org/Pages/Treaties.aspx?id=27&subid=A&clang=en>
10. United Nations, Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Geneva, 13 November 1979, https://treaties.un.org/doc/Treaties/1979/11/19791113%2004-16%20PM/Ch_XXVII_01p.pdf
11. United Nations, 1. b). Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent. Helsinki, 8 July 1985, https://treaties.un.org/doc/Treaties/1987/09/19870902%2005-03%20PM/Ch_XXVII_01_bp.pdf
12. 1. b) Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent, Helsinki, 8 July 1985 https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1-b&chapter=27&clang=en
13. 1. c) Protocol to the 1979 Convention on long-range transboundary air pollution concerning the control of emissions of nitrogen oxides or their transboundary fluxes, Sofia, 31 October 1988, https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1-c&chapter=27&clang=en
14. 1. c). Protocol to the 1979 Convention on 1 transboundary air pollution concerning cant emissions of nitrogen oxides or their trans fluxes. Sofia, 31 October 1988 https://treaties.un.org/doc/Treaties/1991/02/19910214%2005-04%20PM/Ch_XXVII_01_cp.pdf
15. MAN Energy Solutions, Marine Engine Programme, 2022, https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/marine-engine-programme-20205656db69fafa42b991f030191bb3bbb4.pdf?sfvrsn=9cac9964_64
16. UN Environment Programme, Clean Air as a Human Right, 10 Dec 2019, [Clean air as a human right \(unep.org\)](https://www.unep.org/clean-air)
17. 1. d) Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes Ge-

- neva, 18 November 1991, https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1-d&chapter=27&clang=en
18. 1. d). Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes. Geneva, 18 November 1991, https://treaties.un.org/doc/Treaties/1998/02/19980202%2005-54%20PM/Ch_XXVII_01_dp.pdf
 19. 1. f). Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Heavy Metals. Aarhus, 24 June 1998, https://treaties.un.org/doc/Treaties/1998/06/19980624%2004-23%20PM/Ch_XXVII_01_fp.pdf
 20. 1. f) Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Heavy Metals Aarhus, 24 June 1998, https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1-f&chapter=27&clang=en
 21. United Nations, Treaty Series, vol. 2230, p. 79; Document of the Economic and Social Council EB.AIR/1998/2; C.N.554.2010.TREATIES-2 of 14 September 2010 (Amendments to Annexes V and VII) and C.N.844.2010.TREATIES-8 of 20 December 2010 (Entry into force of the Amendments to Annexes V and VII to the Protocol)1,2 . https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1-g&chapter=27&clang=en
 22. 1. g). Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Persistent Organic Pollutants. Aarhus, 24 June 1998 https://treaties.un.org/doc/Treaties/1998/06/19980624%2004-19%20PM/Ch_XXVII_01_gp.pdf
 23. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1-h&chapter=27&clang=en
 24. 2. a). Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Montreal, 16 September 1987, https://treaties.un.org/doc/Treaties/1989/01/19890101%2003-25%20AM/Ch_XXVII_02_ap.pdf
 25. 2. a) Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer Montreal, 16 September 1987, https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-2-a&chapter=27&clang=en
 26. United Nations UN, Environment Program (UNEP), <https://www.unenvironment.org/explore-topics/air>
 27. Hannah Ritchie and Max Roser (2017) – “Air Pollution”. Published online at OurWorldIn-Data.org. <https://ourworldindata.org/grapher/ambient-pollution-death-rates-2017-1990>
 28. ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ για τη σύναψη, εξ ονόματος της Ευρωπαϊκής Κοινότητας της σύμβασης για την πρόσβαση σε πληροφορίες, τη συμμετοχή του κοινού στη λήψη αποφάσεων και την πρόσβαση στη δικαιοσύνη για περιβαλλοντικά θέματα, Βρυξέλλες, 24.10.2003, <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/EU%20texts/conventioningreek.pdf>
 29. 13. a) Protocol on Pollutant Release and Transfer Registers to the Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-Making and Access to Justice in Environmental Matters Kiev, 21 May 2003, https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-13-a&chapter=27&clang=en
 30. United Nations, Sustainable Development Goals, United Nations announces 2019 Climate Action Summit ‘Clean Air Initiative’, calls on Governments at all levels to join, 23 July, 2019, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2019/07/clean-air-initiative-calls-climate-action/>
 31. EMEP/EPEA air pollutant emission inventory guidebook 2019, Technical Guidance to prepare national emission inventories, EEA Report No 13/2019, <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>

32. EEA, Emissions from air pollutants from transport, 17 Dec 2019, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-8>
33. MAN Energy Solutions, 0.50% S fuel operation 2020, Denmark, August 2019, <https://shipandbunker.com/download/Paper%200.50-s-fuel-operation-2020%20MAN%20ES%202-S.pdf>
34. MAN Prime Serve, Performance Measurement Indicator, https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/performance-measurement-indicator-eng.pdf?sfvrsn=8ce6c8eb_0
35. United Nations, The UN System, UN Principal Organs, Published by the United Nations Department of Global Communications— July 2021, https://www.un.org/en/pdfs/un_system_chart.pdf
36. ICAO, A Global Market-Based Measure for International Flights, Environmental Protection, <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>
37. UNIDO, Emerging Compliance Regime, <https://www.unido.org/our-focus/safeguarding-environment-implementation-multilateral-environmental-agreements/emerging-compliance-regimes>
38. Κ.Δ. Ρακόπουλος, Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι, Εκδ. Φούντας, Αθήνα
39. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>
40. IMO, Status of Treaties, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/About/Conventions/StatusOfConventions/StatusOfTreaties.pdf>
41. IMO, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Adoption: 1973 (Convention), 1978 (1978 Protocol), 1997 (Protocol - Annex VI); Entry into force: 2 October 1983 (Annexes I and II). [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
42. RESOLUTION MEPC.103(49), Adopted on 18 July 2003, GUIDELINES FOR ON-BOARD NO_x VERIFICATION PROCEDURE - DIRECT MEASUREMENT AND MONITORING METHOD, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.103\(49\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.103(49).pdf)
43. RESOLUTION MEPC.130(53) Adopted on 22 July 2005 GUIDELINES FOR ON-BOARD EXHAUST GAS-SO_x CLEANING SYSTEMS, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.130\(53\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.130(53).pdf)
44. RESOLUTION MEPC.129(53) Adopted on 22 July 2005 GUIDELINES FOR PORT STATE CONTROL UNDER MARPOL ANNEX VI, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.129\(53\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.129(53).pdf)
45. ANNEX 13 RESOLUTION MEPC.176(58) Adopted on 10 October 2008 AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO (Revised MARPOL Annex VI), [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/176\(58\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/176(58).pdf)
46. Δ.Ι. Κολαΐτης, Μ.Α. Φούντη, Θεωρία Καύσης, Εκδ. Φούντας, Αθήνα, 2014
47. RESOLUTION MEPC.177(58) Adopted on 10 October 2008 AMENDMENTS TO THE TECHNICAL CODE ON CONTROL OF EMISSION OF NITROGEN OXIDES FROM MARINE DIESEL ENGINES (NO_x Technical Code 2008), [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177\(58\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177(58).pdf)
48. RESOLUTION MEPC.198(62) Adopted on 15 July 2011 2011 GUIDELINES ADDRESSING ADDITIONAL ASPECTS TO THE NO_x TECHNICAL CODE 2008 WITH REGARD TO PARTICULAR REQUIREMENTS RELATED TO MARINE DIESEL ENGINES FITTED WITH SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION (SCR) SYSTEMS, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/198\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/198(62).pdf)
49. RESOLUTION MEPC.286(71) (adopted on 7 July 2017) AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR

- THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO, <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/soxpm/resmepec286-71.pdf>
50. RESOLUTION MEPC.293(71) (adopted on 7 July 2017) 2017 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT AND MANAGEMENT OF THE IMO SHIP FUEL OIL CONSUMPTION DATABASE [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.293\(71\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.293(71).pdf)
 51. RESOLUTION MEPC.305(73) (adopted on 26 October 2018) AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.305%2873%29.pdf>
 52. RESOLUTION MEPC.280(70) (Adopted on 28 October 2016) EFFECTIVE DATE OF IMPLEMENTATION OF THE FUEL OIL STANDARD IN REGULATION 14.1.3 OF MARPOL ANNEX VI, <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/soxpm/resmepec280-70.pdf>
 53. European Commission, Air, https://ec.europa.eu/environment/air/cleaner_air/#origins
 54. MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE 77th session Agenda item 6, ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2020), <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC%2077-6-1%20-%202020%20report%20of%20fuel%20oil%20consumption%20data%20submitted%20to%20the%20IMO%20Ship%20Fuel%20Oil%20Consumption%20Database%20in%20GISIS.pdf>
 55. IMO 2020- cutting Sulphur oxide emissions, <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
 56. United Nations Conference on Trade and Development, Review of Maritime Transport, UNCTAD 31 January 2020, https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2019_en.pdf
 57. Thang Do, MSc, IMO 2020 and effects on the shipping industry, Seahawk Investments GmbH, 28 Aug 2019, <https://www.seahawk-investments.com/2019/08/28/imo-2020-and-effects-on-the-shipping-industry-2/?lang=en>
 58. O'Connor, Jacqueline, Musculus, Mark P. B., and Pickett, Lyle M. Effect of post injections on mixture preparation and unburned hydrocarbon emissions in a heavy-duty diesel engine. United States: N. p., 2016. doi:10.1016/j.combustflame.2016.03.031 <https://scihub.se/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.03.031>
 59. ABS, Marine Fuel Oil Advisory, August 2021, <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/marine-fuel-oil-advisory.pdf>
 60. Duyar Serkan, Master of Science Thesis KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology EGI-2014, Division of Heat and Power Technology, Stockholm, Modeling diesel combustion in heavy duty engine using detailed chemistry approach and CFD, https://www.researchgate.net/publication/268522765_Master_of_Science_Thesis_KTH_School_of_Industrial_Engineering_and_Management_Energy_Technology_EGI-2014-060MSC_EKV1038_Division_of_Heat_and_Power_Technology_SE-100_44_STOCKHOLM_Modeling_diesel_combust/citation/download
 61. OCIMF and other organizations, The supply and use of 0.50%-Sulphur marine fuel, Joint Industry Guidance, August 2019, <https://www.ocimf.org/document-library/55-marine-fuels-guidance-the-supply-and-use-of-0-50-sulphur-marine-fuel/file>
 62. BRYAN COMER, NAYA OLMER, XIAOLI MAO, BISWAJOY ROY, AND DAN RUTHERFORD, Black Carbon Emissions and Fuel Use in Global Shipping, 2015, ICCT, https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-Marine-BC-Inventory-2015_ICCT-Report_15122017_vF.pdf

63. Haifeng Wang, The end of the era of Heavy Fuel Oil in Maritime Shipping, July 9, 2014, The International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/the-end-of-the-era-of-heavy-fuel-oil-in-maritime-shipping/>
64. Wartsila, The Sulzer RT-Flex Common-Rail System Described, Wartsila Corporation, August 2004, http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/rt_flex/2004%20Wartsila%20RT%20Flex%20desc.pdf
65. Γ.Φ. Δανιήλ, Κινητήριες Μηχανές ΙΙ, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα 2000, https://www.eef.edu.gr/media/2434/e_h00008.pdf
66. D.K.Sanyal, Principles & Practices of Marine Diesel Engines, Bhandarkar Publications, 2013, India, <https://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/42648-common-rail-system-of-fuel-injection/>
67. Christopher E. Brennen, Internet Book of Fluid Dynamics, September 2004, <http://brennen.caltech.edu/fluidbook/multiphase/Sprays/singledropletcombustion.pdf>
68. Mohit Jain, R. Surya Prakash, Gaurav Tomar and R. V. Ravikrishna, Secondary breakup of the drop at moderate Weber numbers, May, 2015, The Royal Society Publishing, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2014.0930>
69. Rolf D. Reitz, Liquid Atomization and Spraying, The CRC Handbook of Mechanical Engineering, Ch.3.13, CRC Press, New York, 2004, https://books.google.gr/books?id=a84qBgAAQBAJ&pg=SA3-PA182&lpg=SA3-PA182&dq=diesel+spray+atomizers&source=bl&ots=-LX_icUQZR&sig=ACfU3U0nF7yw8McErVa9MhQztiD-fvFRR4w&hl=el&sa=X&ved=2ahUKEwifsr3tqNTpAhVie-MAKHVeuCuEQ6AEwA3oECAoQAQ#v=onepage&q=diesel%20spray%20atomizers&f=false
70. Warnatz, J. (1981). Chemistry of Stationary and Non-Stationary Combustion. In: Ebert, K.H., Deuflhard, P., Jäger, W. (eds) Modelling of Chemical Reaction Systems. Springer Series in Chemical Physics, vol 18. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68220-9_12
71. A. Little, A. Selamat, Asim Iqbal, R. Reese, R. Vick, Autoignition Characteristics of Primary Reference Fuels and their Mixtures, November 2005, SAE International, US, <https://www.semanticscholar.org/paper/Autoignition-Characteristics-of-Primary-Reference-Little-Selamet/946022a6ea69a1cc365c515bb76b04eb2809d1e7>
72. MAN, MAN B&W 98-50 ME/ME-C-TII Type Engines, Engine Selection Guide, Electronically Controlled Two-Stroke Engines, June 2010, <https://man-es.com/applications/project-guides/2stroke/content/printed/me.pdf>
73. Prachi Gupta, Andrew Lakes, Thomas Dziubla, Oxidative Stress and Biochemicals, Ch.1, A Free Radical Primer, Academic Press, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803269-5.00001-2>
74. Wikipedia contributors. (2022, April 13). Lindemann mechanism. In Wikipedia, The Free Encyclopedia, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lindemann_mechanism&oldid=1082448553
75. Palmer, J., Schumacher, L., Reddemann, M.A. et al. Applicability of pulsed 2cLIF-EET for micro-droplet internal thermometry under evaporation conditions. Exp Fluids 61, 99 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00348-020-2935-7>, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-020-2935-7>
76. Modeling Approaches for Internal Combustion Engine Applications, Thessaloniki, 2017
77. Large vs. Small IC Engines-similarities and differences across scales, Athens, November 2012
78. Palmer, J., Schumacher, L., Reddemann, M.A. et al. Applicability of pulsed 2cLIF-EET for micro-droplet internal thermometry under evaporation conditions. Exp Fluids 61, 99 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00348-020-2935-7>

79. Krithika, Varunkumar, Rekesh, Praise, Anjith, Anureka, Nandhakumar, Harinath, Ibrahim, Atomization and Sprays, Thermodynamics and Combustion Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, IIT Mardas, 2019, <https://mech.iitm.ac.in/tdce/atomization.html>
80. Kierra Rawle, D-2 Law for Liquid Droplet Vaporization, - <https://slideplayer.com/slide/3425672/>
81. Umemura, A. (2011). Spray Group Combustion. In: Ashgriz, N. (eds) Handbook of Atomization and Sprays. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4_14
82. Julien Reveillon, Direct Numerical Simulation of Sprays: Turbulent Dispersion, Evaporation and Combustion, University of Rouen, Rouen, France, January 1970, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-211-72464-4_6
83. Christoph Heinzen, Andreas Berger, Ian W. Marison, Use of vibration technology for jet break-up for encapsulation of cells, microbes and liquids in monodisperse microcapsules, Christoph Heinzen, Andreas Berger and Ian Marison, Switzerland, 2004, http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-1638-3_14
84. Peter Kozak & Katherine Asztalos, Effects of Liquid Droplet-Droplet Interactions in a Pressure Swirl Spray, Illinois Institute of Technology, August 2015, https://www.researchgate.net/publication/286653542_Effects_of_Liquid_Droplet-Droplet_Interactions_in_a_Pressure_Swirl_Spray
85. MAN Prime Serve, Humid Air Motor, Technology for green profits, Canada, 2015, <https://www.yumpu.com/en/document/read/46840791/humid-air-motor-man-diesel-turbo-canada>
86. Isabel Lamas, Technical Courses, Cursos Tecnicos, Emissions from Marine Engines and NOx Reduction Methods, 2014 http://www.technicalcourses.net/portal/en/blog/blog_entrada.php?entrada_id=47
87. Suresh Vellaiyan, K.S. Amirthagadeswaran, The role of water-in-diesel emulsion and its additives on diesel engine performance and emission levels: A retrospective review, Alexandria Engineering Journal, Volume 55, Issue 3, 2016, Pages 2463-2472, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.021>
88. Anders Andersen, MAN Diesel & Turbo, Kristen Brauner Nyggard, Danisco, Water-in-fuel emulsion as marine engine fuel for reduced NOx and particulate emissions, Danish Ministry of the Environment, <https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2011/08/978-87-92779-30-4.pdf>
89. IPCO, FID Injection-Water Fuel Emulsion to reduce emissions, The Netherlands, <https://www.ipcopower.com/fid-injector.html> https://www.ipcopower.com/uploads/1/2/3/0/12301483/the_ipco_power_wfe_system_info.pdf
90. Galvin Lipsith, Fuel emulsion meets Tier III NOx limits with pilot ignition, Riviera, 2019, <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/fuel-emulsion-meets-tier-iii-nox-limits-with-pilot-ignition-55468>
91. Maritime Week Americas 2014 – Panama, On-board Fuel Emulsion Systems Practical Emissions Solutions, Nonox Ltd, https://www.petrospot.com/images/events/2014/mwa_2014/delete_papers/14_EricCottell_NONOX.pdf
92. Wartsila, Encyclopedia of Marine and Energy Technology, Direct Water Injection (DWI), [https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/direct-water-injection-\(dwi\)](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/direct-water-injection-(dwi))
93. H Shyam Prasad, V S Vijay and Joseph Gonsalvis, Effect of Direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance, IOP Publishing, 2018, <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012039>
94. W. Addy Majewski, Water in Diesel Combustion, DieselNet Technology Guide, https://dieselnet.com/tech/engine_water.php
95. Shyam Prasad H, Joseph Gonsalvis, Vijay V. S. , Effect of Introduction of Water into Combustion Chamber of Diesel Engines – A Review, 2015, Scientific & Academic Publishing, doi:10.5923/c.ep.201501.06 <http://article.sapub.org/10.5923.c.ep.201501.06.html#Sec4>
96. Royal Belgian Institute of Marine Engineers, Slide Valves: Small Things that mean a lot, Fall 2008, https://www.gallois.be/ggmagazine_2009/gg_04_07_2009_166.pdf

97. MAN PrimeServ, Slidw Fuel Valve, PrimeServ Retrofitting, Canada, 2015, <https://www.yumpu.com/en/document/read/38718990/slide-fuel-valve-primerserv-retrofitting-man-diesel-turbo-canada>
98. MAN Diesel & Turbo, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Starcrest Consulting Group, OGV Slide Valve Low-Load Emissions Evaluation, 2013, <https://cleanairactionplan.org/wp-content/uploads/2018/05/ec3397971ad1a04a8453c643bc59dce7.pdf>
99. K.R. Patil and S.S. Thipse, The effect of injection timing on the performance and emission of direct injection CI engine running on diethyl ether-diesel blends, The Automotive Research Association of India, Pune, India, Dec, 2016, UMP Publisher, <https://doi.org/10.15282/ijame.13.3.2016.19.0309> http://ijame.ump.edu.my/images/Vol-ume_13_Issue_3_2016/19_Patil%20and%20Thipse.pdf
100. Wartsila, Low NOx Combustion, Encyclopedia of Marine and Energy Technology, <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/low-nox-combustion>
101. Hannu Jääskeläinen, Fuel Injection for Clean Diesel Engines, DieselNet Technology Guide, Rev. Sep.2020, https://dieselnet.com/tech/engine_fi.php
102. Nam, Dong, "How to reduce emission of nitrogen oxides [NOx] from marine diesel engines in relation to Annex VI of MARPOL 73/78" (2000). World Maritime University Dissertations. 298. https://commons.wmu.se/all_dissertations/298 https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1297&context=all_dissertations
103. R. Sindhu, G. Amba Prasad Rao, K. Madhu Murthy, Effective reduction of NOx emissions from diesel engine using split injections, September 2018, Alexandria Engineering Journal, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016817302041>
104. G. Lacaze, A. Misdariis, A. Ruiz, J. C. Oefelein, Analysis of high-pressure Diesel fuel injection process using LES with real fluid thermodynamics and transport, Proceedings of the Combustion Institute, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.072> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748914002302>
105. Okazaki Kousuke, Takasaki Koji, Tajima Hiroshi, Shuto Shintaro, Kawauchi Satoshi, Nagamura Nobukazu, Effects of Electronically Controlled Fuel Injection System (EFI) for Marine Diesel Engines, 2010, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/45/Special/45_974/pdf/char/ja
106. Marine Installation Manual RT-flex58T-E, WinGD, 2020, [https://www.wingd.com/en/documents/rt-flex58t-e/engine-installation/mim/marine-installation-manual-\(mim\)/](https://www.wingd.com/en/documents/rt-flex58t-e/engine-installation/mim/marine-installation-manual-(mim)/)
107. Wartsila, Wartsila Fuel Efficiency Boost, 2018, https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/service-catalogue-files/engine-services---2-stroke/w%C3%A4rtsil%C3%A4_fuel_efficiency_boost-leaflet.pdf?sfvrsn=82001744_2
108. M. El. Kassaby, M. A. Nemit Allah, Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel/diesel fuel, AEJ, March 2013, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.11.007> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016812001111>
109. L.Feng, J. Tian, W. Long, W. Gong, B. Du, D. Li, L. Chen, Decreasing NOx of a Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine by Using In-Cylinder Emission Control Measures, Dalian, China, April 2016, MDPI, <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/4/304/htm>
110. E. Codan and T. Huber, Potential of 2-stage Turbocharging, ABB Turbo Systems Ltd, Baden, Switzerland, https://library.e.abb.com/public/096b92d37325c0bd85257ad7006e5b4f/ABB_Dresden2012.pdf
111. MAN Energy Solutions, Basic principles of ship propulsion, https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/basic-principles-of-ship-propulsion_web_links.pdf?sfvrsn=12d1b862_10
112. CIMAC, Conference Report: 2016 CIMAC Congress, June 2016, DieselNet, https://www.cimaccongress.com/upload/program/press/diesel_net_2016_06_28_news_Conference_report_2016_CIMAC_Congress.pdf

113. Yi Cui, Zhilong Hu, Kangyao Deng, Qifu Wang, Miller-Cycle Regulatable, Two-Stage TC System Design for MARINE Diesel Engines, ResearchGate, 2013, https://www.researchgate.net/publication/275379139_Miller-Cycle_Regulatable_Two-Stage_Turbocharging_System_Design_for_Marine_Diesel_Engines
114. NOx Technical Code, IMO, 2008, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177\(58\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177(58).pdf)
115. Seung-Min Hwang, Fumiteru Akamatsu, and Hyun-Seo Park, Evaluation of Combustion Mechanism of Droplet Cluster by Simultaneous Time-Series Measurement in Premixed Spray Flame, J.Ind. Eng. Chem., 2006, [07-2006-E156.hwp \(cheric.org\)](https://www.cheric.org/07-2006-E156.hwp)
116. Resolution MEPC 307 (73), 2018 Guidelines for the Discharge of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Bleed-off Water, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.307\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.307(73).pdf)
117. Taufiq Choogle, 7 Ways for Ships to meet MARPOL NOx Tier III Regulation, MarineInsight, 2019, <https://www.marineinsight.com/tech/different-ways-meet-nox-tier-iii-standards/>
118. MAN Diesel & Turbo, Emission Project Guide, MAN B&W Two-Stroke Marine Engines, June 2017 7th Edition, https://indico.cern.ch/event/659434/attachments/1528657/2391369/MAN_BW_Two-stroke_Marine_Engines.pdf
119. Resolution MEPC.198(62) – 2011 Guidelines Addressing Additional Aspects to the Nox Technical Code 2008 with regard to Particular Requirements related to Marine Diesel Engines fitted with Selective Catalytic Reduction (SCR) Systems – (Adopted on 15 July 2011) [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/198\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/198(62).pdf)
120. RESOLUTION MEPC.291(71), 2017 GUIDELINES ADDRESSING ADDITIONAL ASPECTS OF THE NOX TECHNICAL CODE 2008 WITH REGARD TO PARTICULAR REQUIREMENTS RELATED TO MARINE DIESEL ENGINES FITTED WITH SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION (SCR) SYSTEMS, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.291\(71\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.291(71).pdf)
121. S. Raghuram & Vasudevan Raghavan, Atomization and Sprays, 2012, [Thermodynamics and Combustion Engineering Laboratory - Department of Mechanical Engineering, IIT Madras](https://www.thermodynamicsandcombustionengineeringlaboratory.com/)
122. T. Choogle, 7 Ways for Ships to meet MARPOL NOx Tier III Regulation, October 2019, Marine Insight, <https://www.marineinsight.com/tech/different-ways-meet-nox-tier-iii-standards/>
123. Wartsila, Wartsila Product Development to comply with IMO Tier III (NOx), Presentation to HELCOM, Helsinki, May 2010, [https://portal.helcom.fi/Archive/archive2/CG%20NECA%201-2010_Presentation3_W%20C3%A4rtsil%20C3%A4%20Product%20Development%20to%20comply%20with%20IMO%20Tier%20III%20\(NOx\).pdf](https://portal.helcom.fi/Archive/archive2/CG%20NECA%201-2010_Presentation3_W%20C3%A4rtsil%20C3%A4%20Product%20Development%20to%20comply%20with%20IMO%20Tier%20III%20(NOx).pdf)
124. Wartsila, Environmental Product Guide, Finland, March 2017, <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/product-guide-o-env-environmental-solutions.pdf>
125. Wartsila, Wartsila NOx Reducer (NOR), April 2017, <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/brochure-o-env-wartsila-nox-reducer.pdf>
126. Doug Woodyard, Fuel Injection, in Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines (Ninth Edition), 2009
127. Mechanism of Combustion Noise Influenced by Pilot Injection in PPCI Diesel Engines Jingtao Du, Ximing Chen, Long Liu, Dai Liu and Xiuzhen Ma, https://www.researchgate.net/publication/332976399_Mechanism_of_Combustion_Noise_Influenced_by_Pilot_Injection_in_PPCI_Diesel_Engines
128. A.J. Torregrosa, A. Broatch, R. Novella, L.F. Mónico, Suitability analysis of advanced diesel combustion concepts for emissions and noise control, 2011, [https://doi.org/10.1016/j-energy.2010.12.032](https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.032) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421000722X>
129. Robert Bosch GmbH, Common-rail injection systems CRS3-27 diesel common-rail system with piezo injectors and 2.700 bar, Germany, 2015, http://www.bosch.co.jp/tms2015/en/products/pdf/DS_ProductDataSheet_CRS3-27_EN.pdf
130. V. Quan Phan, V. H. Dang Tran, Introduction of the Common Rail System Applied in Marine Diesel Engine, Ho Chi Minh City University of Transport, May 2018, <https://vjol.info.vn/index.php/ut/article/download/45496/36829/>

131. Hannu Jääskeläinen, Magdi K. Khair, Common Rail Fuel Injection, DieselNet, Revision November 2020, https://dieselnet.com/tech/diesel_fi_common-rail.php
132. Effective reduction of NOx emissions from diesel engine using split injections R. Sindhu *, G. Amba Prasad Rao, K. Madhu Murthy Department of Mechanical Engineering, NIT Warangal, Telangana, India Received 27 January 2017; revised 12 May 2017; accepted 10 June 2017 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553>
133. Simone Liona, Ioannis Vlaskos, Rodolfo Tacchanic, A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery, University of Trieste, Department of Engineering and Architecture, Trieste, Italy, 1 March 2020, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553>
134. A.J. Torregrosa, A. Broatch, A. García, L.F. Mónico, Sensitivity of combustion noise and NOx and soot emissions to pilot injection in PCCI Diesel engines, Applied Energy, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.040> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008331#b0110>
135. Jingtao Du, Ximing Chen, Long Liu, Dai Liu and Xiuzhen Ma, Mechanism of Combustion Noise Influenced by Pilot Injection in PPCI Diesel Engines, College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/9/1875/pdf>
136. Kokjohn, Sage L., and Rolf D. Reitz. "A Computational Investigation of Two-Stage Combustion in a Light-Duty Engine." SAE International Journal of Engines, vol. 1, no. 1, 2009, pp. 1083–104. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/26308342>. Accessed 28 Aug. 2022, <https://www.jstor.org/stable/26308342?seq=1>
137. Kyusoo Jeong , Donggon Lee, Sungwook Park and Chang Sik Lee, Effect of Two-Stage Fuel Injection Parameters on NOx Reduction Characteristics in a DI Diesel Engine, <https://www.mdpi.com/1996-1073/4/11/2049/pdf>
138. Haozhong Huang, Qingxin Wang, Cheng Shi, Qingsheng Liu, Chengzhong Zhou, Comparative study of effects of pilot injection and fuel properties on low temperature combustion in diesel engine under a medium EGR, Applied Energy, 2016, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916310340>
139. Suhan Park, Hyung Jun Kim, Dal Ho Shin, Jong-Tae Lee, Effects of various split injection strategies on combustion and emissions characteristics in a single-cylinder diesel engine, Applied Thermal Engineering, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.025> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117362063>
140. R. Sindhu, G. Amba Prasad Rao, K. Madhu Murthy, Effective reduction of NOx emissions from diesel engine using split injections, AEJ, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.06.009> ,
141. Plamen Punov1, Tsvetomir Gechev, Svetoslav Mihalkov, Pierre Podevin and Dalibor Barta, Experimental study of multiple pilot injection strategy in an automotive direct injection diesel engine, MATEC, 2018, https://www.matec-conferences.org/articles/matec-conf/pdf/2018/93/matecconf_bultrans2018_03007.pdf
142. K. Mathivanan, J. M. Mallikarjuna, A. Ramesh, Influence of multiple fuel injection strategies on performance and combustion characteristics of a diesel fuelled HCCI engine – An experimental investigation, Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.05.010> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177716301261>
143. Su, W., Wang, H., and Liu, B., "Injection Mode Modulation for HCCI Diesel Combustion," SAE Technical Paper 2005-01-0117, 2005, <https://doi.org/10.4271/2005-01-0117> <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2005-01-0117/>
144. Swami Nathan, S., Mallikarjuna, J., and Ramesh, A., "An Experimental Study Using Single and Multiple Injection Strategies in a Diesel Fuelled HCCI Engine with a Common Rail System," SAE Technical Paper 2009-26-0028, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-26-0028> <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2009-26-0028/>
145. Ming Zheng, Raj Kumar , Implementation of multiple-pulse injection strategies to enhance the homogeneity for simultaneous low-NOx and -soot diesel combustion , International Journal

- of Thermal Sciences , 2009, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.02.009>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072909000209>
146. Panagiotis Kontoulis, Christos Chryssakis and Lambros Kaiktsis, Evaluation of Pilot Injections in a Large Two-Stroke Marine Diesel Engine, Using CFD and T-φ Mapping , DE3-1, 2008, <http://dx.doi.org/10.1299/jmsesdm.2008.7.181>
 147. María Isabel Lamas Galdo, Laura Castro-Santos and Carlos G. Rodríguez Vidal, Selection of an Appropriate Pre-Injection Pattern in a Marine Diesel Engine Through a Multiple-Criteria Decision Making Approach, MDPI, 2020, <https://doi.org/10.3390/app10072482>
 148. Maria Isabel Lamas, Juan de Dios Rodríguez, Laura Castro-Santos, Luis Manuel Carral , Effect of multiple injection strategies on emissions and performance in the Wärtsilä 6L 46 marine engine. A numerical approach , Journal of Cleaner Production , 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.165> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618328889?via%3Dihub#bib17>
 149. Frengki Mohamad Felayati, Semin, Muhammad Badrus Zaman, Ayudhia Pangestu Gusti, Consideration of Split Injection Strategy for Marine Diesel Engine Combustion Process, AIP Conference Proceedings, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5095326>
 150. Kenji Amagai, Yukihiko Hashimoto, Masataka Arai, Ignition and combustion characteristics of two-stage injection diesel spray, JSAE Review, 1999, [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(99\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(99)00023-5) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0389430499000235?via%3Dihub>
 151. Xiangrong Li, Haobu Gao, Luming Zhao, Zheng Zhang, Xu He, Fushui Liu, Combustion and emission performance of a split injection diesel engine in a double swirl combustion system, Energy, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.092> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216312051?via%3Dihub>
 152. Matteo Imperato, Ossi Kaario, Teemu Sarjovaara, Martti Larmi , Split fuel injection and Miller cycle in a large-bore engine , Applied Energy , 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.041> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915012684?via%3Dihub>
 153. Ανδρέας – Μίνως, Γ. Ζομπανάκης , Μελέτη και βελτιστοποίηση φαινομένων καύσης σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel, DSpace NTUA, 2010, <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.5647>
 154. Panagiotis Andreadis, Christos Chryssakis, Lambros Kaiktsis, Optimization of Injection Characteristics in a Large Marine Diesel Engine Using Evolutionary Algorithms, SAE International, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-1448>
 155. P Andreadis, A Zompanakis, C Chryssakis, and L Kaiktsis, Effects of the fuel injection parameters on the performance and emissions formation in a large-bore marine diesel engine, International Journal of Engine Research, 2011, <https://www.deepdyve.com/lp/sage/effects-of-the-fuel-injection-parameters-on-the-performance-and-i0Ia6onYX0?key=sage>
 156. Haifeng Liu | Jingrui Li| Jietuo Wang | Chaohui Wu | Bo Liu | Jingjin Dong | Teng Liu | Ying Ye | Hu Wang | Mingfa Yao, Effects of injection strategies on low-speed marine engines using the dual fuel of high-pressure direct-injection natural gas and diesel , Energy & Science Engineering, 2019, <https://doi.org/10.1002/ese3.406>
 157. R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas, C.D. Rakopoulos , Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine , Energy Conversion and Management , 2007, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.003> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890407002129?via%3Dihub>
 158. Mingfa Yao, Zhaolei Zheng, Haifeng Liu , Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines , Progress in Energy and Combustion Science , 2009, <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.05.001> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000197#bib197>
 159. P. KRISHNA, A. K. BABU, A. P. SINGH, A. A. RAJ, REDUCTION OF NO_x IN A DIESEL ENGINE USING SPLIT INJECTION APPROACH, Journal of Engineering Science and Technology, 2015, [http://jestec.taylors.edu.my/Vol%2010%20issue%205%20May%202015/Vol-ume%20\(10\)%20Issue%20\(5\)%20552-570.pdf](http://jestec.taylors.edu.my/Vol%2010%20issue%205%20May%202015/Vol-ume%20(10)%20Issue%20(5)%20552-570.pdf)

160. Dr. K. Bala Showry, Dr. P. Ravidrer Reddy, Reducing Particulate and NOX Emissions by Using Split Injection, International Journal of Science and Research (IJSR), 2013, <https://www.ijsr.net/archive/v4i3/SUB152252.pdf>
161. Emmanouil Pananakis , Panagiotis Kontoulis , Christos Chryssakis and Lambros Kaiktsis, Investigation of Fuel Injection Strategies for Partially Premixed Compression Ignition Combustion in Two-Stroke Marine Diesel Engines, ILASS, 2013, <https://scholar.google.gr/scholar?oi=bibs&cluster=274847563396910813&btnI=1&hl=en>
162. Kaiktsis, L., "Numerical Simulation of Flow and Combustion in the RTA58 Engine of Wärtsilä NSD: Different Injection Configurations", Technical report, 2001.
163. J. M. Desantes , V. Bermúdez , J. V. Pastor & E. Fuentes (2006) Investigation of the Influence of Post-Injection on Diesel Exhaust Aerosol Particle Size Distributions, Aerosol Science and Technology, 40:1, 80-96, DOI: 10.1080/02786820500466583 <https://doi.org/10.1080/02786820500466583> <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02786820500466583>
164. Li, J., Chae, J., Lee, S., and Jeong, J., "Modeling the Effects of Split Injection Scheme on Soot and NO Emissions of Direct Injection Diesel Engines by a Phenomenological Combustion Model," SAE Technical Paper, 1996, <https://doi.org/10.4271/962062> <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/962062/>
165. J Benaje, S Molina, R Novella, and K DeRudder, Influence of injection conditions and exhaust gas recirculation in a high-speed direct-injection diesel engine operating with a late split injection, IMechE, 2008, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.914.6096&rep=rep1&type=pdf>
166. S. Jafarmadar, The effect of Split Injection on the Combustion and Emissions in DI and IDI Diesel Engines, Diesel Engine, 2013, <https://www.intechopen.com/books/diesel-engine-combustion-emissions-and-condition-monitoring/the-effect-of-split-injection-on-the-combustion-and-emissions-in-di-and-idi-diesel-engines>
167. Li, J., Chae, J., Lee, S. and Jeong, J.S., "Modeling the Effects of Split Injection Scheme on Soot and NOx Emissions of Direct Injection Diesel Engines by a Phenomenological Combustion Model", SAE Paper, (1996), <https://doi.org/10.4271/962062>
168. Tow, T.C. and Piperpont, D.A., "Reducing Particulate and NOx Emissions by using Multiple Injections in a Heavy duty DI Diesel Engine", SAE Paper, (1995), <https://doi.org/10.4271/940897>
169. Patterson, M.A., Kong, S., Hampson, G.J. and Reitz, R.D., "Modeling the Effects of Fuel Injection Characteristics on Diesel Engine Soot and NOx Emissions", SAE Paper, (1994), <https://www.jstor.org/stable/44632839>
170. O'Connor, J. and Musculus, M. "Post Injections for Soot Reduction in Diesel Engines: A Review of Current Understanding," SAE Int. J. Engines: SAE International 2013, doi:10.4271/2013-01-0917, https://www.mne.psu.edu/rfdl/Pubs/Refereed/2013_OConnor_IJE2.pdf ;
171. Yan Wu, Pan Wang, Sheikh Muhammad Farhan, Jing Yi, Lili Lei, Effect of post-injection on combustion and exhaust emissions in DI diesel engine, Fuel, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116131> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119314851>
172. Desantes, José M., et al. "A Comprehensive Study of Diesel Combustion and Emissions with Post-Injection." SAE Transactions, 2007, JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/44699296>
173. Wenyi Liu, Chonglin Song, Effect of post injection strategy on regulated exhaust emissions and particulate matter in a HSDI diesel engine, Fuel, 2016, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116306597?via%3Dihub> <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.057>
174. Marko Jeftić, Ming Zheng, A study of the effect of post injection on combustion and emissions with premixing enhanced fueling strategies, Applied Energy, 2015, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915002299> <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.052>
175. Zunqing Zheng, Lang Yue, Haifeng Liu, Yuxuan Zhu, Xiaofan Zhong, Mingfa Yao, Effect of two-stage injection on combustion and emissions under high EGR rate on a diesel engine by

- fueling blends of diesel/gasoline, diesel/n-butanol, diesel/gasoline/n-butanol and pure diesel , Energy Conversion and Management, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.011>
176. Vasileios Stratsianis ; Panagiotis Kontoulis ; and Lambros Kaiktsis, Effects of Fuel Post-Injection on the Performance and Pollutant Emissions of a Large Marine Engine , Journal of Energy Engineering, 2016, <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000337>
 177. Balaji Mohan, Wenming Yang, Siaw kiang Chou, Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.051>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005911?via%3Dihub>
 178. Meloni, R.; Naso, V. An Insight into the Effect of Advanced Injection Strategies on Pollutant Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine. *Energies* 2013, <https://doi.org/10.3390/en6094331>
<https://www.mdpi.com/1996-1073/6/9/4331/htm>
 179. Κ. Δουλαδάρης, Υπολογιστική Μελέτη Σχηματισμού Σωματιδίων Αιθάλης σε Ναυτικούς Κινητήρες Diesel, ΕΜΠ , Αθήνα, 2010, https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3443/douladirisk_soot.pdf?sequence=3
 180. Tow, T., Pierpont, D., and Reitz, R., "Reducing Particulate and NOx Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine," SAE Technical Paper 940897, 1994, <https://doi.org/10.4271/940897> <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/940897/>
 181. S. d'Ambrosio, A. Ferrari, Potential of multiple injection strategies implementing the after shot and optimized with the design of experiments procedure to improve diesel engine emissions and performance, Applied Energy, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.124>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915007631>
 182. S. d'Ambrosio, A. Ferrari, Potential of double pilot injection strategies optimized with the design of experiments procedure to improve diesel engine emissions and performance, Applied Energy, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.050> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915008089?via%3Dihub>
 183. S. Hassanzadeh Saraei, S. Jafarmadar, S. Khalilarya, H. Taghavifar, Effects of Triple Injection Strategies on Performance and Pollutant Emissions of a DI Diesel Engine Using CFD Simulation, International Journal of Engineering, 2018, http://www.ije.ir/article_73205_ad6954a77200abf70a4e5b1371fe401c.pdf
 184. Diwakar, R. and Domenech-Llopis, V., "Physics of Combustion Noise Reduction with Multiple Injections in a DI Diesel Engine - A Computational Study," SAE Technical Paper 2017-01-0566, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-0566>. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2017-01-0566/>
 185. Νικόλαος Γ. Ξανθούλης, Υπολογιστική Μελέτη Στρατηγικών Έγχυσης Καυσίμου με Παρουσία Ανακυκλοφορίας Καυσαερίου σε Δίχρονο Ναυτικό Κινητήρα Diesel , DSpace NTUA, 2017, <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.7526>
 186. P. Kontoulis, Computational Study and Optimization of Flow and Combustion Processes in Marine Engines Operating with Heavy Fuel Oil, DSpace NTUA, 2020, <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.18636>
 187. HASSAN A. MAZI , COUPLING OF CHEMICAL KINETICS WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN A THREE-DIMENSIONAL ENGINE MODEL , Urbana, Illinois , 2009, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.4489&rep=rep1&type=pdf>
 188. A. A. Amsden , P. J. O'Rourke , T. D. Butler, KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays , Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 1989, https://www.lanl.gov/projects/feynman-center/deploying-innovation/intellectual-property/software-tools/kiva/_assets/docs/KIVA2.pdf
 189. German Andreas Weisser , Modelling of Combustion and Nitric Oxide Formation for Medium-Speed DI Diesel Engines: A Comparative Evaluation of Zero- and Three-Dimensional Approaches , A thesis submitted to the SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH , ETH Zurich, 2001, <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/146109/eth-25052-02.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

190. F. X. Tanner and G. Weisser, 'Simulation of Liquid Jet Atomization for Fuel Sprays by Means of a Cascade Drop Breakup Model', SAE Technical Paper 980808 , 1998, <https://doi.org/10.4271/980808>
191. G. Weisser, F. X. Tanner, and K. Boulouchos, 'Modeling of Ignition and Early Flame Development with Respect to Large Diesel Engine Simulation', SAE Technical Paper 981451 , 1998, <https://doi.org/10.4271/981451>
192. F. X. Tanner, 'Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of NonEvaporating Diesel Fuel Sprays', SAE Transactions, Journal of Engines, 1997, <https://www.jstor.org/stable/44730666>
193. Franz X. Tanner, Guang-Sheng Zhu, Rolf D. Reitz , Emission Predictions In Diesel Engines Using A Non-Equilibrium Turbulence Dissipation Correction For The K-" Model, SAE Congress March, 2002, <https://www.yumpu.com/en/document/view/36457662/emission-predictions-in-diesel-engines-using-a-non-equilibrium->
194. T. Hiroyasu, M. Miki, J. Kamiura, S. Watanabe, and H. Hiroyasu, 'Multi-objective optimization of diesel engine emissions and fuel economy using genetic algorithms and phenomenological model', SAE Technical Paper, 2002, <http://dx.doi.org/10.4271/2002-01-2778>
195. Hiroyuki HIROYASU, Toshikazu KADOTA, Masataka ARAI, Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions : Part 1 Combustion Modeling, Bulletin of JSME, 1983, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/26/214/26_214_569/pdf/-char/en <https://doi.org/10.1299/jsme1958.26.569>
196. European Commission Directorate General Environment, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b – NOX Abatement, Final Report, August 2005, Entec UK Limited, <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/ENTEC-costs-and-effects-of-NOx-abatement-techniques-2005.pdf>
197. Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Further Reduction of Sulphur Emissions. Oslo, 14 June 1994 [Ch_XXVII_01_ep.pdf \(un.org\)](#)
198. Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Further Reduction of Sulphur Emissions Oslo, 14 June 1994, [XXVII-1-e.en.pdf \(un.org\)](#)
199. ADJUSTMENT TO ANNEX II TO THE 1999 GOTHENBURG PROTOCOL TO ABATE ACIDIFICATION, EUTROPHICATION AND GROUND-LEVEL OZONE Annex II https://unece.org/sites/default/files/2021-10/fYROM.Göthenburg_Annex_II.E_us.pdf