



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΝΤΑΖΗΣ

**Ανάπτυξη μοντέλου καύσης βαρέος καυσίμου
για εφαρμογή σε ναυτικούς κινητήρες Diesel**

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Α. Καϊκτσής, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη: Ν. Κυρτάτος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. Φραγκόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με θέματα έρευνας των ναυτικών κινητήρων Diesel, καθώς και για τη θερμή υποστήριξή του. Η ενθάρρυνση και υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας αποδείχτηκαν απαραίτητες για την περάτωση αυτής της προσπάθειας.

Εξωριστά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιστημονικό Συνεργάτη κ. Χρ. Χρυσάκη, για την υπομονετική καθοδήγηση και βοήθεια που μου προσέφερε, καθώς και για το άριστο κλίμα συνεργασίας. Η αμέριστη υποστήριξή του σε όλα τα επίπεδα ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ν. Κυρτάτο και τον Καθηγητή κ. Χρ. Φραγκόπουλο ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους συμφοιτητές μου, καθώς και όσους με βοήθησαν άμεσα ή έμμεσα κατά τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου, για τη συμπαράσταση, την κατανόηση και την υπομονή τους.

Σύνοψη

Οι αργόστροφοι και μεσόστροφοι ναυτικοί κινητήρες Diesel προσφέρουν τη δυνατότητα λειτουργίας με χρήση βαρύτερων κλασμάτων διύλισης του πετρελαίου. Η επιβολή ολοένα αυστηρότερων κανονισμών για τις εκπομπές ρύπων από τους ναυτικούς κινητήρες καθιστά αναγκαία την εξέλιξη των ναυτικών κινητήρων Diesel, με γνώμονα τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Σήμερα, η εξέλιξη των κινητήρων μπορεί να υποστηριχθεί από εργαλεία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Για την ακριβή προσομοίωση της θερμορευστομηχανικής των κινητήρων με χρήση βαρέος καυσίμου, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη κατάλληλων φυσικών μοντέλων, και η πιστοποίησή τους με πειραματικά δεδομένα.

Στην παρούσα εργασία εξελίσσεται ένα μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, ώστε να περιγράψει την καύση ενός αντιπροσωπευτικού βαρέος καυσίμου σε εφαρμογές της ναυτιλίας. Το μοντέλο χρησιμοποιεί θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου με βάση πρόσφατη εργασία (Κυριακίδης, 2009), και υποθέτει την ύπαρξη ενός ελαφρού τμήματος και ενός τμήματος καταλοίπων στο καύσιμο. Το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3, και προσδιορίζονται οι παράμετροί του, με χρήση πειραματικών δεδομένων καύσης spray βαρέος καυσίμου σε μικρούς θαλάμους καύσης σταθερού όγκου. Για τους εν λόγω θαλάμους, τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι σε καλή συμφωνία με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας.

Επίσης, το νέο μοντέλο χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της καύσης σε μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel, σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Επιπλέον, επιχειρείται η βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης με παρουσία προέγχυσης, με σύζευξη του κώδικα KIVA-3 με το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY, το οποίο βασίζεται σε εξελικτικούς αλγορίθμους. Τα αποτελέσματα είναι σε ποιοτική συμφωνία με πρόσφατη μελέτη για χρήση καυσίμου Diesel (Ανδρεάδης, 2008), και υποδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω εξέλιξης του μοντέλου για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές μεγάλων ναυτικών κινητήρων.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	9
1.1	Εκπομπές Ρύπων Ναυτικών Κινητήρων και Κανονισμοί.....	9
1.2	Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	11
2	Θεμελιώδεις έννοιες.....	13
2.1	Δίχρονος ναυτικός κινητήρας - Αρχή λειτουργίας.....	13
2.2	Σύστημα Κοινού Συλλέκτη.....	15
2.3	Χαρακτηριστικά του Κινητήρα RT-flex58T-B.....	18
2.4	Εγκάρσια συστροφή του αέρα (Swirl).....	19
2.5	Ναυτιλιακά καύσιμα.....	19
2.5.1	Φυσικές Ιδιότητες.....	20
2.5.2	Χημική Σύσταση Καυσίμου.....	21
2.6	Σχηματισμός ρύπων.....	27
2.6.1	Σχηματισμός NO _x	28
2.6.2	Σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης.....	29
3	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	30
3.1	Μοντελοποίηση φαινομένων ροής και καύσης με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	30
3.1.1	Κώδικας KIVA-3.....	30
3.1.2	Μοντέλο Καυσίμου.....	31
3.1.3	Μοντέλα καύσης.....	31
3.1.4	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Rate Of Heat Release – ROHR).....	33
3.2	Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης.....	37
3.2.1	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms - EA).....	37
3.2.2	Κωδικοποίηση μεταβλητών σχεδίασης.....	38
3.2.3	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση.....	39
3.2.4	Σύζευξη του κώδικα CFD KIVA-3 και του λογισμικού βελτιστοποίησης EASY.....	40
3.2.5	Ρύθμιση παραμέτρων βελτιστοποιητή EASY.....	41
4	Μοντελοποίηση καύσης βαρέος καυσίμου.....	43
4.1	Εισαγωγή.....	43
4.2	Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	43
4.2.1	Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα VCVCC – Struckmeier et al., 2009.....	44
4.2.2	Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα FIA – Struckmeier et al., 2009.....	45

4.2.3	Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα CVCC – Goldsworthy, 2005.	46
4.2.4	Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα FIA – Goldsworthy, 2005	49
4.2.5	Θάλαμος καύσης σταθερού όγκου με συνθήκες αντίστοιχες μεγάλου ναυτικού κινητήρα Diesel.....	51
4.3	Προσομοίωση της Καύσης σε Θαλάμους Καύσης Σταθερού Όγκου	53
4.3.1	Μοντελοποίηση Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA)	54
4.3.2	Μοντελοποίηση Θαλάμου Καύσης Σταθερού Όγκου με Δυνατότητα Οπτικοποίησης (VCVCC)	62
4.4	Προσομοίωση περίπτωσης αναφοράς στον κινητήρα RT-flex58T-B της Wärtsilä ...	67
5	Βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρα με βαρύ καύσιμο	71
5.1	Εισαγωγή.....	71
5.1.1	Προφίλ έγχυσης.....	71
5.1.2	Χάρτες T – φ.....	73
5.2	Βιβλιογραφική επισκόπηση: βελτιστοποίηση προφίλ έγχυσης καυσίμου Diesel	74
5.3	Βελτιστοποίηση προφίλ έγχυσης βαρέος καυσίμου.....	77
5.3.1	Αποτελέσματα Προβλήματος χωρίς Περιορισμούς	77
6	Συμπεράσματα - προτάσεις	97
7	Βιβλιογραφία.....	99

1 Εισαγωγή

1.1 Εκπομπές Ρύπων Ναυτικών Κινητήρων και Κανονισμοί

Στη σύγχρονη εποχή, η έντονη βιομηχανική δραστηριότητα έχει επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον με αέριους ρύπους. Ένας από τους παράγοντες που συντελούν στη ρύπανση του περιβάλλοντος είναι οι εκπομπές ρύπων από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Πιο συγκεκριμένα, στους ναυτικούς κινητήρες οφείλεται το 15% της συνολικής παγκόσμιας έκλυσης οξειδίων του αζώτου (NO_x) (Lloyds, 1992). Εξαιτίας του χαμηλού του κόστους, το καύσιμο που χρησιμοποιούν οι ναυτικοί κινητήρες για τη λειτουργία τους είναι βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο χαμηλής ποιότητας, με αποτέλεσμα τα αυξημένα επίπεδα εκπομπών ρύπων. Σε μια πρώτη εναλλακτική θεώρηση, η χαμηλή ποιότητα καυσίμου μπορεί να συνεπάγεται χαμηλότερες θερμοκρασίες εντός του θαλάμου, άρα και χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών NO_x . Οι αρμόδιοι διεθνείς οργανισμοί έχουν δραστηριοποιηθεί, με συνέπεια να θέτουν όρια στα επίπεδα των εκπομπών των ναυτικών κινητήρων. Οι κατασκευαστές κινητήρων αντιμετωπίζουν τη συνεχή μείωση των επιτρεπτών τιμών των ρύπων αναζητώντας τρόπους ώστε οι νέοι κινητήρες να ανταποκρίνονται στους νέους κανονισμούς εκπομπών. Η αριθμητική προσομοίωση των διεργασιών ροής και καύσης στους κινητήρες Diesel με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στον τομέα της έρευνας για τη μείωση των ρύπων.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας IMO (International Maritime Organization) έθεσε σε εφαρμογή το 2005 το Παράρτημα VI των κανονισμών MARPOL (Marine Pollution) με τίτλο “Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships”, γνωστό και ως MARPOL 73/78. Στο Παράρτημα VI θέτονται όρια για την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο και τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x). Τα όρια των εκπομπών αναφέρονται συνήθως ως Tier I, II, III (IMO 2004). Τα όρια του Tier I αναφέρονται στην έκδοση του 1997 του κεφαλαίου VI, ενώ τα όρια των Tier II και Tier III εισήχθησαν από τροποποιήσεις που υιοθετήθηκαν το 2008. Οι περιοχές στις οποίες αναφέρονται τα όρια κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, (α) σε παγκόσμιο επίπεδο και (β) στις προστατευόμενες περιοχές, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν περιοχές κοντά σε λιμάνια (Emission Control Areas - ECAs) (IMO 2004). Στις ECAs, η περιεκτικότητα του χρησιμοποιούμενου καυσίμου σε θείο δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 15000 ppm, ενώ αναμένεται το όριο αυτό να μειωθεί αρκετά μετά το 2010.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1-1, ανάλογα με τη χρονολογία εγκατάστασής τους, οι κινητήρες θα πρέπει να είναι συμβατοί με το αντίστοιχο επίπεδο κανονισμών. Το επίπεδο Tier III αναφέρεται στις προστατευόμενες περιοχές - ECAs.

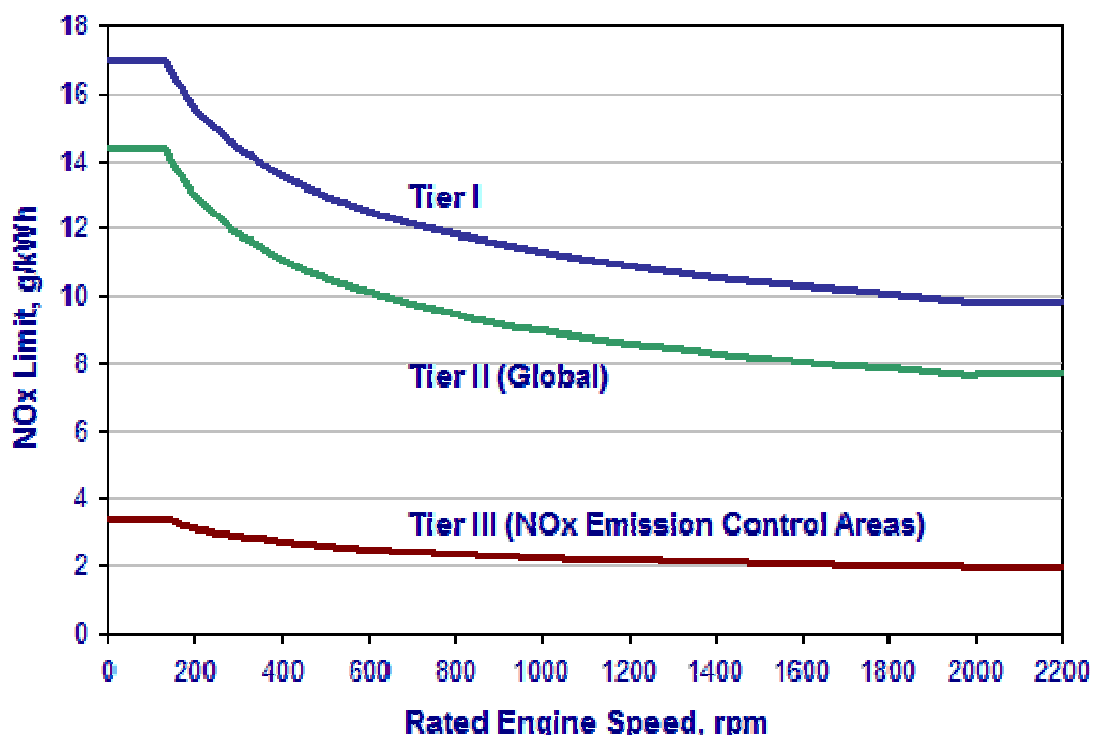
Πίνακας 1-1: Επιτρεπόμενα επίπεδα εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) σύμφωνα με τον οργανισμό IMO (International Maritime Organization), για διαφορετικές περιοχές της ονομαστικής συχνότητας περιστροφής, n , του κινητήρα, σε RPM (IMO 2004).

Tier	Date	NO_x Limit, g/kWh		
		$n < 130$	$130 \leq n < 2000$	$n \geq 2000$
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III (ECAs)	2016	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

Τα όρια του Tier II αναμένεται να ικανοποιηθούν με βελτίωση της διεργασίας της καύσης. Εν προκειμένω, οι παράμετροι που αναμένεται να έχουν ουσιαστική επίδραση περιλαμβάνουν τον χρονισμό έγχυσης καυσίμου, το προφίλ έγχυσης και τον χρονισμό των βαλβίδων εξαγωγής.

Τα όρια του Tier III αναμένεται να ικανοποιηθούν με χρήση περισσότερο σύνθετων τεχνικών μείωσης των εκπομπών NO_x , όπως η εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης, η ανακύκλωση καυσαερίων και η εγκατάσταση καταλυτών.

Στο Σχήμα 1-1, παριστάνονται σχηματικά τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών NO_x συναρτήσει του ονομαστικού αριθμού στροφών του κινητήρα, σύμφωνα με τα Tier I, II, III των κανονισμών του IMO.



Σχήμα 1-1: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπών NO_x συναρτήσει του ονομαστικού αριθμού στροφών του κινητήρα σύμφωνα με Tier I, II, III του IMO (www.dieselnets.com).

Οι διατάξεις του Κεφαλαίου VI περιλαμβάνουν όρια αναφορικά με την περιεκτικότητα θείου στα καύσιμα. Τα επιτρεπόμενα όρια περιεκτικότητας σε θείο καθώς και οι ημερομηνίες εφαρμογής τους αναφέρονται στον Πίνακα 1-2.

Πίνακας 1-2: Επιτρεπόμενα όρια περιεκτικότητας θείου σε καύσιμα σύμφωνα με το Annex VI της MARPOL (IMO, 2004).

MARPOL Annex VI Fuel Sulfur Limits		
Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SOx ECA	Global
2000	1.50%	4.50%
2010.07	1.00%	
2012		3.50%
2015	0.10%	
2020		0.50%

Συμπληρωματικά, το Παράρτημα VI απαγορεύει εκπομπές οι οποίες καταστρέφουν το όζον εξαιτίας της περιεκτικότητάς τους σε αλογόνα και CFCs (chlorofluorocarbons). Νέες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν ουσίες που καταστρέφουν το όζον απαγορεύονται, για όλα τα πλοία. Νέες εγκαταστάσεις που περιέχουν HCFCs (hydrochlorofluorocarbons) επιτρέπονται μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2020.

Η συμμόρφωση προς τις απαιτήσεις του Παραρτήματος VI θα ελέγχεται από σχετικές επιθεωρήσεις. Στις περιπτώσεις θετικής έκβασης, θα χορηγείται στο πλοίο το πιστοποιητικό “International Air Pollution Prevention Certificate”, με ισχύ 5 έτη.

1.2 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με απώτερο σκοπό την υπολογιστική προσομοίωση της λειτουργίας του δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel RT-flex58T-B της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland με χρήση βαρέος καυσίμου (Heavy Fuel Oil – HFO). Επίσης έγινε βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης καυσίμου, με στόχο τη μείωση των ρύπων και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Η χρήση βαρέος καυσίμου επηρεάζει τη συμπεριφορά του κινητήρα. Ο όρος βαρύ καύσιμο περιγράφει ένα ευρύ φάσμα καυσίμων διαφορετικής ποιότητας. Εδώ, μελετάται η μοντελοποίηση της καύσης ενός αντιπροσωπευτικού βαρέος καυσίμου που χρησιμοποιείται σε πραγματικές συνθήκες σε εφαρμογές ναυτιλίας. Εν προκειμένω, χρησιμοποιείται μοντέλο θερμοφυσικών ιδιοτήτων που αναπτύχθηκε πρόσφατα (Κυριακίδης, 2009), σε συνδυασμό με το μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου (Kong et al., 1995), το οποίο τροποποιείται κατάλληλα για καύση βαρέος καυσίμου. Το τροποποιημένο μοντέλο εισάγεται στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3. Η ρύθμιση των σταθερών του μοντέλου γίνεται με χρήση πειραματικών δεδομένων σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου.

Η προσομοίωση της διεργασίας της καύσης με χρήση βαρέος καυσίμου γίνεται για την περίπτωση βραδύστροφου υπερπληρούμενου κινητήρα Diesel της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επιχειρείται η βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης με σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με λογισμικό βελτιστοποίησης, βασισμένο σε

γεννητικούς αλγορίθμους, με στόχο την ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών NO_x και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Οι βέλτιστες λύσεις προκύπτουν σύμφωνα με τη μέθοδο της κυριαρχίας κατά Pareto.

Επιλεγμένες βέλτιστες λύσεις αναλύονται περαιτέρω, με στόχο την πληρέστερη κατανόηση των θερμοφυσικών διεργασιών εντός του κυλίνδρου. Στο πλαίσιο της επεξεργασίας των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, γίνεται ανάλυση της επίδρασης του προφίλ έγχυσης στον σχηματισμό σωματιδίων αιθάλης με χρήση χαρτών T-φ (χάρτες θερμοκρασίας - λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα).

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη: Στο *Κεφάλαιο 2*, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας του δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, το σύστημα έγχυσης κοινού συλλέκτη, αναφέρονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη κινητήρα, και αναλύονται οι ιδιότητες των ναυτλιακών καυσίμων και οι μηχανισμοί σχηματισμού και εκπομπής ρύπων. Στο *Κεφάλαιο 3*, γίνεται αναφορά στη βασική θεωρία των μεθόδων βελτιστοποίησης, και στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 και τη σύζευξή του με το λογισμικό βελτιστοποίησης. Επίσης αναλύονται τα μοντέλα (α) θερμοφυσικών ιδιοτήτων του καυσίμου και (β) καύσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στο *Κεφάλαιο 4*, γίνεται αρχικά μια βιβλιογραφική αναφορά σε προγενέστερες μελέτες με αντικείμενο το βαρύ καύσιμο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η υπολογιστική διαδικασία και αντίστοιχα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις της ροής και καύσης σε δύο θαλάμους καύσης σταθερού όγκου, καθώς και στον κινητήρα RT-flex58T-B. Εν προκειμένω, οι παράμετροι του μοντέλου καύσης ρυθμίστηκαν με βάση πειραματικά αποτελέσματα για τους δύο θαλάμους καύσης σταθερού όγκου. Στο *Κεφάλαιο 5*, παρουσιάζεται η επίδραση του προφίλ έγχυσης στον σχηματισμό σωματιδίων αιθάλης με βάση τους χάρτες T-φ, γίνεται μια βιβλιογραφική αναφορά σχετικά με τη βελτιστοποίηση παραμέτρων έγχυσης σε ναυτικούς κινητήρες Diesel, και ακολουθούν τα υπολογιστικά αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης του κινητήρα RT-flex58T-B με χρήση βαρέος καυσίμου. Στο *Κεφάλαιο 6*, αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα διπλωματική εργασία, και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, σε συνέχεια της παρούσας.

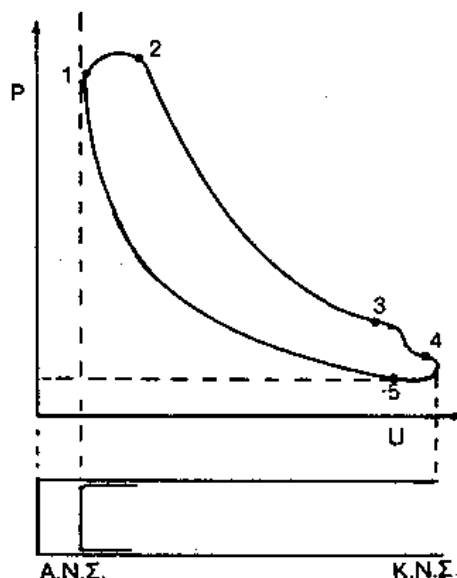
2 Θεμελιώδεις έννοιες

2.1 Δίχρονος ναυτικός κινητήρας - Αρχή λειτουργίας

Στο Σχήμα 2-1 παριστάνεται ένα πραγματικό διάγραμμα πίεσης - όγκου δίχρονου κινητήρα Diesel (Γιαννόπουλος, 1981).

Καύση

Η φάση της καύσης αντιστοιχεί στην περιοχή 1-2 του Σχήματος 2-1, από περίπου 5° πριν το Α.Ν.Σ. έως περίπου 20° μετά το Α.Ν.Σ. Ο αέρας έχει συμπιεστεί καθώς το έμβολο κινείται προς το Α.Ν.Σ., με αποτέλεσμα στον θάλαμο καύσης να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, δηλαδή συνθήκες κατά τις οποίες είναι δυνατή η αυτανάφλεξη του καυσίμου. Το υγρό καύσιμο εγχύεται στον θάλαμο καύσης, ατμοποιείται και αναμιγνύεται με τον συμπιεσμένο αέρα. Μετά από μια περίοδο καθυστέρησης της έναυσης, λαμβάνει χώρα η αυτανάφλεξη του καυσίμου, και έτσι αρχίζει η διεργασία της καύσης. Η πίεση στον θάλαμο αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό, και η φλόγα εξαπλώνεται καθώς συνεχίζεται η έγχυση καυσίμου, το οποίο εξατμίζεται και αναμιγνύεται με επαρκή ποσότητα αέρα ώστε να καεί.



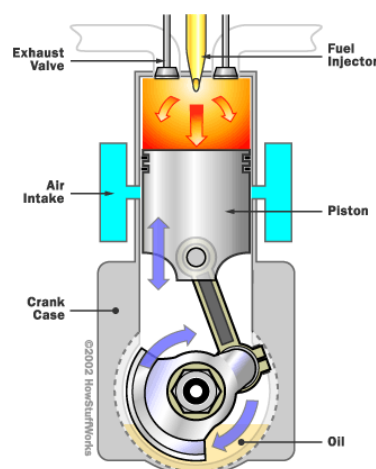
Σχήμα 2-1 : Πραγματικός κύκλος δίχρονου κινητήρα Diesel (Γιαννόπουλος 1981).

Εκτόνωση

Στην περιοχή 2-3 του Σχήματος 2-1 παρίσταται η φάση της εκτόνωσης, η οποία μπορεί να προσεγγιστεί με μια πολυτροπική μεταβολή.

Το έμβολο κινείται προς το Κ.Ν.Σ. από τις $20-35^{\circ}$ μετά το Α.Ν.Σ. έως περίπου τις 110° .

Το ωφέλιμο έργο του κύκλου αποδίδεται κατά τις φάσεις της καύσης και της εκτόνωσης,



Σχήμα 2-2: Σκαρίφημα κυλίνδρου δίχρονου κινητήρα Diesel.

Εξαγωγή

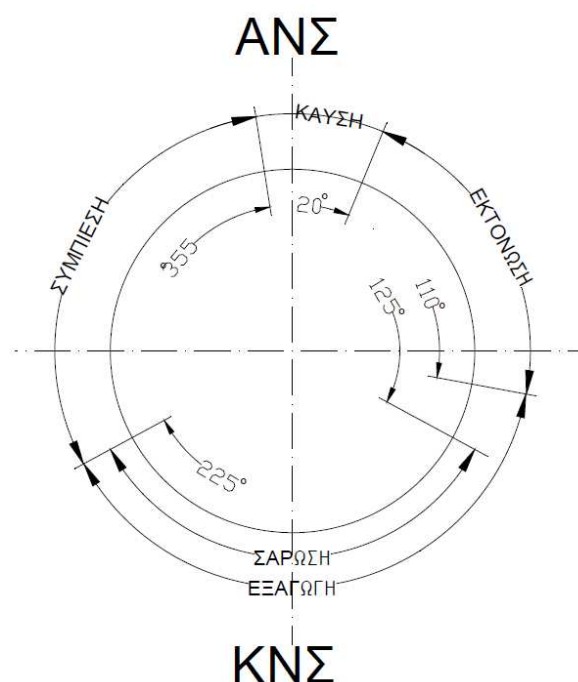
Η φάση της εξαγωγής φαίνεται στην περιοχή 3-4 του Σχήματος 2-1. Αφότου ανοίξει η βαλβίδα εξαγωγής, περίπου στις 110° μετά το Α.Ν.Σ., η πίεση στον κύλινδρο μειώνεται απότομα, καθώς τα καυσαέρια εξέρχονται του κυλίνδρου.

Σάρωση και εξαγωγή

Η φάση της σάρωσης φαίνεται στην περιοχή 4-5 του Σχήματος 2-1. Οι θυρίδες εισαγωγής αποκαλύπτονται περίπου στις 125° μετά το Α.Ν.Σ. και μένουν ανοικτές μέχρι τις 225° μετά το Α.Ν.Σ. Η πίεση στον θάλαμο γίνεται μικρότερη σε σχέση με την πίεση του συμπιεσμένου από τον υπερπληρωτή αέρα στις θυρίδες εισαγωγής, και έτσι ο αέρας ρέει εντός του κυλίνδρου παίρνοντας τη θέση των καυσαερίων, τα οποία συνεχίζουν να εξέρχονται του κυλίνδρου μέσω των βαλβίδων εξαγωγής. Η διαδικασία αυτή συναντάται και ως απόπλυση του κυλίνδρου.

Συμπίεση

Η φάση της συμπίεσης φαίνεται στην περιοχή 5-1 του Σχήματος 2-1, ακολουθώντας μια πολυτροπική μεταβολή. Η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει, οι θυρίδες εισαγωγής καλύπτονται, και έτσι ο εγκλωβισμένος στον κύλινδρο αέρας συμπιέζεται καθώς το έμβολο κινείται προς το Α.Ν.Σ. Καθώς ο όγκος μεταξύ κυλινδροκεφαλής και εμβόλου ολοένα και μειώνεται, προκαλείται αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα εντός του κυλίνδρου. Το χρονικό διάστημα από το Α.Ν.Σ. προς το Κ.Ν.Σ. ορίζει τον πρώτο χρόνο του κινητήρα, ο οποίος περιλαμβάνει τις φάσεις της καύσης, εκτόνωσης, έναρξης εξαγωγής και σάρωσης. Αντίστοιχα, το χρονικό διάστημα ανάμεσα στο Κ.Ν.Σ. και το Α.Ν.Σ. ορίζει τον δεύτερο χρόνο, ο οποίος περιλαμβάνει τις φάσεις του πέρατος της σάρωσης και εξαγωγής, και τη φάση της συμπίεσης (Κυρτάτος, 1993).



Σχήμα 2-3: Κύκλος λειτουργίας δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρούμενου ναυτικού κινητήρα (Ανδρεάδης, 2008).

2.2 Σύστημα Κοινού Συλλέκτη



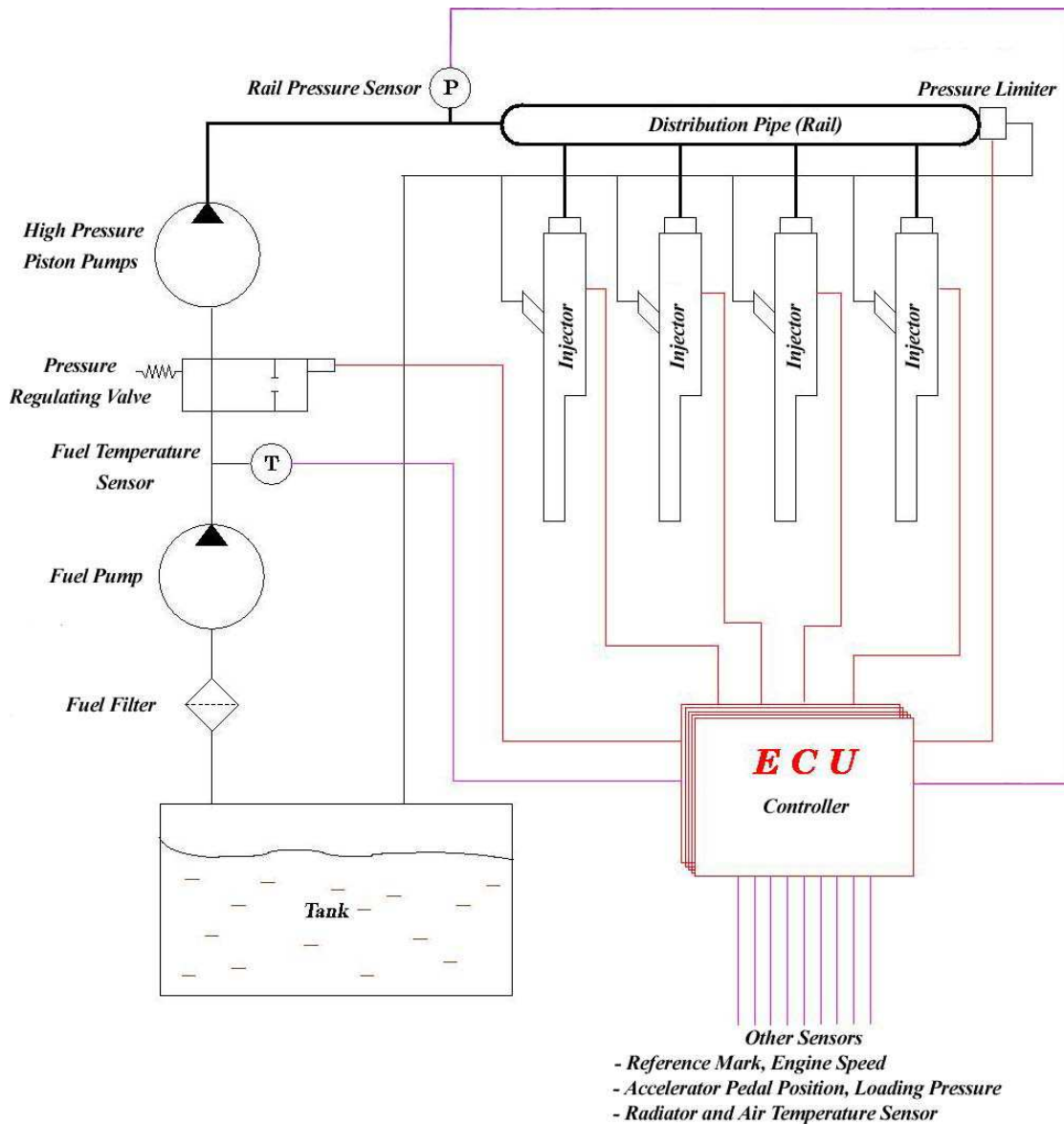
Σχήμα 2-4: Κινητήρας Sulzer 7RT-flex60C με εγκατάσταση συστήματος κοινού συλλέκτη CRS (Wärtsilä Switzerland Ltd, 2004).

Η αναφορά στο σύστημα κοινού συλλέκτη (Common Rail System – CRS) κρίνεται αναγκαία στην παρούσα διπλωματική εργασία εφόσον το CRS είναι το σύστημα το οποίο μας προσφέρει τη δυνατότητα επέμβασης στο προφίλ έγχυσης του καυσίμου. Η βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης θα ήταν αδύνατη με συστήματα μηχανικής έγχυσης.

Στο σύστημα κοινού συλλέκτη η πίεση έγχυσης, ο χρονισμός και η διάρκεια της έγχυσης καυσίμου, και συνεπώς η εγχυόμενη μάζα, ρυθμίζονται ηλεκτρονικά και με ακρίβεια. Επίσης καθίσταται δυνατός ο έλεγχος των παραμέτρων της έγχυσης για κάθε εγχυτήρα ξεχωριστά, ακόμη και σε εγχυτήρες του ίδιου κυλίνδρου. Δεν υπάρχει καμία εξάρτηση από τα έκκεντρα, άρα και από παραμέτρους όπως οι στροφές του κινητήρα, με αποτέλεσμα την καλύτερη καύση σε όλο το εύρος στροφών, και συνεπώς τη βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου, τη μείωση των ρύπων, και συνεπώς τον καθαρότερο θάλαμο καύσης λόγω μειωμένων επικαθίσεων, με συνέπεια την αυξημένη διάρκεια ζωής του κινητήρα. Τέλος, το σύστημα κοινού συλλέκτη παρέχει τη δυνατότητα πολλαπλών ψεκασμών ανά κύκλο, χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης. Η περιγραφή του συστήματος κοινού συλλέκτη που ακολουθεί αναφέρεται σε σύστημα κοινού συλλέκτη της εταιρείας Wärtsilä Switzerland.

Οι κύριες μονάδες που αποτελούν το σύστημα κοινού συλλέκτη είναι (Wärtsilä Switzerland Ltd, 2004):

- Μονάδα παροχής (Supply Unit)
- Φίλτρα ελαίου (Integrated Automatic Fine Oil Filter)
- Μονάδα συλλέκτη (Rail Unit)
- Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου έγχυσης (Injection Control Unit)
- Μονάδα ελέγχου βαλβίδων εξαγωγής (Exhaust Valve Actuator & Control Unit)



Σχήμα 2-5: Τυπική διάταξη συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS) (Wärtsilä Switzerland Ltd, 2004).

Μονάδα παροχής (Supply Unit)

Η μονάδα παροχής, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον στροφαλοφόρο άξονα, τροφοδοτεί το σύστημα κοινού συλλέκτη με καύσιμο και λάδι χρήσης των σερβομηχανισμών. Η μονάδα παροχής εγκαθίσταται κατά μήκος των κυλίνδρων. Οι αντλίες καυσίμου κινούνται από εκκεντροφόρο άξονα, ο οποίος είναι πιο κοντός και αρκετά μικρότερης διαμέτρου σε σχέση με τον κλασικό εκκεντροφόρο σε κινητήρες χωρίς σύστημα κοινού συλλέκτη. Μέσω των αντλιών, το συμπιεσμένο καύσιμο μεταφέρεται σε παρακείμενο συλλέκτη από τον οποίο μέσω δύο διπλότοιχων ανεξάρτητων αγωγών καταλήγει στον συλλέκτη καυσίμου.

Λάδι χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την ενεργοποίηση των βαλβίδων εξαγωγής. Η αντλία ελαίου χρήσης είναι μια ηλεκτροκίνητη αντλία, η οποία καταθλίβει το λάδι με σταθερή πίεση 200 bar στον συλλέκτη ελαίου.

Λάδι ελέγχου τροφοδοτείται σε σταθερή πίεση 200 bar για όλες τις ταχύτητες του κινητήρα μέσω δύο ηλεκτροκινούμενων αντλιών, μίας ενεργής και μίας εφεδρικής, οι οποίες διαθέτουν η καθεμία τη δική της ρυθμιστική βαλβίδα πίεσης.

Φίλτρα ελαίου (Integrated Automatic Fine Oil Filter)

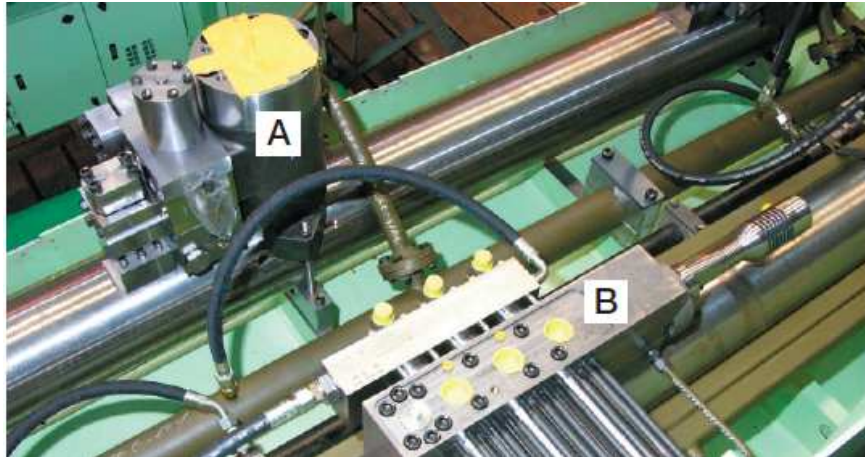
Το λάδι που χρησιμοποιείται από τη μονάδα παροχής λαμβάνεται από το κύριο σύστημα λίπανσης του κινητήρα. Μέσω ενός συστήματος καθαρισμού του ελαίου το οποίο περιλαμβάνει τοπικά φίλτρα, τροφοδοτικές αντλίες, ψυγεία και ιξωδόμετρα, επιτυγχάνεται ο καθαρισμός του λαδιού. Το λάδι, αφού πρώτα καθαρισθεί, οδηγείται στις αντίστοιχες αντλίες πίεσης.

Μονάδα συλλέκτη (Rail Unit)

Η μονάδα συλλέκτη βρίσκεται στο επίπεδο της πλατφόρμας στην κορυφή του κινητήρα, κάτω ακριβώς από το επίπεδο των κυλινδροκεφαλών. Περιλαμβάνει τις σωληνώσεις καυσίμου και ελαίου, αλλά όχι το σύστημα αέρα εκκίνησης του κινητήρα. Ο όγκος των αγωγών καυσίμου, καθώς και ο ρυθμός με τον οποίο καταθλίβουν οι αντλίες είναι με τέτοιο τρόπο υπολογισμένα, ώστε η διαφορά της πίεσης στον συλλέκτη καυσίμου μετά από κάθε έγχυση να είναι αμελητέα.

Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου έγχυσης (Injection Control Unit – ICU)

Το καύσιμο μεταφέρεται από τον συλλέκτη καυσίμου στους εγχυτήρες μέσω μιας ξεχωριστής για κάθε κύλινδρο μονάδας ελέγχου έγχυσης, η οποία ελέγχει με ακρίβεια τον χρονισμό της έγχυσης καυσίμου, την εγχυόμενη μάζα και το προφίλ έγχυσης.



Σχήμα 2-6: A. Exhaust Valve Actuator
B. Μονάδα ελέγχου έγχυσης (ICU) (Wärtsilä Switzerland Ltd, 2004)

Μονάδα ελέγχου βαλβίδων εξαγωγής (Exhaust Valve Actuator & Control Unit)

Η λειτουργία των βαλβίδων εξαγωγής ελέγχεται ηλεκτρονικά. Το σύστημα που ενεργοποιεί κάθε βαλβίδα εξαγωγής (Σχήμα 2-6) ελέγχει ηλεκτρονικά το άνοιγμα και το κλείσιμο των βαλβίδων εξαγωγής, τη στιγμή που αυτό απαιτείται, μέσω του δικτύου ελαίου χρήσης, όπως αυτό έχει περιγραφεί παραπάνω. Ο ηλεκτρονικός έλεγχος των βαλβίδων εξαγωγής προσφέρει πλήρη ευελιξία σχετικά με το ποια πρέπει να είναι η θέση των βαλβίδων κάθε στιγμή.

2.3 Χαρακτηριστικά του Κινητήρα RT-flex58T-B

Ο κινητήρας για τον οποίο πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγχυσης με χρήση βαρέος καυσίμου είναι ο δίχρονος βραδύστροφος υπερπληρούμενος κινητήρας Diesel RT-flex58T-B της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα αναγράφονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά κινητήρα RT-flex58T-B (Wärtsilä Switzerland Ltd., 2010).

ΤΥΠΟΣ	RT-flex58T-B
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΜΒΟΛΟΥ	580 mm
ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΕΜΒΟΛΟΥ	2416 mm
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	105 RPM
ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΒΟΛΟΥ	8.46 m/s
ΚΛΕΙΣΙΜΟ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ (ΑΠΟ Α.Ν.Σ)	-96°
ΑΝΟΙΓΜΑ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ (ΑΠΟ Α.Ν.Σ)	120°
ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ	Κοινού Συλλέκτη - CRS
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ	3
ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΠΩΝ ΑΝΑ ΕΓΧΥΤΗΡΑ	5
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΓΧΥΣΗΣ	15.2°
ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΧΥΣ ΑΝΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟ	2180 KW

Ο κινητήρας λειτουργεί με περίσσεια αέρα, και συγκεκριμένα με συνολικό λόγο ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα, $\varphi_{TOTAL} = 0.51$. Στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί γίνονται για το κλειστό τμήμα του κύκλου λειτουργίας, από -96° μέχρι 120° γωνίας στροφάλου, με αποτέλεσμα να μοντελοποιούνται μόνο οι φάσεις της συμπίεσης, της καύσης και της εκτόνωσης, όπου το έμβολο έχει καλύψει τις θυρίδες σάρωσης και η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή.

2.4 Εγκάρσια συστροφή του αέρα (Swirl)

Ο συμπιεσμένος αέρας που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης δημιουργεί μια στροβιλιζόμενη δομή, γιατί οι θυρίδες εισαγωγής διαμέσου των οποίων κατευθύνεται εντός του κυλίνδρου είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να τον οδηγούν όχι κάθετα προς τα τοιχώματα του θαλάμου, αλλά υπό κλίση. Επίσης οι εγχυτήρες τοποθετούνται και αυτοί υπό κλίση. Με την παρουσία της εγκάρσιας συστροφής του αέρα επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα και καλύτερη απόπλυση του θαλάμου από τα καυσαέρια. Για την ποσοτικοποίηση της έντασης του στροβιλισμού σε ένα κινητήρα, χρησιμοποιείται ο λόγος στροβιλισμού (swirl ratio), ο οποίος εκφράζεται ως το πηλίκο της γωνιακής ταχύτητας της ροής του στροβιλιζόμενου αέρα προς τη γωνιακή ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα του κινητήρα (Heywood, 1988).

$$R_s = \frac{\omega_s}{2\pi N}$$

Όπου ω_s η γωνιακή ταχύτητα της εγκάρσιας συστροφής, και N η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα.

2.5 Ναυτιλιακά καύσιμα

Στους περισσότερους μεγάλους ναυτικούς κινητήρες υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν καύσιμα μεταβλητής σύνθεσης και ποιότητας. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί καύσιμο Diesel, αλλά και βαρύ καύσιμο, HFO. Κριτήριο της επιλογής καυσίμου είναι κυρίως το κόστος, όμως πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η απόδοση και η αντοχή του κινητήρα, το κόστος συντήρησης, η πιθανότητα πρόωρων βλαβών, καθώς και η εκπομπή ρύπων (Χατζηλάου, 1978).

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται συνήθως στην ναυτιλία είναι βαρύ καύσιμο καταλοίπων (residual fuel), ή ελαφρύτερο απόσταγμα (Marine Diesel Oil). Η ποιότητά τους καθορίζεται από την προέλευση του αργού πετρελαίου, τον βαθμό και τον τρόπο διύλισης, τον βαθμό ανάμιξης με ελαφρύτερα αποστάγματα, και τον τρόπο μεταφοράς και αποθήκευσής τους. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να ορισθούν κάποιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά των καυσίμων που επιδρούν στη λειτουργία του κινητήρα Diesel.

2.5.1 Φυσικές Ιδιότητες

Ιξώδες

Το κινηματικό ιξώδες αποτελεί μέτρο της αντίστασης του καυσίμου σε ροή. Το ιξώδες ενός παραγώγου πετρελαίου μειώνεται όταν αυτό θερμαίνεται, με αποτέλεσμα την ευκολότερη ροή και τη δυνατότητα να διασπάζεται σε μικρότερα σταγονίδια κατά τον ψεκασμό. Μονάδα μέτρησης του ιξώδους είναι το cSt. Για να είναι εφικτή η άντληση του καυσίμου, το ιξώδες πρέπει να είναι μικρότερο από περίπου 1000 cSt, ενώ για τον διασκορπισμό του καυσίμου από τους εγχυτήρες το ιξώδες θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 8 – 27 cSt. Το ιξώδες μπορεί να αποτελέσει έναν δείκτη παρουσίας ασφαλικών ενώσεων και υπολειμμάτων άνθρακα, αφού μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται σε καύσιμα με υψηλότερο ιξώδες (SNAME, 1992). Με τη μέθοδο της προθέρμανσης του καυσίμου (το πολύ έως τους 150 °C) με σκοπό να μειωθεί το ιξώδες, βελτιώνεται και η δυνατότητα διαχωρισμού του νερού από το καύσιμο. Τα όρια της θερμοκρασίας προθέρμανσης θα πρέπει να τηρούνται αφού:

- Υψηλή θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσει βρασμό του πετρελαίου εντός των σωληνώσεων, με συνέπεια να κολλήσουν οι αντλίες καυσίμου.
- Χαμηλή θερμοκρασία, άρα υψηλό ιξώδες, μπορεί να προκαλέσει δυσκολία στη ροή του καυσίμου δια των αγωγών, και στον διασκορπισμό του καυσίμου στους εγχυτήρες, με συνέπεια την ελλιπή ατμοποίηση, την ανεπαρκή ανάμιξη με τον αέρα, και την πιθανή πρόσκρουση στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Για την ίδια αιτία μπορεί να παρουσιαστεί καθυστερημένη καύση, προβλήματα λίπανσης και φθορών στον κύλινδρο και στις βαλβίδες εξάγωγής λόγω αυξημένης θερμοκρασίας στο τέλος της εκτόνωσης.

Πυκνότητα

Η σπουδαιότητα της πυκνότητας ενός καυσίμου έγκειται στο γεγονός ότι οι βασικές τεχνικές διαχωρισμού νερού-καυσίμου βασίζονται στη διαφορά της πυκνότητας των δύο συστατικών. Υψηλή πυκνότητα παρουσιάζουν προϊόντα με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και αρωματικά, με υψηλό υπόλειμμα άνθρακα (Conradson number) και υψηλή περιεκτικότητα σε ασφαλικές ενώσεις. Ο συνδυασμός υψηλής πυκνότητας και χαμηλού ιξώδους είναι συνήθως ένδειξη καυσίμου χαμηλής ποιότητας ανάφλεξης και καύσης (SNAME, 1992).

Δείκτης Αρωματικότητας Υδρογονανθράκων (Calculated Carbon Aromaticity Index number - CCAI)

Στους κινητήρες Diesel υπάρχει πάντα μια καθυστέρηση μεταξύ της αρχής της έγχυσης και της έναυσης του καυσίμου. Τα χαρακτηριστικά της έναυσης ενός καυσίμου υποδεικνύονται από τον αριθμό κετανίου ή από τον Δείκτη Αρωματικότητας Υδρογονανθράκων (Calculated Carbon Aromaticity Index number - CCAI). Ο δείκτης αρωματικότητας έχει ορισθεί από την εταιρεία πετρελαιοειδών Shell ως (Schenk et al., 1998):

$$CCAI = \rho - 140.7 \log[\log(v + 0.85)] - 80.6 - 210 \cdot \ln[T + 273] / 323]$$

όπου:

- ρ : η πυκνότητα του καυσίμου σε kg/m^3 σε θερμοκρασία $15\text{ }^\circ\text{C}$
 ν : το κινηματικό ιξώδες σε cSt
 T : η θερμοκρασία σε $^\circ\text{C}$ για την οποία είναι γνωστό το ιξώδες

Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός κετανίου ενός καυσίμου (ή όσο μεγαλύτερος είναι ο CCAI), τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση έναυσης. Μια τυπική τιμή του CCAI για καύσιμα πολύ χαμηλής ποιότητας είναι 940, και για παραφινικά παράγωγα καλής ποιότητας καύσης 800.

Θερμογόνος Ικανότητα

Το χαρακτηριστικό πρωτίστης σημασίας ενός καυσίμου είναι η θερμογόνος δύναμη. Ως θερμογόνος δύναμη ορίζεται το ποσό της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση μιας ορισμένης ποσότητας του καυσίμου. Όσο το ειδικό βάρος ενός καυσίμου αυξάνεται, ο λόγος ατόμων άνθρακα προς τα άτομα υδρογόνου αυξάνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση της περιεκτικότητας σε υδρογόνο, το οποίο συμβάλλει στην αύξηση της θερμογόνου δύναμης. Συνηθίζεται από τους κατασκευαστές να παρουσιάζονται τιμές ειδικής κατανάλωσης των κινητήρων τους, οι οποίες αφορούν στη χρήση ελαφρού πετρελαίου υψηλής θερμογόνου δύναμης (Marine Diesel Oil) (SNAME, 1992).

Σημείο Ανάφλεξης

Ως σημείο ανάφλεξης ορίζουμε την ελάχιστη θερμοκρασία για την οποία επαρκής ποσότητα ατμών καυσίμου μπορεί να προκαλέσει καύση, όταν μια πηγή έναυσης έρθει κοντά στην επιφάνεια του καυσίμου. Το σημείο ανάφλεξης δεν σχετίζεται τόσο με την ποιότητα του καυσίμου, όσο με τη διασφάλιση της ασφαλούς διαχείρισής του. Το βαρύ καύσιμο πρέπει να θερμαίνεται για να αντληθεί, αλλά αν το καύσιμο αποθηκευθεί σε κάποια δεξαμενή σε θερμοκρασία υψηλότερη του σημείου έναυσης υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ανάφλεξης.

Σημείο Ροής

Το σημείο ροής υποδηλώνει τη θερμοκρασία κάτω από την οποία το καύσιμο στερεοποιείται. Το σημείο ροής δεν σχετίζεται με την ποιότητα του καυσίμου, αλλά με την αντλησιμότητά του και τα προβλήματα που τυχούσα στερεοποίησή του θα επιφέρει. Επιπλέον, το καύσιμο είναι κακός αγωγός της θερμότητας, και η επανυγροποίησή του με θέρμανση είναι δύσκολη.

2.5.2 Χημική Σύσταση Καυσίμου

Θείο

Η αυξημένη περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του κινητήρα Diesel, επειδή προκαλεί διάβρωση σε χαμηλές θερμοκρασίες αφού παράγεται το πολύ διαβρωτικόθειικό οξύ όταν οξειδία του θείου που έχουν σχηματιστεί κατά τη διαδικασία της καύσης ψυχθούν κάτω από τις θερμοκρασίες

υγροποίησης (160-170 °C). Αυτού του τύπου η διάβρωση εμφανίζεται κυρίως στα κατώτερα τμήματα των χιτωνίων και στα έμβολα, και προκαλεί φθορές στα ελατήρια των εμβόλων. Τα επίπεδα θείου στα ναυτιλιακά καύσιμα ολοένα αυξάνονται, επειδή περισσότερο ανεπτυγμένες μέθοδοι όπως η διύλιση κενού μπορούν και χρησιμοποιούν όλο και πιο βαριά άρα και φτηνά καύσιμα για τη διύλιση, που όμως έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο.

Υπόλειμμα άνθρακα

Η κατά την καύση πυρόλυση των βαρύτερων υδρογονανθράκων σε υψηλές θερμοκρασίες δημιουργεί επικαθήσεις άνθρακα. Οι τιμές Conradson Carbon Residue (CCR) και Micro-Carbon Residue (MCR) εκφράζουν την τάση ενός καυσίμου να σχηματίζει επικαθήσεις άνθρακα. Κατά τη μέθοδο μέτρησης του CCR, δείγμα καυσίμου θερμαίνεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία απουσία αέρα. Η ποσότητα άνθρακα ως προκύπτον υπόλειμμα είναι προϊόν πυρόλυσης, και καλείται CCR. Τα πλούσια σε άνθρακα καύσιμα είναι πιο δύσκολο να καούν, έχουν φτωχά χαρακτηριστικά σε καύση, και οδηγούν σε σχηματισμό υπολειμμάτων αιθάλης και άνθρακα κατά την καύση τους, με αποτέλεσμα φθορά στα χιτώνια, τις βαλβίδες εξαγωγής, τα ελατήρια των εμβόλων και τα ακροφύσια του στροβίλου του υπερπληρωτή και των εγχυτήρων. Οι μέγιστες αποδεκτές τιμές CCR και MCR σχετίζονται με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα, τόσο μικρότερη είναι η διάρκεια της καύσης και περισσότερα τα υπολείμματα. Συνεπώς, τα αποδεκτά όρια CCR/MCR ελαττώνονται με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Ασφαλτένια

Τα ασφαλτένια είναι ενώσεις υδρογονανθράκων υψηλού μοριακού βάρους σε σύνθετη μοριακή δομή (αλειφατική, ναφθενική και αρωματική), οι οποίες βρίσκονται διάσπαρτες σε κάποιου είδους κολλοειδείς αιωρήσεις εντός του καυσίμου. Τα ασφαλτένια επιδρούν στην καύση με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των υπολειμμάτων άνθρακα. Μειώνουν τις λιπαντικές ιδιότητες του καυσίμου, και σε σπάνιες περιπτώσεις είναι πιθανό ακόμα και το “κόλλημα” της αντλίας καυσίμου. Τα ασφαλτένια επηρεάζουν τη συμβατότητα/σταθερότητα ελαφρών και βαρέων μειγμάτων, καθώς και τον ρυθμό έκλυσης της θερμότητας κατά τη διεργασία της καύσης (Rate Of Heat Release – ROHR).

Η συμβατότητα αποτελεί μια πολύ σημαντική ιδιότητα του καυσίμου. Όσο τα καύσιμα καταλοίπων (residual oils) διυλίζονται εντονότερα, το καύσιμο που προκύπτει αναμιγνύεται με ελαφρότερα καύσιμα (cutter stocks), ώστε το μίγμα να αποκτήσει ικανοποιητικές ιδιότητες. Όταν ελαφρά κλάσματα, τα οποία υπερέχουν σε αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, αναμιγνύονται με βαρύτερα καύσιμα, διακόπτεται η κολλοειδής διάδοση των στοιχείων υψηλού μοριακού βάρους. Λόγω αυτής της άρσης της ισορροπίας, τα βαρύτερα συστατικά αρχίζουν να σχηματίζουν ιζήματα, δηλαδή να λασπώνουν. Μια απλούστερη ερμηνεία των όρων συμβατότητα/σταθερότητα θα ήταν η τάση του καυσίμου να σχηματίζει κατάλοιπα σε μορφή λάσπης, για παράδειγμα κατά την αποθήκευση. Για αυτόν τον λόγο, καύσιμα που έχουν φορτωθεί στο πλοίο από διαφορετικά λιμάνια προτιμάται, αν αυτό είναι δυνατόν, να

αποθηκεύονται σε διαφορετικές δεξαμενές, και η ανάμιξη καυσίμων από διαφορετικές δεξαμενές του πλοίου θα πρέπει να αποφεύγεται.

Νερό / διάβρωση

Το νερό που περιέχεται στο καύσιμο μπορεί να εισέλθει στο πλοίο κατά τη φόρτωση ή ως συμπύκνωμα κατά την αποθήκευση του καυσίμου. Το αλάτι που υπάρχει στο θαλασσινό νερό μπορεί να ενωθεί με το βανάδιο που συνήθως υπάρχει στα καύσιμα, και να προκαλέσει προβλήματα επικαθήσεων και διάβρωσης υψηλών θερμοκρασιών σε μηχανικά μέρη του κινητήρα, όπως η βαλβίδα εξαγωγής και ο στρόβιλος του υπερπληρωτή, καθώς και διάβρωση των σωληνώσεων από το αλάτι και διάβρωση χαμηλών θερμοκρασιών από το θειϊκό οξύ. Μικροβιακή ανάπτυξη μπορεί να προκληθεί από την παρουσία νερού στο βαρύ καύσιμο. Αυτές οι πολύ απλές μορφές ζωής υπάρχουν στο νερό, και τρέφονται με βαρύ καύσιμο μεταξύ της διεπιφάνειας νερού – καυσίμου. Το αποτέλεσμα αυτής της αποικίας στο καύσιμο μπορεί να είναι ένα είδους λάσπης, το οποίο είναι δυνατόν να αποβεί διαβρωτικό για τους διαχωριστές και τα φίλτρα (SNAME, 1992).

Βανάδιο

Το βανάδιο είναι στοιχείο το οποίο συναντάται και αυτό στη σύνθεση του καυσίμου. Τα επίπεδα βαναδίου στα καύσιμα καταλοίπων (residual oils) ποικίλουν ανάλογα με την προέλευση του αργού πετρελαίου. Κατά την καύση, το βανάδιο οξειδώνεται σε πεντοξείδιο του βαναδίου V_2O_5 , σχηματίζοντας επικαθήσεις. Το αλάτι, $NaCl$, από το θαλασσινό νερό ή από τον θαλασσινό αέρα πληρώσεως, αντιδρά με το οξυγόνο και το διοξείδιο του θείου, και σχηματίζει θειϊκό νάτριο. Το θειϊκό νάτριο και το πεντοξείδιο του βαναδίου τήκονται σε θερμοκρασία της τάξης των 500-600 °C, η οποία εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των δύο ενώσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία στερεών τηγμάτων που εμμένουν στις επιφάνειες, και την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας που καταλήγει σε διάβρωση υψηλών θερμοκρασιών.

Κατάλοιπα καταλυτικής απόσταξης

Κατά τη μέθοδο διάσπασης ρευστού καταλύτη, το πετρέλαιο αναμιγνύεται με καταλύτη σε μέση θερμοκρασία περίπου 500 °C, με αποτέλεσμα τη διάσπαση των μακρομορίων του σε ελαφρύτερα. Οι κόκκοι του καταλύτη (συνήθως βασισμένος σε *aluminio silicate*) μπορεί να αποκολληθούν από τον καταλύτη, να παρασυρθούν από το πετρέλαιο, και να ενσωματωθούν σε αυτό. Αν οι κόκκοι αυτοί δεν αφαιρεθούν από το καύσιμο, μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στον κινητήρα. Κόκκοι διαμέτρου 10 μm μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στις αντλίες καυσίμου και τους εγχυτήρες. Μεγαλύτεροι κόκκοι, διαμέτρου 10–70 μm, μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στα ελατήρια των εμβόλων, στα χιτώνια, στις βαλβίδες εξαγωγής και στον στρόβιλο του υπερπληρωτή. Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων θα πρέπει να εφαρμόζονται τεχνικές διαχωρισμού και φιλτραρίσματος του καυσίμου για την απομόνωσή τους από το καύσιμο.

Στερεά υπόλοιπα και τέφρα

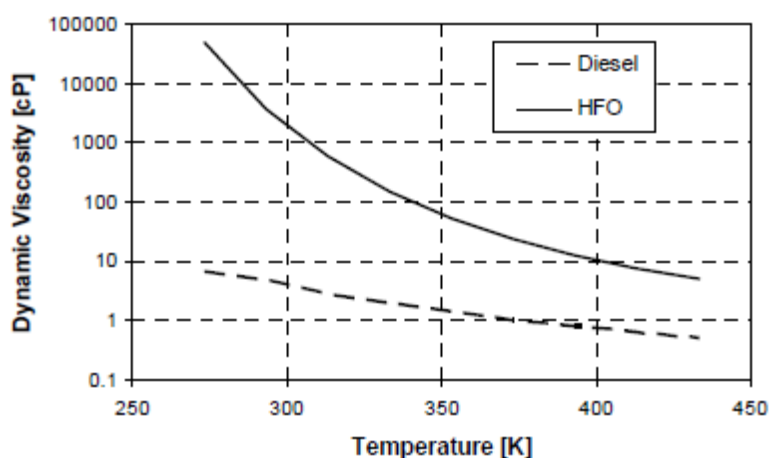
Οι επικαθήσεις της τέφρας που εμμένουν στις μεταλλικές επιφάνειες προκαλούν τοπική υπερθέρμανση που μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση υψηλών θερμοκρασιών. Η παρουσία τέφρας σε συνδυασμό με άλλα στερεά υπολείμματα όπως άμμος, σκουριά και στοιχεία μετάλλων, φθείρει τα ελατήρια εμβόλων, τα χιτόνια, τις βαλβίδες εξαγωγής και τον στρόβιλο του υπερπληρωτή. Τα ιζήματα από άλατα του αργού πετρελαίου και διάφορες επικαθήσεις πρέπει να απομακρύνονται από το καύσιμο μέσω κατακάθισης, διαχωρισμού και φιλτραρίσματος, ώστε να αποφεύγεται πιθανή διάβρωση (SNAME, 1992).

Χαρακτηριστικά Μοντέλου Βαρέος Καυσίμου

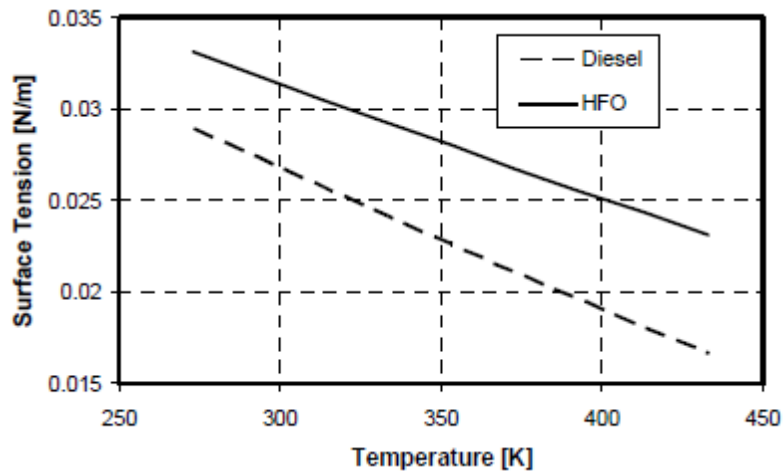
Στην εργασία των Kyriakides et al., 2009, παρουσιάζεται μοντέλο θερμοφυσικών ιδιοτήτων βαρέος καυσίμου, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ως βάση στην παρούσα εργασία. Οι τιμές των ιδιοτήτων θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για ένα τυπικό βαρύ καύσιμο, για εφαρμογές μεγάλων ναυτικών κινητήρων. Η πυκνότητα στους 15 °C έχει οριστεί ίση με 953.7 kg/m³, υψηλότερη από την τιμή των 848 kg/m³ του καυσίμου diesel. Επιπρόσθετα, έχουν προσδιοριστεί, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, οι εξής θερμοφυσικές ιδιότητες:

- Ιξώδες
- Επιφανειακή τάση
- Τάση ατμών
- Λανθάνουσα θερμότητα
- Ειδική ενθαλπία

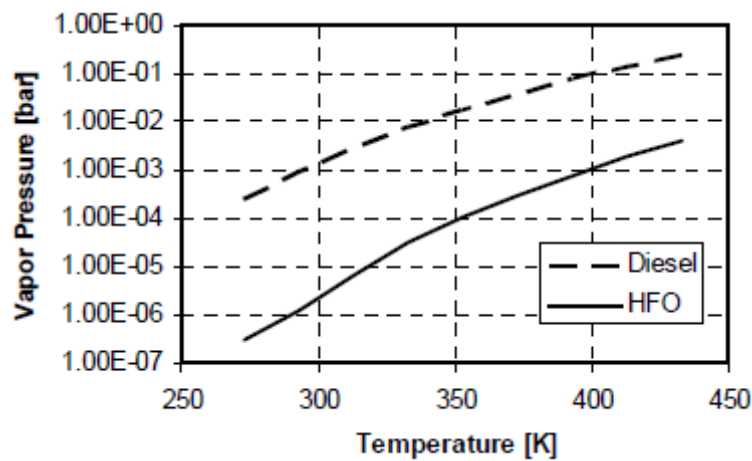
Στο συγκεκριμένο μοντέλο βαρέος καυσίμου, οι τιμές για το μοριακό βάρος είναι $MW_{HFO} = 463$ και για την κρίσιμη θερμοκρασία $T_C = 1033$ K. Στα Σχήματα 2-7, 2-8, 2-9 και 2-10 παριστάνονται οι καμπύλες ιξώδους, επιφανειακής τάσης, τάσης ατμών και λανθάνουσας θερμότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας, αντίστοιχα, για καύσιμο Diesel και για βαρύ καύσιμο (HFO).



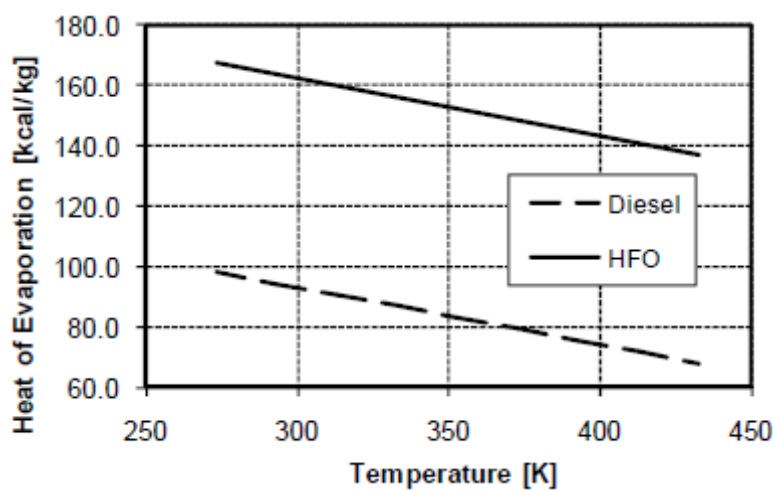
Σχήμα 2-7: Δυναμικό ιξώδες συναρτήσεως της θερμοκρασίας, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, HFO (Kyriakides et al., 2009).



Σχήμα 2-8: Επιφανειακή τάση συναρτήσει της θερμοκρασίας, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, HFO (Kyriakides et al., 2009).



Σχήμα 2-9: Τάση ατμών συναρτήσει της θερμοκρασίας, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, HFO (Kyriakides et al., 2009).



Σχήμα 2-10: Ενθαλπία εξάτμισης συναρτήσει της θερμοκρασίας, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, HFO (Kyriakides et al., 2009).

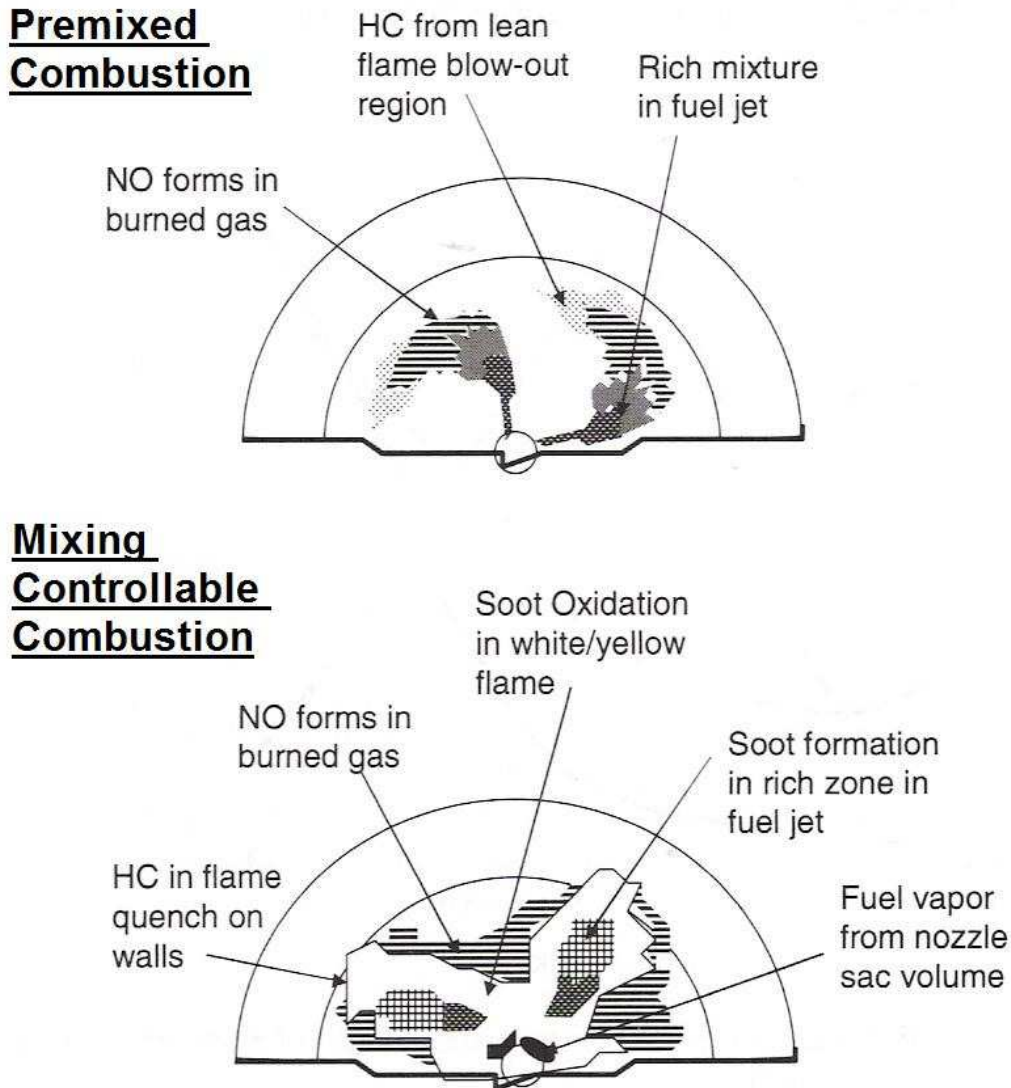
Στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας, θεωρούμε ότι το βαρύ καύσιμο εγχύεται σε θερμοκρασία 375 K. Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται οι τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος καυσίμου για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία έγχυσης.

Πίνακας 2-2: Ιδιότητες βαρέος καυσίμου για θερμοκρασία έγχυσης ίση με 375 K (Kyriakides et al., 2009).

Καύσιμο	Θερμοκρασία	Πυκνότητα	Ιξώδες	Επιφανειακή Τάση	Ενθαλπία	Ενθαλπία Εξάτμισης	Τάση Ατμών	Θερμική Αγωγιμότητα
	K	kg/m ³	cP	dyne/cm	kcal/kg	kcal/kg	bar	W/mK
Diesel Oil	375	848.0	1.025	21.08	-477.3	78	3.89E-02	0.134
HFO	375	953.7	23.630	26.76	-468.5	148	2.98E-04	0.160

2.6 Σχηματισμός ρύπων

Στους κινητήρες Diesel, ο σχηματισμός των ρύπων σχετίζεται άμεσα με τη χωρική κατανομή του καυσίμου στον θάλαμο καύσης, και το πώς αυτή μεταβάλλεται με τον χρόνο κατά την ανάμιξη καυσίμου-αέρα. Στο Σχήμα 2-11, παριστάνεται σχηματικά ο τρόπος με τον οποίο οι διάφορες περιοχές της δέσμης καυσίμου και η φλόγα επηρεάζουν τον σχηματισμό μονοξειδίου του αζώτου (NO), άκαυστων υδρογονανθράκων και σωματιδίων αιθάλης κατά τη φάση της προαναμιγμένης καύσης και της μη προαναμιγμένης καύσης.



Σχήμα 2-11: Μηχανισμοί σχηματισμού ρύπων (Heywood, 1988).

Το μονοξείδιο του αζώτου σχηματίζεται σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας. Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες δημιουργούνται στις φτωχές σε καύσιμο περιοχές, όπου η φλόγα σβήνει, και όταν το καύσιμο εγχύεται στα τελευταία στάδια της καύσης, κατά τα οποία η ανάμιξη με τον αέρα είναι δυσχερής. Σωματίδια αιθάλης σχηματίζονται στις πλούσιες σε καύσιμο περιοχές του πυρήνα της δέσμης του καυσίμου. Η παραγωγή των σωματιδίων μεγιστοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες

(περί τους 2000 K) και πιέσεις. Ακολούθως, τα σωματίδια αιθάλης οξειδώνονται σε σημαντικό βαθμό, κατά την επαφή τους με το οξυγόνο του αέρα.

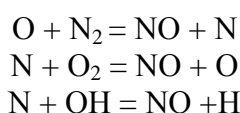
2.6.1 Σχηματισμός NO_x

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) αποτελούνται από μονοξείδιο του αζώτου (NO) και διοξείδιο του αζώτου (NO_2).

Σχηματισμός NO

Το NO μπορεί να σχηματιστεί από οξείδωση του αζώτου που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα εντός του θαλάμου καύσης από το οξυγόνο, σε υψηλές θερμοκρασίες (θερμικό NO). Ο ρυθμός σχηματισμού του NO σχετίζεται με τη θερμοκρασία των καυσαερίων με τρόπο εκθετικό. Το μονοξείδιο του αζώτου μπορεί επίσης να σχηματιστεί στην περιοχή της φλόγας λόγω της αντίδρασης ενδιάμεσων χημικών ενώσεων υδρογονανθράκων με ατομικό οξυγόνο και ελεύθερες ρίζες (άμεσο NO). Οι ελεύθερες ρίζες (CH , CH_2 , C , C_2) που σχηματίζονται στην περιοχή της φλόγας αντιδρούν με το μοριακό άζωτο, δημιουργώντας ενδιάμεσες ενώσεις υδρογονανθράκων (HCN , CN). Για περίσσεια καυσίμου, στη ζώνη της αντίδρασης της φλόγας, παρατηρούνται μεγάλες συγκεντρώσεις HCN . Το μονοξείδιο του αζώτου που σχηματίζεται με τον παραπάνω μηχανισμό αποτελεί περίπου το 10 – 15% των συνολικών NO_x (Heywood 1988). Αθροιστικά, το NO αποτελεί περίπου το 80% των οξειδίων αζώτου που παράγονται κατά την καύση (Pundir, 2007), ενώ στους μεγάλους ναυτικούς κινητήρες Diesel το αντίστοιχο ποσοστό μπορεί να υπερβαίνει το 90%.

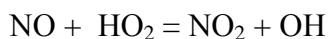
Η παραγωγή θερμικού NO μπορεί να προσεγγιστεί από τον διευρυμένο μηχανισμό Zeldovich (Heywood, 1988):



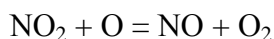
Σχηματισμός NO_2

Το διοξείδιο του αζώτου στους κινητήρες Diesel αποτελεί το 20% (ή και λιγότερο) των οξειδίων του αζώτου που παράγονται κατά την καύση.

Η αντίδραση που περιγράφει το σχηματισμό NO_2 είναι οι ακόλουθη (Heywood, 1988):



και περιγράφει τον μετασχηματισμό του NO που βρίσκεται στην περιοχή της φλόγας σε NO_2 . Η ακόλουθη αντίδραση περιγράφει τη μετατροπή του NO_2 σε NO στην περιοχή των καυσαερίων λόγω αντίδρασής του με το οξυγόνο O_2 . (Heywood, 1988):



Στην περίπτωση κατά την οποία τα θερμά καυσαέρια αναμιχθούν με ψυχρό αέρα ή με το εγχυόμενο καύσιμο και ψυχθούν, τότε η παραπάνω αντίδραση εξελίσσεται πολύ αργά, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης του NO_2 .

2.6.2 Σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης

Σωματίδια αιθάλης παράγονται κατά τις φάσεις της καύσης προανάμιξης και καύσης διάχυσης. Η υψηλή συγκέντρωση σε σωματίδια αιθάλης εμφανίζεται ως μαύρος καπνός στα εξερχόμενα καυσαέρια. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον σχηματισμό σωματιδίων αιθάλης είναι η ποιότητα του καυσίμου. Η επίδραση αυτή είναι διαφορετική για τη φάση της καύσης προανάμιξης και τη φάση της καύσης διάχυσης. Για τη φάση της καύσης προανάμιξης, ο ρυθμός σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης για διάφορα καύσιμα εξαρτάται από τη σύσταση του καυσίμου, με φθίνουσα σειρά, ως εξής: αρωματικοί υδρογονάνθρακες, αλκοόλες, παραφίνες, ολεφίνες και ακετυλένια. Για τη φάση της διάχυσης η αντίστοιχη σειρά είναι η εξής: αρωματικοί υδρογονάνθρακες, ακετυλένια, ολεφίνες, παραφίνες και αλκοόλες (Pundir, 2007).

Ο σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης στους κινητήρες Diesel παρατηρείται σε θερμοκρασίες μεταξύ 1000-2800 K, και υψηλές πιέσεις. Ο διαθέσιμος χρόνος για τον σχηματισμό στερεών σωματιδίων αιθάλης είναι της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου. Το αέριο διάλυμα που προκύπτει (στερεά σωματίδια διασκορπισμένα σε αέριο) χαρακτηρίζεται από τη συνολική μάζα της στερεάς φάσης στο συγκεκριμένο αέριο μίγμα (συχνά εκφράζεται ως *κλάσμα όγκου* των σωματιδίων αιθάλης, *όγκος σωματιδίων αιθάλης/συνολικός όγκος*), από τον αριθμό σωματιδίων ανά μονάδα όγκου και από το μέγεθος των σωματιδίων (Heywood, 1988).

Ο σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης αρχίζει με τη δημιουργία στερεών σωματιδίων πλούσιων σε μόρια άνθρακα, τα οποία προκύπτουν από πυρόλυση και ατελή καύση. Το προϊόν αυτό συνήθως περιέχει διάφορους κορεσμένους υδρογονάνθρακες, κυρίως ακετυλένια και μεγαλύτερα μόρια σύστασης $C_{2n}H_2$ και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH). Αυτοί οι δύο τύποι μορίων θεωρούνται ως οι βασικότεροι δείκτες για τον σχηματισμό σωματιδίων αιθάλης. Οι αντιδράσεις στερεοποίησης ενώσεων, σε αέρια φάση, όπως οι παραπάνω οδηγούν στην εμφάνιση των πρώτων σωματιδίων αιθάλης τα οποία έχουν διάμετρο μικρότερη των 2 νανόμετρων.

Οι πρώτοι πυρήνες αιθάλης υπόκεινται σε επιφανειακή επέκταση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τρισδιάστατων δομών. Οι αντιδράσεις που σχετίζονται με τη δημιουργία νέων πυρήνων, καθώς και με την επιφανειακή επέκταση και συσσώρευσή τους καθίστανται εξαιρετικά αργές με την πτώση της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου καύσης.

3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Μοντελοποίηση φαινομένων ροής και καύσης με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

3.1.1 Κώδικας KIVA-3

Κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics – CFD), έγινε ευρέως αποδεκτή ως ένα συμπληρωματικό εργαλείο της πειραματικής διαδικασίας στον σχεδιασμό και την κατανόηση των μηχανισμών της καύσης. Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης της θερμορευστομηχανικής σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, ένα σημαντικό επίτευγμα ήταν η προσομοίωση τρισδιάστατων ροών, με παρουσία έγχυσης καυσίμου και καύσης. Εν προκειμένω, ο κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA διατέθηκε στην επιστημονική κοινότητα το 1985, και αντικαταστάθηκε από τη βελτιωμένη έκδοση KIVA-II το 1989 (Amsden, 1989).

Οι πρώτες εκδόσεις του κώδικα προσέφεραν τη δυνατότητα προσομοίωσης ροών εντός του κυλίνδρου, καθώς και σε άλλα συστήματα καύσης, αποδείχτηκαν όμως ανεπαρκείς στη μοντελοποίηση σύνθετων γεωμετριών που περιέχουν χαρακτηριστικά όπως θυρίδες εισαγωγής και βαλβίδες. Συγκεκριμένα, η συνολική γεωμετρία επιμεριζόταν σε έναν συνολικό αριθμό υπολογιστικών κελιών. Για τον ορισμό σύνθετων γεωμετριών, έπρεπε να απενεργοποιηθούν τα κελιά που ήταν εκτός των ορίων του γεωμετρικού μοντέλου, γεγονός το οποίο σήμαινε σημαντική επιβάρυνση σε υπολογιστική ισχύ.

Ο κώδικας KIVA-3 (Amsden, 1993) σχεδιάστηκε με σκοπό να ξεπεραστεί αυτή η ανεπάρκεια, αλλάζοντας τον τρόπο με τον οποίο ορίζονται τα πλέγματα, έτσι ώστε να απουσιάζει ο μεγάλος αριθμός των απενεργοποιημένων κελιών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των απαιτήσεων σε μνήμη και υπολογιστική ισχύ σε προβλήματα σύνθετων γεωμετριών. Έτσι, αντί της απενεργοποίησης ή ενεργοποίησης κελιών, ο κώδικας KIVA-3 χρησιμοποιεί έναν αυτοματοποιημένο τρόπο για την αναδημιουργία του πλέγματος κατά την κίνηση του εμβόλου, η οποία μπορεί να αποκαλύπτει ή να αποκρύπτει θυρίδες στο έμβολο, εφόσον αυτές υπάρχουν.

Ο κώδικας KIVA-3 συνίσταται σε ένα σύνολο υπορουτινών, οι οποίες ελέγχονται από ένα κύριο πρόγραμμα. Ο κώδικας διαθέτει κατάλληλα μοντέλα (π.χ. τύρβης, διασπαστικής ροής και καύσης) ώστε να καθιστά εφικτή την προσομοίωση της ροής και καύσης εντός του κυλίνδρου μιας Μηχανής Εσωτερικής Καύσης. Ο κώδικας είναι ανοιχτός, συνεπώς ο χρήστης μπορεί να επέμβει στις υπορουτίνες που τον συνθέτουν, και να προσθέσει νέες.

Ο κώδικας KIVA-3 διαθέτει πρόγραμμα δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του κώδικα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό λογισμικό. Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκαν νέα πλέγματα για την προσομοίωση της ροής και καύσης σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου (βλ. Κεφ. 4).

3.1.2 Μοντέλο Καυσίμου

Ο κώδικας KIVA-3 είναι εφοδιασμένος με βιβλιοθήκη στην οποία υπάρχουν καταχωρημένα συνήθη καύσιμα (μεθάνιο, επτάνιο, δωδεκάνιο, δεκατετράνιο, κ.α.) και οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες. Εν προκειμένω, οι τιμές θερμοφυσικών ιδιοτήτων όπως η ενθαλπία, η λανθάνουσα θερμότητα, η τάση ατμών και το ιξώδες είναι καταχωρημένες ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας. Η εισαγωγή των ιδιοτήτων του βαρέος καυσίμου (HFO) στη βιβλιοθήκη πραγματοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας του Ν. Κυριακίδη (Κυριακίδη, 2009).

Οι μεγάλοι κινητήρες Diesel προσφέρουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν με βαρύ καύσιμο, το οποίο είναι φθηνότερο από το Marine Diesel Oil (MDO). Το βαρύ καύσιμο αντιστοιχεί στη βάση των προϊόντων απόσταξης, και συνήθως περιέχει ανεπιθύμητα συστατικά όπως θείο, άζωτο και προσμίξεις βαρέων μετάλλων. Λόγω του υψηλού κινηματικού ιξώδους που παρουσιάζει, αλλά και για την ικανοποίηση περιβαλλοντικών διατάξεων, είναι σύνηθες να αναμιγνύεται το καύσιμο καταλοίπων (residual) με ελαφρύτερο καύσιμο (cutter). Αποστάγματα που, για παράδειγμα, προέρχονται από καταλυτική πυρόλυση, όπως Light Cycle Oil (LCO) και Clarified Oil (CLO), χρησιμοποιούνται ως ελαφρύτερα συστατικά, λόγω υψηλής πυκνότητας, χαμηλού ιξώδους και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Το οξύμωρο είναι πως όσο η τεχνολογία διύλισης προχωρά και μαζί της εξελίσσονται και οι μέθοδοι απόσταξης του πετρελαίου με σκοπό την παραγωγή καυσίμων ανώτερης ποιότητας, τόσο πιο βαριά είναι τα καύσιμα καταλοίπων, με αποτέλεσμα η ποιότητα του βαρέος καυσίμου ολοένα να χειροτερεύει. Για τον λόγο αυτό, όσο τα χαρακτηριστικά των καταλοίπων χειροτερεύουν, τόσο αυξάνεται η απαίτηση ανάμιξης ελαφρύτερων καυσίμων ώστε να επιτευχθούν οι απαιτήσεις σε ιξώδες.

Κατά την έγχυση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης, το ελαφρύτερο καύσιμο διασπάται πιο εύκολα σε μικρότερες σταγόνες, σε σχέση με το βαρύ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα είδος πυρήνα καυσίμου καταλοίπων περικλειόμενο από ένα κέλυφος ελαφρύτερου καυσίμου. Με αυτόν τον τρόπο, αρχικά καίγεται το ελαφρύ καύσιμο. Η θερμοκρασία και η πίεση αυξάνουν καθώς η καύση εξελίσσεται, και οι συνθήκες γίνονται κατάλληλες για την καύση και του βαρύτερου μέρους του καυσίμου. Η παραπάνω αποτελεί, φυσικά, μια απλουστευτική προσέγγιση της συμπεριφοράς του καυσίμου. Στην παρούσα εργασία, η επίδραση της σύστασης του βαρέος καυσίμου στην καύση προσεγγίστηκε με κατάλληλη προσαρμογή του μοντέλου καύσης, ώστε το καύσιμο να καίγεται στην αρχή με ρυθμό ελαφρού (cutter), και όταν καεί ένα ποσοστό της συνολικής εγχυόμενης μάζας, το καύσιμο να καίγεται με πιο αργό ρυθμό, ο οποίος προσεγγίζει την καύση του βαρύτερου μέρους. Το θέμα αυτό αναλύεται διεξοδικότερα στην Ενότητα 4.3.1.

3.1.3 Μοντέλα καύσης

Τα μοντέλα καύσης που χρησιμοποιούνται για βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο βασίζονται σε κοινές αρχές. Στη συνέχεια περιγράφονται το μοντέλο καύσης βαρέος καυσίμου των Struckmeier et al. (2009) και το μοντέλο καύσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Και τα δύο μοντέλα βασίζονται στο μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου των Kong et al. (1995).

Το μοντέλο καύσης των Kong et al. χρησιμοποιεί μια μεταβλητή που ορίζεται ως χαρακτηριστικός χρόνος καύσης. Αρχικά υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις ισορροπίας κάθε χημικού στοιχείου που συμμετέχει στην αντίδραση καύσης (καύσιμο, O₂, N₂, CO₂, H₂, H₂O και CO). Ο ρυθμός της αντίδρασης εξαρτάται από τους επιμέρους χαρακτηριστικούς χρόνους της τυρβώδους ανάμιξης (τ_{turb}) και της αντίδρασης (τ_{lam}). Στο μοντέλο, ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης μιας χημικής ένωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dY_m}{dt} = -\frac{Y_m - Y_m^{eq}}{\tau_{comb}}$$

όπου Y_m και Y_m^{eq} αντιπροσωπεύουν τη στιγμιαία συγκέντρωση και τη συγκέντρωση ισορροπίας, αντίστοιχα, του στοιχείου m. Αντίστοιχα, τ_{comb} είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος καύσης, ο οποίος υπολογίζεται ως το άθροισμα των χαρακτηριστικών χρόνων αντίδρασης (τ_{lam}) και τυρβώδους ανάμιξης (τ_{turb}), όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\tau_{comb} = \tau_{lam} + f \cdot \tau_{turb}$$

Ο παράγοντας f λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Με την πρόοδο της διεργασίας της καύσης, η τιμή του f αυξάνεται (βλ. παρακάτω), ώστε να ενισχυθεί η σημασία της ανάμιξης στη συνολική αντίδραση καύσης, καθώς η χημεία καθίσταται περισσότερο γρήγορη. Ο χαρακτηριστικός χρόνος τ_{lam} υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, η οποία βασίζεται στη χημική κινητική της αντίδρασης ενός βήματος:

$$\tau_{lam} = A^{-1} [C_n H_{2n+2}]^{0.75} [O_2]^{-1.5} \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

Αντίστοιχα, ο ρυθμός καύσης θα είναι:

$$RATE = A [C_n H_{2n+2}]^{0.25} [O_2]^{1.5} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Ο χαρακτηριστικός χρόνος τ_{turb} υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tau_{turb} = C_{m2} \frac{k}{\varepsilon}$$

Στις παραπάνω σχέσεις, E είναι η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης (activation energy), R η γενική σταθερά των αερίων, A ο προεκθετικός παράγοντας (pre-exponential constant), k η κινητική ενέργεια της τύρβης, ε ο ρυθμός σκέδασης και C_{m2} ο συντελεστής για τον υπολογισμό του χαρακτηριστικού χρόνου ανάμιξης. Στα πειραματικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009), στην αρχή της καύσης, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας καλής ποιότητας καυσίμου είναι υψηλότερος από τον αντίστοιχο για βαρύ καύσιμο. Κατά συνέπεια, τα επίπεδα τύρβης (μεταξύ των δύο περιπτώσεων) διαφέρουν, με αποτέλεσμα διαφορά στην περαιτέρω εξέλιξη της

καύσης. Προκειμένου να συνυπολογιστούν αυτές οι διαφορές, ο παράγοντας τ_{curb} γίνεται:

$$\tau_{\text{curb}} = C_{\text{multi}} \frac{k}{g}$$

όπου:

$$C_{\text{multi}} = C_{m21}x + C_{m22}(1 - x)$$

Οι συντελεστές C_{m21} και C_{m22} εκπροσωπούν την ύπαρξη βαρύτερου (residual) και ελαφρύτερου (cutter) καυσίμου στη σύνθεση του βαρέος καυσίμου (HFO). Ο όρος x ισούται με το πηλίκο της συγκέντρωσης του ελαφρύτερου προς τη συνολική συγκέντρωση του βαρέος καυσίμου HFO, δεδομένου ότι $[HFO] = [CUT] + [RES]$.

$$x = \frac{[CUT]}{[CUT] + [RES]}$$

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο της καύσης είναι κοινό με αυτό που περιγράφηκε παραπάνω και χρησιμοποιήθηκε από τους Struckmeier et al. (Struckmeier, 2009). Οι μόνες διαφορές είναι στον παράγοντα f και στον συντελεστή C_{multi} .

Ο παράγοντας f προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f = (1 - e^{-r})/0.632,$$

όπου r είναι ο λόγος των προϊόντων προς το σύνολο των αντιδρώντων στοιχείων (εκτός του αζώτου)

$$r = \frac{Y_{CO_2} + Y_{H_2O} + Y_{CO} + Y_{H_2}}{1 - Y_{N_2}}$$

Η παράμετρος r υποδηλώνει σε κάθε στιγμή τον βαθμό περάτωσης της καύσης. Παίρνει τιμές ανάμεσα σε μηδέν, για μηδενική εξέλιξη της καύσης, και ένα, για πλήρως καμένο μίγμα. Ως συνέπεια, ο παράγοντας f μεταβάλλεται από μηδέν έως ένα σε εξάρτηση με τις εκάστοτε τοπικές συνθήκες. Η ερμηνεία αυτής της συμπεριφοράς είναι ότι η επιρροή της ανάμιξης λόγω τύρβης γίνεται όλο και πιο σημαντική όσο εξελίσσεται η καύση.

Στην παρούσα εργασία, ο συντελεστής C_{multi} θεωρείται σταθερός και ανεξάρτητος του λόγου x , $C_{\text{multi}} = 0.142$.

3.1.4 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Rate Of Heat Release – ROHR)

Τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην πίεση ως συνάρτηση της γωνίας στροφάλου στο εσωτερικό ενός θαλάμου καύσης κατά τις φάσεις της συμπίεσης, της καύσης και της εκτόνωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση της διεργασίας της καύσης εντός του θαλάμου. Μια αξιόπιστη μέθοδος που περιγράφει ποιοτικά τη

χρονική εξέλιξη της καύσης σχετίζεται με τον υπολογισμό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Rate Of Heat Release – ROHR).

Εν προκειμένω, εφαρμόζεται το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα, για τον όγκο ελέγχου ενός κυλίνδρου Μηχανής Εσωτερικής Καύσης:

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \sum_i \dot{m}_i h_i = \frac{dU}{dt}$$

όπου:

$\frac{dQ}{dt}$: ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας του συστήματος με το περιβάλλον

$-p \frac{dV}{dt}$: ο ρυθμός ανταλλαγής έργου

\dot{m}_i : η παροχή μάζας προς το σύστημα

h_i : η ειδική ενθαλπία της ροής που εισέρχεται ή εξέρχεται του συστήματος

$\frac{dU}{dt}$: ο ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας

Σε μια μεγάλη δίχρονη μηχανή, όταν οι θυρίδες εισαγωγής και η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστές, η μόνη ροή μάζας προς το σύστημα είναι αυτή του καυσίμου. Έτσι, το ισοζύγιο ενέργειας παίρνει τη μορφή:

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \sum_i \dot{m}_f h_f = \frac{dU}{dt}$$

Στην παραπάνω σχέση, εάν U είναι η συνολική εσωτερική ενέργεια του μίγματος εντός του κυλίνδρου, και h_f η ειδική ενθαλπία του καυσίμου, τότε ο ρυθμός dQ/dt υποδηλώνει το άθροισμα του ρυθμού μεταβολής της χημικής ενέργειας (της έκλυσης θερμότητας λόγω της καύσης - θετική ποσότητα) και της μεταφερόμενης θερμότητας προς/από το σύστημα. Για $h_f \approx 0$:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_{c\dot{n}}}{dt} + \frac{dQ_{ht}}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU_s}{dt}$$

όπου:

$\frac{dQ_n}{dt}$: είναι ο καθαρός (net) ρυθμός έκλυσης θερμότητας

$\frac{dQ_{c\dot{n}}}{dt}$: είναι ο μικτός ρυθμός έκλυσης θερμότητας (λόγω της καύσης)

$\frac{dQ_{ht}}{dt}$: είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από/προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου (αρνητικός για απώλεια θερμότητας προς τα τοιχώματα)

$\frac{dU_s}{dt}$: είναι ο ρυθμός μεταβολής της θερμικής (sensible) εσωτερικής ενέργειας του μίγματος

Έτσι, ο καθαρός ρυθμός έκλυσης θερμότητας $\frac{dQ_n}{dt}$ ισούται με τον συνολικό ρυθμό απόδοσης ωφέλιμου έργου και μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας του μίγματος. Αν το μίγμα εντός του κυλίνδρου θεωρηθεί ως ιδανικό αέριο, τότε η τελευταία εξίσωση λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + mc_v \frac{dT}{dt}$$

Από το νόμο των ιδανικών αερίων $pV = mRT$, όπου R η ειδική σταθερά του μίγματος, προκύπτει:

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T}$$

άρα :

$$\frac{dQ_n}{dt} = \left(1 + \frac{c_v}{R}\right) p \frac{dV}{dt} + \frac{c_v}{R} V \frac{dp}{dt}$$

$$\frac{dQ_n}{dt} = \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) p \frac{dV}{dt} + \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right) V \frac{dp}{dt}$$

Όπου $\gamma = c_p/c_v$. Το γ για ανάλυση ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε κινητήρες Diesel κυμαίνεται από 1.30 έως 1.35.

Στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας έχει επιλεγεί $\gamma = 1.30$. Στην περίπτωση υπολογιστικής προσομοίωσης πειραμάτων σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου, η οποία, όπως θα περιγραφεί στο κεφάλαιο της υπολογιστικής διαδικασίας, έχει γίνει για την προσέγγιση και επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου καύσης που αντιστοιχούν σε βαρύ καύσιμο, ο καθαρός ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right) V \frac{dp}{dt}$$

αφού

$$\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) p \frac{dV}{dt} = 0$$

Ο μικτός ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{dQ_{ch}}{dt} = \frac{dm_B}{dt} \cdot H_u$$

όπου:

dm_B : η μάζα καυσίμου που καίγεται στο χρονικό διάστημα dt .

H_u : η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, η οποία έχει επιλεγεί ίση με $H_u = 42700 \text{ kJ/kg}$ ως αντιπροσωπευτική τιμή για βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο

Στον κώδικα KIVA-3 υπολογίζεται συναρτήσει του χρόνου η ποσότητα $\frac{dm_B}{dt}$.

Ολοκληρώνοντας τις σχέσεις του καθαρού και του μικτού ρυθμού έκλυσης θερμότητας ως προς τον συνολικό χρόνο, προκύπτουν η συνολική καθαρή και συνολική μικτή εκλυόμενη θερμότητα αντίστοιχα.

$$Q_n = \int_{t_{start}}^{t_{end}} \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) p \frac{dV}{dt} + \left(\frac{1}{\gamma - 1} \right) V \frac{dp}{dt} \right] dt$$

$$Q_{ch} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} \frac{dm_B}{dt} \cdot H_u$$

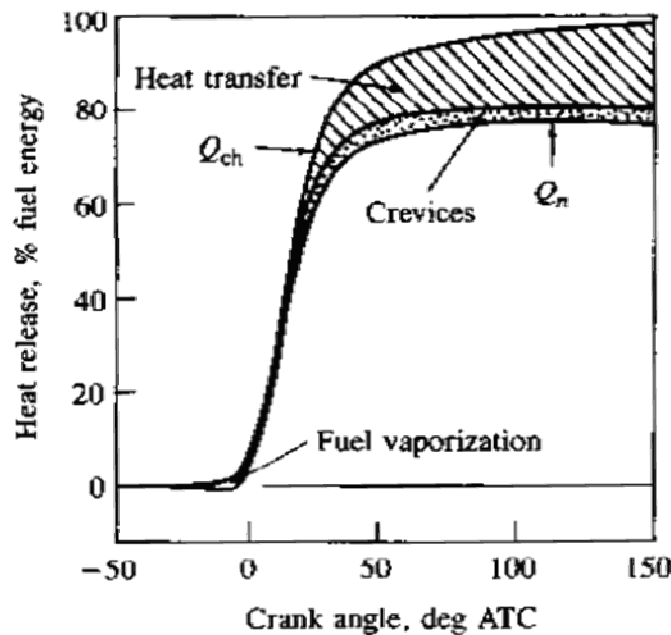
Αδιαστατοποιώντας τη συνολική καθαρή και μικτή εκλυόμενη θερμότητα, όπως ορίζεται στις σχέσεις που ακολουθούν, προκύπτει:

$$Q_{n_αδιαστ} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{end}} \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) p \frac{dV}{dt} + \left(\frac{1}{\gamma - 1} \right) V \frac{dp}{dt} \right] dt}{H_u \cdot m_{tot}}$$

$$Q_{ch_αδιαστ} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{end}} \left(\frac{dm_B}{dt} \right) dt}{m_{tot}}$$

όπου:

m_{tot} : η συνολική μάζα καυσίμου που καίγεται σε έναν κύκλο λειτουργίας.



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα μικτής και καθαρής αδιαστατοποιημένης έκλυσης θερμότητας για μεσόστροφο κινητήρα Diesel [Heywood, 1988].

Στο Σχήμα 3-1 (Heywood, 1988) φαίνεται ότι η καθαρή έκλυση θερμότητας αποτελεί περίπου το 80% της συνολικής, για τυπικό μεσόστροφο κινητήρα Diesel.

3.2 Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης

Διατύπωση του Γενικού Προβλήματος

Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός διανύσματος \vec{F} με M αντικειμενικές συναρτήσεις (στόχοι), αναζητείται ένα διάνυσμα μεταβλητών σχεδίασης \vec{x} . Το διάνυσμα \vec{x} είναι τέτοιο ώστε να ικανοποιεί k περιορισμούς. Οι k περιορισμοί περιέχονται στο διάνυσμα \vec{g} . Η φορμαλιστική διατύπωση των παραπάνω είναι η ακόλουθη:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \bar{F}(\bar{x}) = (f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_M(\bar{x}))^T \\ \bar{x} \in X = \{ \bar{x} \in \mathbb{R}^N \} \\ \bar{g}(\bar{x}) \leq 0, (g_1(\bar{x}), g_2(\bar{x}), \dots, g_k(\bar{x})) \end{array} \right.$$

όπου οι αντικειμενικές συναρτήσεις $f_i(\vec{x})$ και οι συναρτήσεις των περιορισμών $g_j(\vec{x})$ είναι συναρτήσεις του διανύσματος των μεταβλητών σχεδίασης:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_i(\bar{x}) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_N), i = 1, \dots, M \\ g_j(\bar{x}) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_N), j = 1, \dots, k \end{array} \right.$$

Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Μια μέθοδος βελτιστοποίησης αποτελεί την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης μέσα από ένα σύνολο πιθανών λύσεων. Μια κατηγοριοποίηση των μεθόδων βελτιστοποίησης είναι αυτή που τις κατατάσσει σε αιτιοκρατικές (deterministic) και στοχαστικές (stochastic). Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι κάνουν χρήση της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, τις τιμές της οποίας υπολογίζουν ή προσεγγίζουν. Οι στοχαστικές μέθοδοι αναζητούν τη βέλτιστη λύση με τρόπο τυχαίο ή οργανωμένα τυχαίο. Ένας τύπος ημιστοχαστικής μεθόδου είναι η μέθοδος των εξελικτικών αλγορίθμων, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία για τη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης βαρέος καυσίμου σε μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα.

3.2.1 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms - EA)

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Chong & Zak, 2001, Tan et al., 2005, Thevenin & Janiga, 2008) χρησιμοποιούν στοχαστικούς μηχανισμούς εμπνευσμένους από τη βιολογία και τις αρχές εξέλιξης των ειδών, όπως πρωτοδιατυπώθηκαν από τον Δαρβίνο. Ο όρος εξέλιξη παραλληλίζεται με τη διαδικασία ανίχνευσης βέλτιστων λύσεων μέσα από ένα μεγάλο όγκο υποψήφιων λύσεων. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, οι υποψήφιες

λύσεις παίζουν τον ρόλο των ατόμων σε έναν πληθυσμό, και οι μαθηματικοί περιορισμοί αντιστοιχούν στο περιβάλλον.

Βασικό χαρακτηριστικό των ΕΑ είναι η δυνατότητα διαχείρισης πληθυσμών υποψήφιων λύσεων και όχι μεμονωμένων λύσεων, με αποτέλεσμα να αποδίδουν ένα σύνολο λύσεων. Η ύπαρξη μίας μόνο αντικειμενικής συνάρτησης οδηγεί προφανώς σε μειωμένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος.

Ένας αλγόριθμος για να ορισθεί ως εξελικτικός πρέπει να διαθέτει χαρακτηριστικά όπως: η ικανότητα διαχείρισης πληθυσμών και όχι μεμονωμένων ατόμων, η ύπαρξη κληρονομικότητας από τους γονείς στους απογόνους, και η δυνατότητα εμφάνισης νέων χαρακτηριστικών.

3.2.2 Κωδικοποίηση μεταβλητών σχεδίασης

Στους ΕΑ, οι μεταβλητές σχεδίασης κωδικοποιούνται ως ακολουθία δυαδικών ψηφίων 0 και 1. Κάθε ελεύθερη μεταβλητή παρουσιάζεται ως μια συστοιχία k δυαδικών ψηφίων. Η συνένωση των δυαδικών στοιχείων όλων των μεταβλητών (γονιδίων) αποτελεί μια αυτούσια συστοιχία δυαδικών ψηφίων, η οποία αντιπροσωπεύει μια υποψήφια λύση (χρωμόσωμα).

Τελεστές επιλογής γονέων

Οι ΕΑ παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας ενός συνόλου γονέων για κάθε επόμενη γενιά, το οποίο προκύπτει από τους γονείς και απογόνους της τρέχουσας γενιάς. Με αυτόν τον τρόπο, οι απόγονοι οι οποίοι αντιστοιχούν σε καλύτερες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων μπορούν να γίνουν γονείς για τις επόμενες γενιές, με την προσδοκία να προκύψουν από αυτούς απόγονοι με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Υπάρχει συνεπώς η λογική ότι οι πλέον «ικανοί» γονείς επιλέγονται για να δημιουργήσουν καλούς απογόνους κληροδοτώντας σε αυτούς τα καλά τους χαρακτηριστικά.

Τελεστές διασταύρωσης

Κατά τη διαδικασία της διασταύρωσης επιλέγονται τυχαία δύο ή και περισσότεροι γονείς από το σύνολο των πιθανών γονέων, και από αυτούς προκύπτει ένας αριθμός απογόνων που καθορίζεται από τον χρήστη. Επιλέγεται επίσης τυχαία μία θέση μεταξύ δύο ψηφίων του χρωμοσώματος, και τα χρωμοσώματα – απόγονοι που προκύπτουν έχουν αριστερά από τη θέση αυτή τα ψηφία του ενός και δεξιά τα ψηφία του άλλου γονέα. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε την περίπτωση των δύο γονέων και η τυχαία θέση επιλέγεται να είναι η τέταρτη. Έστω επίσης ότι οι γονείς παρουσιάζονται από τα παρακάτω χρωμοσώματα:

1011001001110
1010010111011

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι απόγονοι θα είναι οι ακόλουθοι:

1011010111011
1010001001110

Τελεστές μετάλλαξης

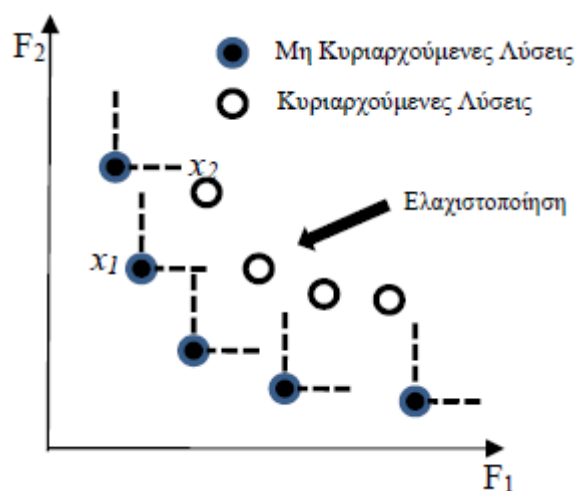
Η διαδικασία της μετάλλαξης εφαρμόζεται σε μερικούς από τους απογόνους οι οποίοι προέκυψαν από τη διαδικασία της διασταύρωσης, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω. Επιλέγεται τυχαία μία θέση ψηφίου του χρωμοσώματος του απόγονου, στην οποία το ψηφίο αντιστρέφεται, δηλαδή αν έχει την τιμή 1 τότε γίνεται 0, και αντίστροφα. Με αυτόν τον τρόπο εισέρχεται νέο γενετικό υλικό, άρα και νέα χαρακτηριστικά στους απογόνους, τα οποία δεν κληροδοτήθηκαν από τους γονείς τους.

3.2.3 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Μια συνήθης πρακτική για τη λύση προβλημάτων αναζήτησης περισσότερων του ενός στόχων είναι η ιεράρχηση των επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων με χρήση συντελεστών βαρύτητας. Με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου. Η αντικειμενική συνάρτηση που προκύπτει, μπορεί να βελτιστοποιηθεί κάνοντας χρήση για παράδειγμα μίας κλασικής μεθόδου που στηρίζεται στον υπολογισμό της παραγώγου ή ακόμα και γενετικών αλγορίθμων.

Πρέπει να επισημανθεί ότι στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση υπάρχει εξάρτηση του αποτελέσματος από την αρχική επιλογή των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης.

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του μετώπου Pareto (Pareto Front). Στο Σχήμα 3-2 παριστάνεται σχηματικά ένα πρόβλημα δύο στόχων. Το μέτωπο Pareto κάνει χρήση της έννοιας της κυριαρχίας μίας λύσης επί μίας άλλης. Σύμφωνα με αυτή, σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, μία λύση είναι κυρίαρχη όταν όλες οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι μικρότερες ή ίσες σε σχέση με αυτές της άλλης λύσης, ενώ για τουλάχιστο μία λύση η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη. Στο Σχήμα 3-2, η οικογένεια των λύσεων x_1 συνιστά τις μη κυριαρχούμενες λύσεις, ενώ η οικογένεια x_2 αποτελεί τις κυριαρχούμενες λύσεις. Το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων καλείται μέτωπο Pareto (Tan et al, 2005, Thevenin & Janiga, 2008, Cantu-Paz, 1998, Coello, 2000, Fonseca & Fleming, 1995).



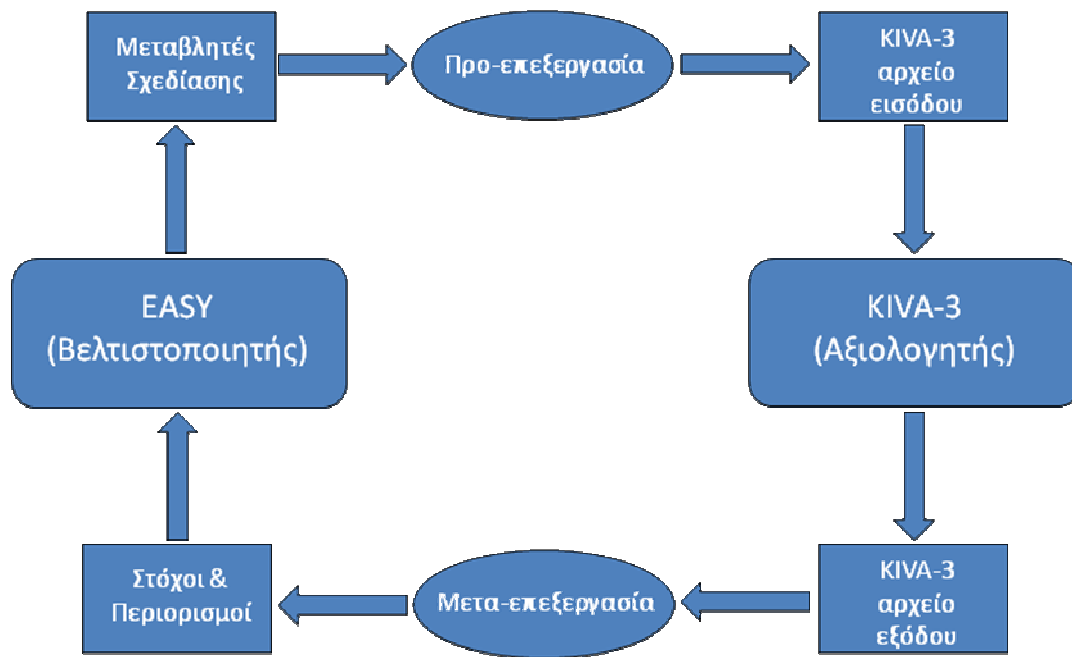
Σχήμα 3-2: Σχηματική απεικόνιση του μετώπου Pareto για την περίπτωση προβλήματος δύο στόχων.

Η διαδικασία σύγκλισης κάθε μεθόδου απαιτείται να καταλήγει σε κάποιο μέτωπο Pareto, το οποίο θα πρέπει να βρίσκεται κατά το δυνατό εγγύς στο πραγματικό βέλτιστο, ενώ ο πεπερασμένος αριθμός των λύσεων του να αντιστοιχεί επαρκώς στο εύρος των λύσεων του πραγματικού προβλήματος. Για να καταλήξει σε βέλτιστες λύσεις, ένας αλγόριθμος, θα πρέπει να ερευνά όλο το εύρος των πιθανών λύσεων, και να μην εγκλωβίζεται στις ίδιες λύσεις ή σε ακρότατα, ώστε να προσεγγίζει αποδοτικά τις βέλτιστες λύσεις. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SPEA2 (Zitzler et al., 2002), με σκοπό την εύρεση βέλτιστων προφίλ έγχυσης βαρέος καυσίμου με παρουσία προέγχυσης σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel.

3.2.4 Σύζευξη του κώδικα CFD KIVA-3 και του λογισμικού βελτιστοποίησης EASY

Για τη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης με χρήση βαρέος καυσίμου σε κινητήρα Diesel ήταν απαραίτητη η σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) KIVA-3 με κάποιο λογισμικό βελτιστοποίησης. Η σύζευξη αυτή έγινε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του Π. Ανδρεάδη (Ανδρεάδης, 2008), και εφαρμόστηκε στην περίπτωση της χρήσης δεκατετρανίου ως καύσιμο. Στην παρούσα εργασία, έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στον κώδικα και στη ρύθμιση του λογισμικού βελτιστοποίησης, ώστε η συνεργασία των δύο να καθίσταται εφικτή για την περίπτωση του μοντέλου καύσης το οποίο αναπτύξαμε εδώ. Το λογισμικό EASY, (Karakasis & Giannakoglou, 2006, Kampolis & Giannakoglou, 2008), το οποίο κάνει χρήση εξελικτικών αλγορίθμων, έχει επιλεγεί ως βελτιστοποιητής, ενώ οι υπολογισμοί υπολογιστικής ρευστοδυναμικής γίνονται με χρήση του κώδικα KIVA-3. Στο Σχήμα 3-3 παριστάνεται σχηματικά η υπολογιστική διαδικασία η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης με χρήση βαρέος καυσίμου. Τα διαδοχικά βήματα ορίζονται ως εξής:

- Ο κώδικας EASY καθορίζει τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης, τα όρια των οποίων έχουν ορισθεί από τον χρήστη.
- Στη φάση της προ-επεξεργασίας, παράγεται το προφίλ έγχυσης και τα αρχεία εισόδου του κώδικα KIVA-3.
- Ο κώδικας KIVA-3 εκτελεί τον υπολογισμό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, παράγοντας αρχεία εξόδου.
- Από μετ-επεξεργασία των αρχεία εξόδου του κώδικα KIVA-3, προκύπτουν οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και οι τιμές των περιορισμών.
- Οι παραπάνω τιμές εισάγονται στον κώδικα EASY, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 3-3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης (Ανδρεάδης, 2008).

3.2.5 Ρύθμιση παραμέτρων βελτιστοποιητή EASY

Στην παρούσα εργασία, ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι ίσος με 2. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι οι εκπομπές NO_x (ανηγμένες στο έργο ανά κύκλο) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specific Fuel Oil Consumption - SFOC). Οι παράμετροι σχεδίασης είναι τέσσερις: η αρχή της πιλοτικής έγχυσης, η αρχή της κύριας έγχυσης, το ποσοστό μείωσης της συνολικά εγχυόμενης μάζας καυσίμου σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, και το ποσοστό της μάζας καυσίμου που εγχύεται κατά την προέγχυση. Τα όριά τους ορίζονται στον κώδικα EASY από τον χρήστη. Το ίδιο συμβαίνει και για τους χρησιμοποιούμενους περιορισμούς, που είναι η μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου και η ταχύτητα έγχυσης του καυσίμου. Για τη βελτιστοποίηση, ο αριθμός των ατόμων κάθε γενιάς καθορίστηκε σε 32, από τους οποίους επιλέγονται 15 ως γονείς, για τη δημιουργία της αμέσως επόμενης γενιάς.

Για τους υπολογισμούς βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης, χρησιμοποιήθηκε η συστοιχία υπολογιστών παράλληλης επεξεργασίας (cluster) “Hydra” της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Τα χαρακτηριστικά του υπολογιστικού συστήματος συνοψίζονται στον Πίνακα 3-1. Για την επίλυση του προβλήματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε έναν πυρήνα, απαιτούνται περίπου 10 ώρες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 32 πυρήνες, για την ταυτόχρονη επίλυση των 32 προβλημάτων κάθε γενιάς (ένας πυρήνας ανά πρόβλημα). Οι υπολογισμοί τερματίστηκαν μετά από 18 γενιές. Έτσι, μειώθηκε σημαντικά η συνολική χρονική διάρκεια των υπολογισμών (περίπου μία εβδομάδα).

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά συμπλέγματος υπολογιστών “HYDRA” του Ε.Μ.Π.

HYDRA CLUSTER					
SERVER					
# of Nodes	CPU Frequency [GHz]	Cores/Nodes	Cores	Memory/Node [Gb]	Memory [Gb]
1	2.3	8	8	8	8
Compute Nodes					
9	1.8	4	36	4	36
7	2.2	4	28	4	28
1	1.8	8	8	10	10
Total					
18			80		82

4 Μοντελοποίηση καύσης βαρέος καυσίμου

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο, γίνεται αρχικά βιβλιογραφική επισκόπηση πειραμάτων σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου, με χρήση διαφορετικών καυσίμων. Τα συγκεκριμένα πειράματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εξέλιξη και πιστοποίηση μοντέλων βαρέος καυσίμου. Εδώ, τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με υπολογισμούς της παρούσας εργασίας, με στόχο τον βέλτιστο προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου καύσης. Για τη μοντελοποίηση της καύσης βαρέος καυσίμου, χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου με βάση τη διπλωματική εργασία του Ν. Κυριακίδη (Κυριακίδης, 2009), ενώ εξελίχθηκε περαιτέρω ο κώδικας KIVA-3, συγκεκριμένα το μοντέλο καύσης, ώστε να ανταποκρίνεται στα χαρακτηριστικά της καύσης βαρέος ναυτικού καυσίμου. Τέλος, το μοντέλο χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της καύσης σε μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα.

4.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία των πειραμάτων σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στην παρούσα βιβλιογραφική επισκόπηση. Οι Struckmeier et al. (2009) και Goldsworthy (2005) πραγματοποίησαν πειράματα χρησιμοποιώντας θάλαμο καύσης σταθερού όγκου (Visual Constant Volume Combustion Chamber – VCVCC) και αναλυτή έναυσης καυσίμου (Fuel Ignitability Analyzer – FIA). Στην παρούσα εργασία, για τον προσδιορισμό των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου καύσης, έγινε χρήση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων της εργασίας των Struckmeier et al. (2009).

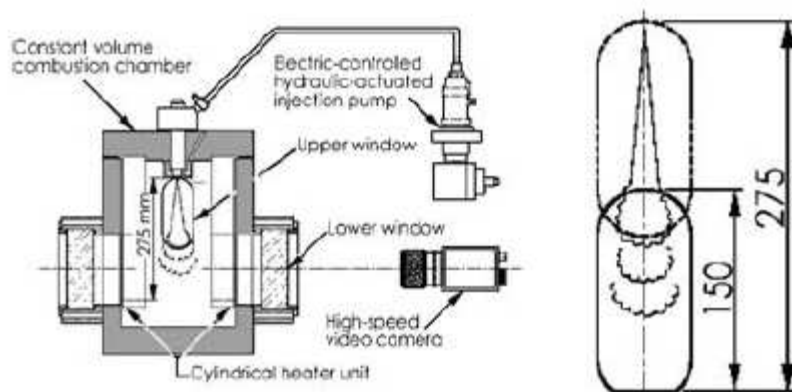
Πίνακας 4-1: Συγκεντρωτικός πίνακας στοιχείων πειραμάτων της βιβλιογραφίας σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου.

	VCVCC (Struckmeier et al.)		FIA (Struckmeier et al.)		CVCC (Goldsworthy)		FIA (Goldsworthy)	
Διάμετρος	150	mm	65	mm	150	mm	65	mm
Μήκος	350	mm	190	mm	350	mm	190	mm
P_{gas}	25	bar	45	bar	25	bar	45	bar
T_{gas}	873	K	823	K	873	K	773	K
P_{fuel}	700	bar	550	bar	500	bar	400	bar
t_{inj}	25	ms	20	ms	25	ms	3.5	ms
m_{fuel}	0.124	gr	0.087	gr	0.124	gr	0.06	gr
d_o	0.16	mm	0.16	mm	0.16	mm	0.32	mm
A_{nozzle}	2.01E-04	cm ²	2.01E-04	cm ²	2.01E-04	cm ²	8.04E-04	cm ²
V_{inj}	258.668	m/s	227.799	m/s	258.668	m/s	223.502	m/s

4.2.1 Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα VCVCC – Struckmeier et al., 2009

Η διάταξη του θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (Visual Constant Volume Combustion Chamber – VCVCC) αναπτύχθηκε από τον Dr. K. Takasaki στο Πανεπιστήμιο Kyushu της Ιαπωνίας. Στην εργασία των Struckmeier et al. (2009), η διάταξη χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την οπτικοποίηση του spray και της διάδοσης της φλόγας εντός του θαλάμου. Ο θάλαμος της διάταξης είναι κυλινδρικός, με βασικά γεωμετρικά δεδομένα: διάμετρος 150 mm, ύψος 350 mm. Η έγχυση του καυσίμου γίνεται από κεντρικό ακροφύσιο, με μία οπή, διαμέτρου 0.16 mm.

Ο θάλαμος είναι εφοδιασμένος με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα έγχυσης του καυσίμου. Ο θάλαμος φέρει δύο παράθυρα στο περίβλημά του, τα οποία επιτρέπουν την οπτική επαφή με το εσωτερικό του. Στην εργασία των Struckmeier et al. (2009), η οπτικοποίηση έγινε με φωτογράφιση ανά 0.5 ms. Εν προκειμένω, έγινε χρήση μιας τεχνικής laser, προκειμένου να προσδιοριστούν η έκταση του καυσίμου που δεν έχει ατμοποιηθεί, και η αντίστοιχη έκταση των σωματιδίων αιθάλης. Στο Σχήμα 4-1, παρουσιάζεται σκαρίφημα της διάταξης, το οποίο περιλαμβάνει τις διαστάσεις των παραθύρων.

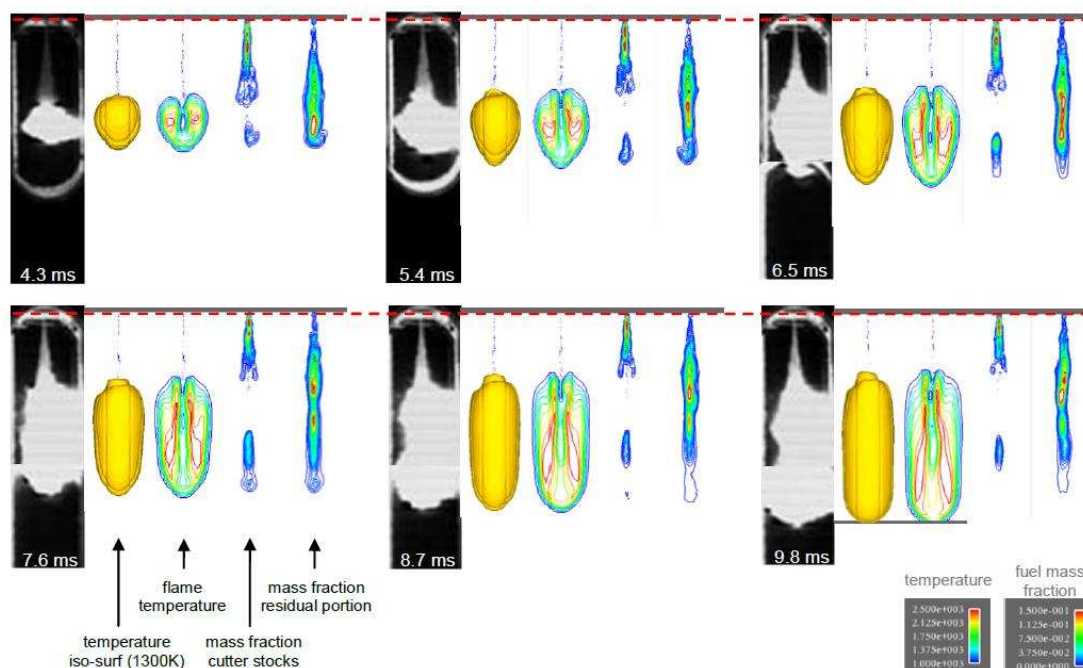


Σχήμα 4-1: Σκαριφηματική απεικόνιση της διάταξης θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (VCVCC), η οποία περιλαμβάνει τις διαστάσεις των παραθύρων του θαλάμου καύσης (Struckmeier et al., 2009).

Στα πειράματα, η πίεση έγχυσης του καυσίμου είναι 700 bar, και η διάρκεια έγχυσης 25 ms. Το καύσιμο εγχύεται σε θερμοκρασία 375 K. Η αρχική θερμοκρασία στον θάλαμο είναι 873 K, η οποία επιτυγχάνεται μέσω ενός κεραμικού θερμαντήρα. Η αρχική πίεση του αέρα είναι 25 bar. Η συνολικά εγχυόμενη μάζα του καυσίμου είναι 0.124 gr. Στην εργασία των Struckmeier et al. (2009) πραγματοποιήθηκαν, επίσης, υπολογισμοί με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3V. Εν προκειμένω, δημιουργήθηκε ορθογωνικό πλέγμα για την προσομοίωση της ροής και καύσης. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη καυσίμου, ένα με «καλή» και ένα με «φτωχή» συμπεριφορά, αναφορικά με την καύση.

Στα παρουσιαζόμενα πειραματικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται φωτογραφίες σε διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα, οι οποίες συγκρίνονται με αντίστοιχα

υπολογιστικά αποτελέσματα. Η συμφωνία πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων ήταν εν γένει πολύ καλή, βλ. π.χ. Σχήμα 4-2.

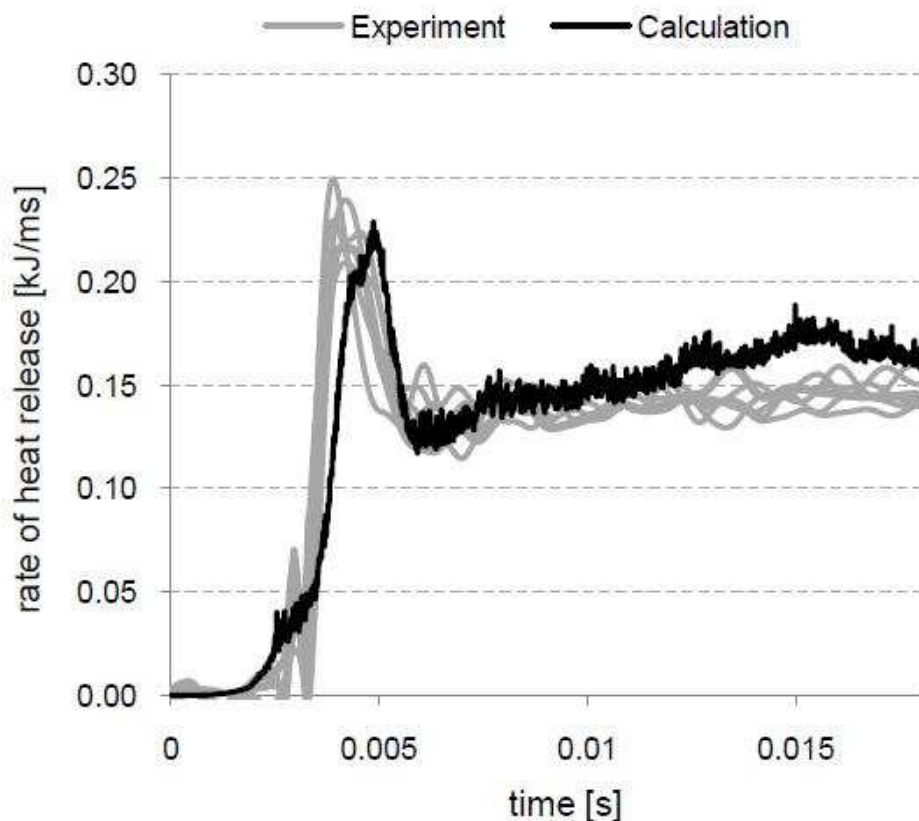


Σχήμα 4-2: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου: οπτικοποίηση του πεδίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (Struckmeier et al., 2009) .

4.2.2 Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα FIA – Struckmeier et al., 2009

Στην εργασία των Struckmeier et al. (2009), παρουσιάζονται επίσης αποτελέσματα σε «αναλυτή έναυσης καυσίμου» (Fuel Ignitability Analyzer - FIA). Η διάταξη περιλαμβάνει κυλινδρικό θάλαμο καύσης, διαμέτρου 190 mm και ύψους 65 mm. Η έγχυση γίνεται από κεντρικό ακροφύσιο, διαμέτρου 0.16 mm. Η αρχική θερμοκρασία του αέρα στον θάλαμο είναι 823 K και η αντίστοιχη πίεση 45 bar. Η πίεση έγχυσης του καυσίμου είναι 550 bar και η διάρκεια έγχυσης 20 ms, με αποτέλεσμα η συνολικά εγχυόμενη μάζα να είναι 0.087 gr καυσίμου. Στην εργασία παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και αποτελέσματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, με χρήση του κώδικα KIVA-3V.

Στην εργασία των Struckmeier et al. (2009) παρουσιάζονται πειραματικές και υπολογιστικές καμπύλες του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Rate Of Heat Release – ROHR) κατά την καύση. Η σύγκριση είναι γενικά ικανοποιητική, βλ. π.χ. Σχήμα 4-3.



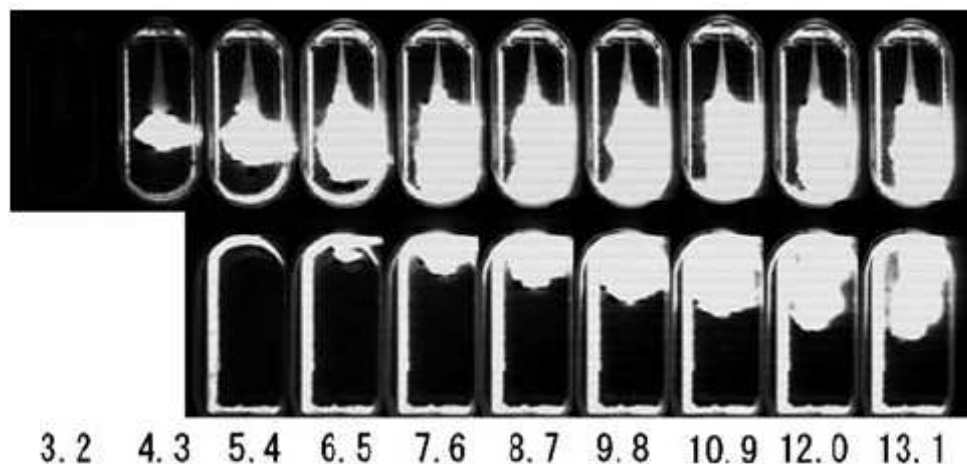
Σχήμα 4-3: Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας συναρτήσει του χρόνου για «καλό» βαρύ καύσιμο: πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Struckmeier et al., 2009) .

4.2.3 Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα CVCC – Goldsworthy, 2005

Ο Goldsworthy (Goldsworthy, 2005) πραγματοποίησε υπολογισμούς CFD σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου, και συνέκρινε τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τα πειράματα των Takasaki et al. (2001). Εν προκειμένω, ρυθμίστηκαν οι σταθερές μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου για βαρύ καύσιμο, και πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με χρήση του κώδικα StarCD 3.2. Η πειραματική διάταξη, η οποία αναφέρεται ως «θάλαμος καύσης σταθερού όγκου» (Constant Volume Combustion Chamber – CVCC) περιλαμβάνει τον θάλαμο καύσης VCVCC των Struckmeier et al. (2009).

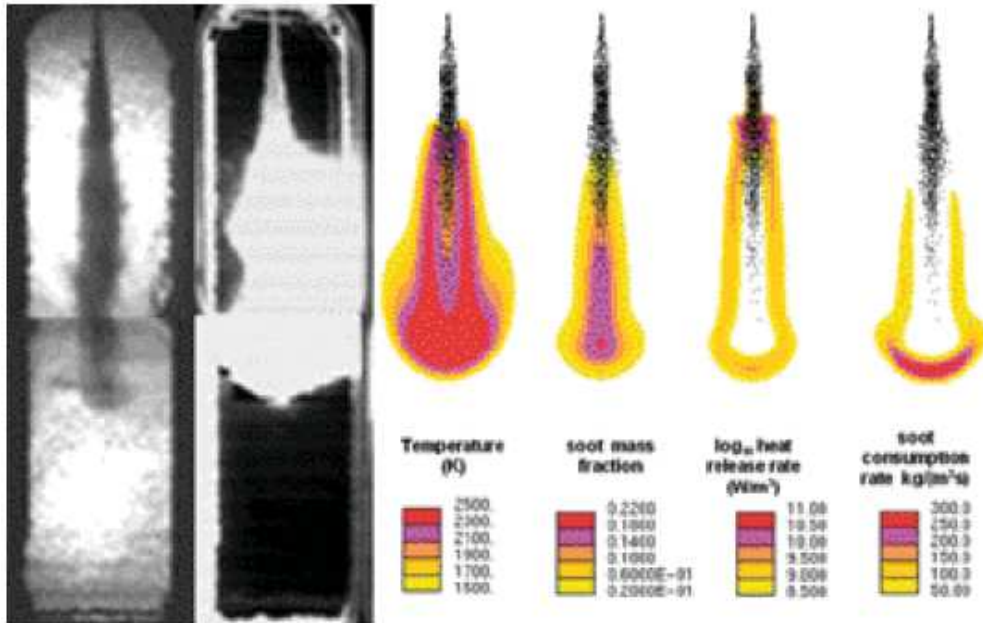
Οι περιπτώσεις που μελετούνται στην εργασία του Goldsworthy (2005) αντιστοιχούν σε αρχική πίεση και θερμοκρασία του αέρα ίσες με 25 bar και 873 K, αντίστοιχα. Η πίεση έγχυσης είναι 500 bar, με διάρκεια 25 ms, αντιστοιχώντας σε συνολικά εγχύμενη μάζα καυσίμου ίση με 0.124 gr. Για την προσομοίωση, δημιουργήθηκε κατάλληλο υπολογιστικό πλέγμα σε περιβάλλον StarCD. Στην εργασία, έγινε χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Takasaki et al. (2001), για τη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου καύσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν: α) εικόνες της

φλόγας για χρήση ενός «καλού» και ενός «κακού» καυσίμου, βλ. Σχήμα 4-4, και β) δεδομένα για το μήκος διεξόδου της δέσμης καυσίμου.

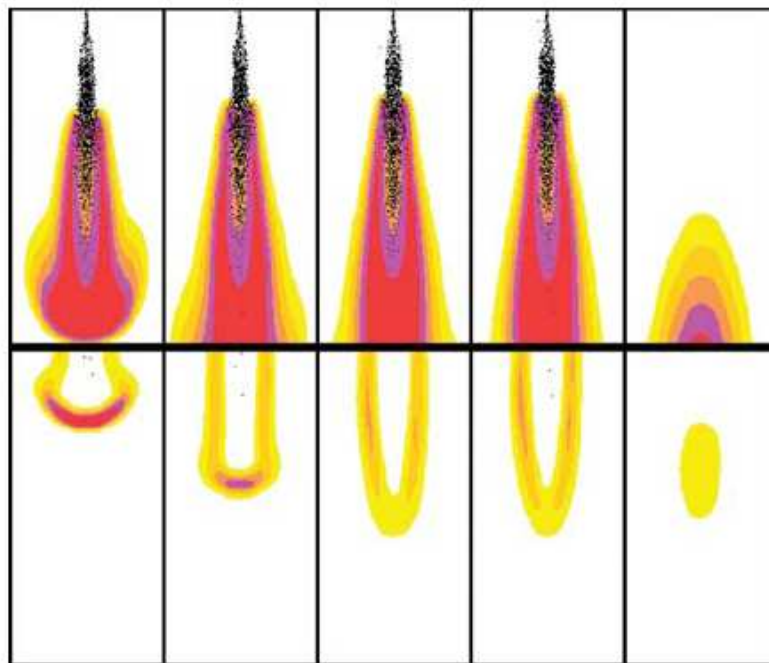


Σχήμα 4-4: Οπτικοποίηση της διάδοσης φλόγας σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου (CVCC) (Takasaki et al., 2001). Οι αναφερόμενες τιμές χρόνου (ms) είναι σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Η οπτικοποίηση επιτυγχάνεται με την παρουσία δύο παραθύρων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρή αλληλοεπικάλυψη κατά την κύρια κατεύθυνση της ροής του καυσίμου.

Στην εργασία του Goldsworthy παρουσιάζονται υπολογιστικά αποτελέσματα αναφορικά με τη διεξόδου της δέσμης καυσίμου, την κατανομή της θερμοκρασίας, τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας και την κατανομή των σωματιδίων αιθάλης, και συγκρίνονται με αποτελέσματα οπτικοποίησης του φαινομένου, των Takasaki et al. (2001). Γενικά, η συμφωνία είναι πολύ ικανοποιητική, βλ. Σχήματα 4-5 και 4-6.



Σχήμα 4-5: Αριστερά: οπτικοποίηση του spray και της φλόγας σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου (CVCC) (πειράματα των Takasaki et al., 2001). Δεξιά: ισοϋψείς καμπύλες θερμοκρασίες, κλάσματος μάζας σωματιδίων αιθάλης, ρυθμού έκλυσης θερμότητας, και ρυθμού οξειδωσης αιθάλης (υπολογισμοί CFD του Goldsworthy, 2005). Τα αποτελέσματα αφορούν σε «καλό» καύσιμο. Το πεδίο αντιστοιχεί σε χρόνο 6 ms μετά την έναρξη της καύσης.



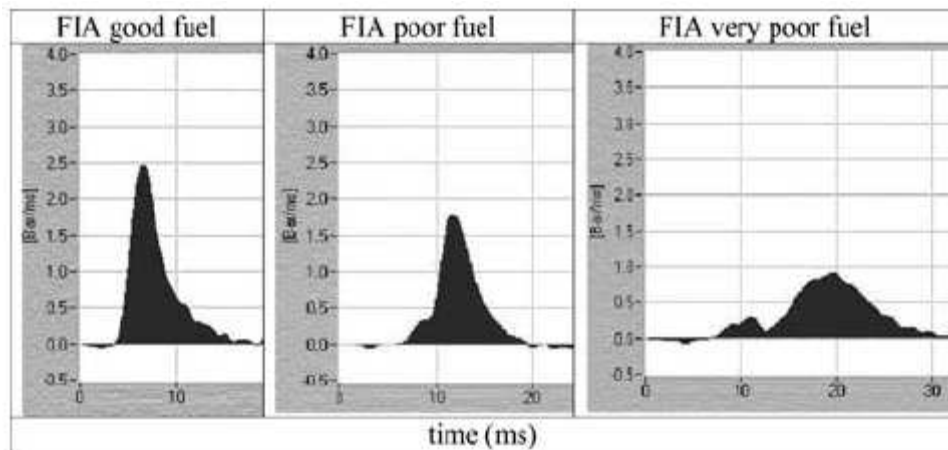
Σχήμα 4-6: Υπολογιστικά αποτελέσματα καύσης σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου (CVCC) (Goldsworthy, 2005), για «καλό καύσιμο», για χρονικές στιγμές 10, 15, 20, 25 και 30 ms μετά την αρχή της έγχυσης. Άνω παράθυρο: ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας. Κάτω παράθυρο: ισοϋψείς καμπύλες του ρυθμού οξειδωσης των σωματιδίων αιθάλης. Τα παράθυρα χαρακτηρίζονται από μικρή αλληλοεπικάλυψη κατά την κύρια κατεύθυνση της ροής του καυσίμου.

4.2.4 Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα FIA – Goldsworthy, 2005

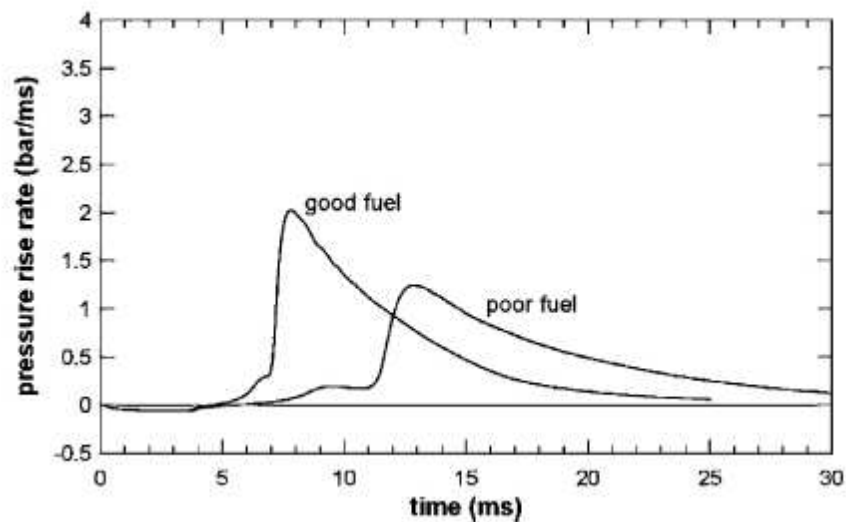
Στην εργασία του Goldsworthy (2005), παρουσιάζονται επίσης αποτελέσματα σε «αναλυτή έναυσης καυσίμου» (Fuel Ignitability Analyzer - FIA). Η συγκεκριμένη διάταξη διαθέτει κυλινδρικό θάλαμο καύσης, διαμέτρου 190 mm και ύψους 65 mm, και κεντρικό ακροφύσιο, διαμέτρου 0.32 mm. Η αρχική θερμοκρασία του αέρα στον θάλαμο είναι 773 K και η αρχική πίεση 45 bar. Η πίεση έγχυσης του καυσίμου είναι 400 bar, η διάρκεια έγχυσης 3.5 ms και η συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου 0.06 gr. Στην εργασία του Goldsworthy (2005), παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και αποτελέσματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, με χρήση του κώδικα StarCD 3.2, αναφορικά με τον χρονικό ρυθμό μεταβολής της πίεσης εντός του θαλάμου καύσης (ο οποίος, σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου, είναι ευθέως ανάλογος του ρυθμού έκλυσης θερμότητας).

Στην εργασία του Goldsworthy (2005) σημειώνεται ότι οι μετρήσεις, βλ. Σχήμα 4-7, αντιπροσωπεύουν τον μέσο όρο από δέκα ή περισσότερες δοκιμές υπό σταθερές συνθήκες. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την ύπαρξη μεταβλητότητας μεταξύ διαφορετικών δοκιμών στη διεργασία της καύσης, γεγονός που επιβεβαιώνει τον στοχαστικό χαρακτήρα της καύσης, και γενικότερα αντίστοιχων πειραμάτων σε συνθήκες τυρβώδους ροής. Στην εργασία του Goldsworthy παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για τρεις ποιότητες καυσίμου, μία καλή (good fuel), μία φτωχή (poor fuel) και μία πολύ φτωχή (very poor fuel). Τα αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα (καλή και φτωχή ποιότητα καυσίμου) παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-8.

Συγκρίνοντας τα υπολογιστικά με τα πειραματικά αποτελέσματα, παρατηρείται ότι, στην αριθμητική προσομοίωση, οι τιμές της καθυστέρησης έναυσης και του μέγιστου ρυθμού μεταβολής της πίεσης του καλού καυσίμου (good fuel) είναι μεταξύ των αντίστοιχων πειραματικών τιμών της καλής και φτωχής ποιότητας καυσίμου. Αντίστοιχα, οι υπολογισθείσες τιμές καθυστέρησης έναυσης και μέγιστου ρυθμού μεταβολής της πίεσης στην περίπτωση φτωχού καυσίμου (poor fuel) είναι μεταξύ των αντίστοιχων πειραματικών τιμών φτωχής και πολύ φτωχής ποιότητας καυσίμου. Λαμβάνοντας υπόψη και τον στοχαστικό χαρακτήρα των πειραμάτων, μπορεί να θεωρηθεί ότι η συμφωνία μεταξύ αποτελεσμάτων CFD και πειραματικών είναι ικανοποιητική.

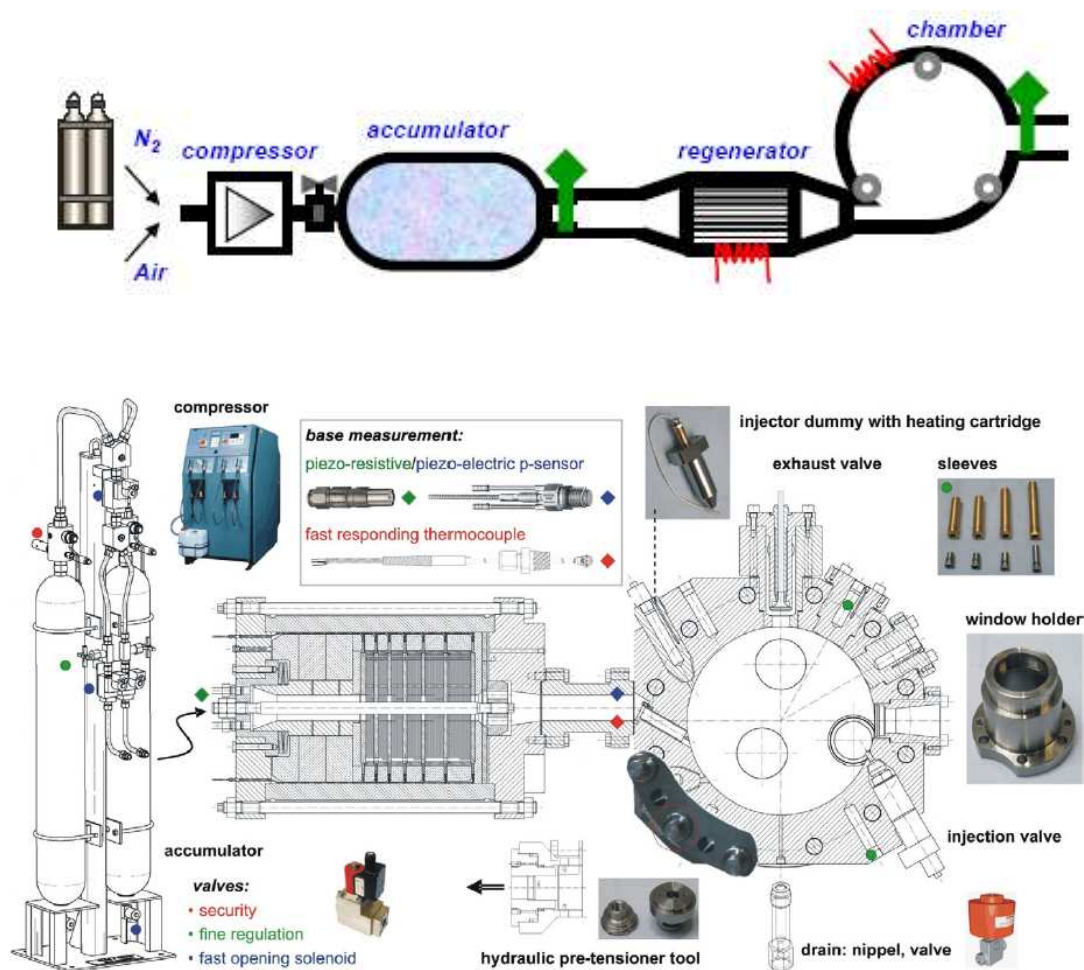


Σχήμα 4-7: Ρυθμός μεταβολής της πίεσης (bar/ms) συναρτήσει του χρόνου, με βάση μετρήσεις σε αναλυτή έναυσης καυσίμου (FIA), για καλή, φτωχή και πολύ φτωχή ποιότητα βαρέος καυσίμου (*Fueltech AS, Norway*) (Goldsworthy, 2005).



Σχήμα 4-8: Ρυθμός μεταβολής της πίεσης (bar/ms) συναρτήσει του χρόνου, με βάση αποτελέσματα CFD σε αναλυτή έναυσης καυσίμου (FIA), για καλή και φτωχή ποιότητα βαρέος καυσίμου (Goldsworthy, 2005).

4.2.5 Θάλαμος καύσης σταθερού όγκου με συνθήκες αντίστοιχες μεγάλου ναυτικού κινητήρα Diesel



Σχήμα 4-9: Σκαριφηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης θαλάμου καύσης σταθερού όγκου, και επιμέρους τμήματα αυτής (Herrmann et al., 2007).

Η εφαρμογή μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε μεγάλους αργόστροφους ναυτικούς κινητήρες είναι έως σήμερα σχετικά περιορισμένη, σε σχέση με τους μικρότερους κινητήρες της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην έλλειψη πειραματικών δεδομένων σχετικών με τα χαρακτηριστικά του spray, της καύσης και της σύνθεσης ρύπων, τα οποία είναι απαραίτητα για την πιστοποίηση των υπολογιστικών μοντέλων. Βασική αιτία για το τελευταίο αποτελεί το γεγονός ότι οι μικρές διατάξεις που κατά καιρούς αναπτύσσονται αντιστοιχούν σε τιμές των αδιάστατων παραμέτρων που επηρεάζουν τη δυναμική του spray και της καύσης, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές μικρότερων κινητήρων, αλλά όχι των μεγάλων ναυτικών κινητήρων.

Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος Hercules πειραματική διάταξη η οποία περιλαμβάνει θάλαμο καύσης

σταθερού όγκου, με διαστάσεις και συνθήκες λειτουργίας αντίστοιχες με αυτές μεγάλων ναυτικών κινητήρων Diesel (Herrmann et al., 2007, 2009). Οι προδιαγραφές της διάταξης επιτρέπουν τη λειτουργία τόσο με καύσιμο Diesel όσο και με βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο.

Τα κύρια τμήματα της διάταξης είναι το αεριοφυλάκιο, ο αναγεννητής θερμότητας, στον οποίο θερμαίνεται το αέριο, και ο θάλαμος καύσης, βλ. Σχήμα 4-9. Η διάταξη διαθέτει επίσης σύστημα έγχυσης κοινού συλλέκτη. Ο θάλαμος καύσης έχει εσωτερική διάμετρο 500 mm, ίση με τη διάμετρο κυλίνδρου του δίχρονου ναυτικού κινητήρα RT-flex50 της Wärtsilä, και συγχρόνως του μεγάλου τετράχρονου κινητήρα 50DF του ίδιου κατασκευαστή. Το ύψος του θαλάμου είναι 150 mm. Ο θάλαμος αποτελείται από το κύριο σώμα και δύο καπάκια. Το ένα εξ αυτών διαθέτει τρία παράθυρα, διαμέτρου 120 mm έκαστο, διαμέσου των οποίων είναι δυνατή η οπτική επαφή με το εσωτερικό του θαλάμου. Τα παράθυρα διαθέτουν διάφανες θυρίδες, με αντοχή έως 250 bar. Συνήθως, μόνο το ένα παράθυρο χρησιμοποιείται για οπτικοποίηση, και στα υπόλοιπα τοποθετούνται καλύμματα με πρόσθετους αισθητήρες ή θερμοαντικά στοιχεία.

Κατά την έγχυση του καυσίμου, οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας εντός του θαλάμου καύσης πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων. Έτσι, υπάρχουν δύο αεριοφυλάκια, χωρητικότητας 50 lt έκαστο, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση 360 bar, τα οποία πληρούνται με αέριο (αέρα ή άζωτο), με τη βοήθεια ενός συμπιεστή. Κατά τη λειτουργία, το αέριο διέρχεται διαμέσου του αναγεννητή, θερμαίνεται και καταλήγει στον θάλαμο καύσης. Η θέρμανση του αερίου υποστηρίζεται επίσης από ηλεκτρική θέρμανση, μέσω αντιστάσεων, του σώματος του θαλάμου καύσης. Η ταχεία πλήρωση του θαλάμου, σε συνδυασμό με τη θέρμανση του θαλάμου, συντελούν στη μείωση των απωλειών θερμότητας.

Η εισαγωγή του αερίου στον θάλαμο καύσης γίνεται μέσω τριών αυλών σε σειρά, οι οποίοι βρίσκονται υπό κλίση, δημιουργώντας εγκάρσια συστροφή (swirl) της ροής, βλ. Σχήμα 4-10.



Σχήμα 4-10: Γεωμετρικό μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής του θαλάμου καύσης σταθερού όγκου, το οποίο περιλαμβάνει τμήμα του αγωγού εισαγωγής (Herrmann et al., 2007).

Το καύσιμο εγχύεται μέσω ενός έως τριών εγχυτήρων τοποθετημένων περιμετρικά στο σώμα του θαλάμου, ο καθένας από τους οποίους μπορεί να έχει μία έως πέντε οπές διαμέτρου περίπου ενός χιλιοστού, σε αντιστοιχία με μεγάλους ναυτικούς κινητήρες Diesel. Με περιστροφή των καπακιών του θαλάμου, τα παράθυρα καταλαμβάνουν διαφορετικές θέσεις, και έτσι καθίσταται δυνατή η οπτικοποίηση διαφορετικών περιοχών του θαλάμου.

Το σύστημα κοινού συλλέκτη (CRS) που έχει εγκατασταθεί στη διάταξη περιλαμβάνει αντλία υψηλής πίεσης, κινούμενη από ηλεκτροκινητήρα, η οποία τροφοδοτεί τον συλλέκτη καυσίμου. Το χρονικό προφίλ της έγχυσης ρυθμίζεται από ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου.

Τα προϊόντα της καύσης εξέρχονται του θαλάμου μέσω της βαλβίδας εξαγωγής, βλ. Σχήμα 4-9. Κατά τη φάση της καύσης, οι θυρίδες εισαγωγής παραμένουν ανοιχτές, με αποτέλεσμα τα καυσαέρια να επιστρέφουν στον αναγεννητή, και να τον θερμαίνουν. Με τον παραπάνω τρόπο, επιτυγχάνεται μερική εκτόνωση στον θάλαμο καύσης. Το μικρό μέγεθος των αγωγών ροής εντός του αναγεννητή δεν επιτρέπει τη διάδοση της φλόγας προς τη μονάδα παροχής αέρα.

Η παραπάνω σύνθετη πειραματική διάταξη αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη λήψη πειραματικών δεδομένων, με στόχο την κατανόηση της θερμορυστομηχανικής σε συνθήκες αντιπροσωπευτικές ναυτικών κινητήρων Diesel, και την υποστήριξη της ανάπτυξης και πιστοποίησης φυσικών μοντέλων, για εφαρμογές υπολογιστικής ρυστοδυναμικής.

4.3 Προσομοίωση της Καύσης σε Θαλάμους Καύσης Σταθερού Όγκου

Στην παρούσα εργασία, για τον καθορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος καυσίμου, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που αναπτύχθηκε πρόσφατα στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του Ν. Κυριακίδη (Κυριακίδης, 2009). Εδώ, έγινε ρύθμιση των παραμέτρων του χρησιμοποιούμενου μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, με χρήση των πειραματικών δεδομένων των Struckmeier et al. (2009) για αναλυτή έναυσης καυσίμου (FIA) και θάλαμο σταθερού όγκου με δυνατότητα οπτικοποίησης (VCVCC).

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζουμε υπολογιστικά αποτελέσματα που αντιστοιχούν στα πειράματα των Struckmeier et al. (2009) για τους θαλάμους καύσης FIA και VCVCC. Εδώ, χρησιμοποιούμε τον κώδικα KIVA-3, με θερμοφυσικές ιδιότητες αυτές του βαρέος καυσίμου (Κυριακίδης, 2009). Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας και στη διάδοση της φλόγας. Με σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα των Struckmeier et al. (2009), επιλέγονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

4.3.1 Μοντελοποίηση Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA)

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.2.2, στην εργασία των Struckmeier et al. (2009) περιλαμβάνονται διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας στον θάλαμο FIA, βλ. Σχήμα 4-3. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα χρησιμοποιήθηκαν στη βέλτιστη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου.

Συμπεριφορά Μοντέλου Καύσης

Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 3.1.3, το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο συνιστά ένα μίγμα ελαφρού καυσίμου (cutter) και καυσίμου καταλοίπων (residual). Κατά τη διεργασία της καύσης, ατμοποιείται και καίγεται αρχικά το ελαφρύτερο τμήμα του καυσίμου, και ακολούθως, μετά την αύξηση της θερμοκρασίας και πίεσης, καίγεται το βαρύτερο τμήμα.

Σύμφωνα με το διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας του Σχήματος 4-3, μετά από την αρχική περίοδο καθυστέρησης έναυσης, η καύση εξελίσσεται ταχέως και χαρακτηρίζεται από υψηλό ρυθμό έκλυσης θερμότητας (μέχρι χρόνο περίπου 5 ms), και στη συνέχεια εξελίσσεται με περίπου σταθερό (χαμηλότερο) ρυθμό. Τα δύο στάδια της καύσης μπορούν να αντιστοιχηθούν με την καύση του ελαφρού (cutter) και του τμήματος καταλοίπων (residual). Για τη μοντελοποίηση των δύο φάσεων της καύσης του βαρέος καυσίμου, θεωρούμε ότι ένα ποσοστό αποτελεί το ελαφρύ, και το υπόλοιπο το τμήμα καταλοίπων. Με την ολοκλήρωση της καύσης του ελαφρού τμήματος, θεωρούμε ότι στο μοντέλο καύσης αλλάζουν οι τιμές του προεκθετικού παράγοντα και της ενέργειας ενεργοποίησης, ώστε αυτές να αντιστοιχούν στο τμήμα καταλοίπων. Έτσι, αυξάνει η τιμή του χαρακτηριστικού χρόνου τ_{lam} , βλ. Ενότητα 3.1.3. Έτσι, ο ρυθμός καύσης, προσδιορίζεται κάθε φορά από την ακόλουθη σχέση, για διαφορετικές τιμές των μεταβλητών A και E:

$$RATE = A[FUEL]^{0.25} [O_2]^{1.5} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Στο παραπάνω πλαίσιο, εισήχθησαν στον κώδικα KIVA-3 οι ακόλουθες νέες μεταβλητές:

- percut* : ποσοστό μάζας ελαφρού τμήματος (cutter)
- efres* : ενέργεια ενεργοποίησης *E* τμήματος καταλοίπων (residual), διαιρεμένη με την παγκόσμια σταθερά των αερίων
- cfres* : προεκθετικός παράγοντας *A* (pre-exponential factor) τμήματος καταλοίπων

Επιπλέον, οι εξής υπάρχουσες μεταβλητές αφορούν στα ακόλουθα:

- efl* : ενέργεια ενεργοποίησης *E* ελαφρού τμήματος (cutter), διαιρεμένη με την παγκόσμια σταθερά των αερίων
- cfl* : προεκθετικός παράγοντας *A* (pre-exponential factor) ελαφρού τμήματος (cutter)

Στον κώδικα επίσης εισήχθηκε η μεταβλητή:

$$frburned = \frac{\text{μάζα καυσίμου που έχει καεί}}{\text{ολική μάζα καυσίμου}}$$

Όταν η τιμή του λόγου *frburned* γίνεται μεγαλύτερη από το ποσοστό του ελαφρού καυσίμου (*cutter*), *frburned* > *percut*, δηλαδή όταν έχει καεί όλο το ελαφρύ καύσιμο, συνεχίζεται η καύση (του βαρέος τμήματος) με χαμηλότερο ρυθμό, ο οποίος καθορίζεται από τις τιμές των μεταβλητών *efres* και *cfres*. Για παράδειγμα, αν η μεταβλητή *percut* έχει την τιμή 0.20, αυτό σημαίνει πως 20% της μάζας του καυσίμου θα καεί με ρυθμό που αντιστοιχεί στο ελαφρύ τμήμα, και στη συνέχεια το υπόλοιπο 80% θα καεί με ρυθμό που αντιστοιχεί στο τμήμα καταλοίπων. Η παραπάνω ρύθμιση του μοντέλου καύσης είναι επαρκής στην περίπτωση συνεχούς έγχυσης, όπως αυτή των πειραμάτων στον θάλαμο FIA (Struckmeier et al., 2009). Με σύγκριση με πειραματικά δεδομένα ρυθμού έκλυσης θερμότητας, μπορούν να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων *A* και *E*, κατά τα δύο στάδια της καύσης, με παράλληλη ρύθμιση της μεταβλητής του κώδικα *wtturb*, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του χαρακτηριστικού χρόνου τυρβώδους ανάμιξης (τ_{turb}) βλ. Ενότητα 3.1.3. Η τιμή της παραμέτρου *wtturb* διατηρείται η ίδια, καθόλη τη διάρκεια της καύσης.

Στην περίπτωση ύπαρξης πιλοτικής έγχυσης, το παραπάνω μοντέλο θα προέβλεπε ότι:
Α) για ποσοστό μάζας προέγχυσης μικρότερο από το ποσοστό μάζας του ελαφρού τμήματος, όλο το καύσιμο της προέγχυσης θα καεί ως ελαφρύ.
Β) για ποσοστό μάζας προέγχυσης μεγαλύτερο από το ποσοστό μάζας του ελαφρού τμήματος, ένα σημαντικό ποσοστό (ίσο με το συνολικό ποσοστό του ελαφρού) θα καεί ως ελαφρύ, και ένα μικρό τμήμα (το υπόλοιπο) ως τμήμα καταλοίπων. Επιπλέον, κατά την κύρια έγχυση, όλο το εγχυόμενο καύσιμο θα καεί ως τμήμα καταλοίπων.

Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο προσαρμόστηκε, ώστε σε κάθε επιμέρους έγχυση, το ποσοστό του καυσίμου που καίγεται ως ελαφρύ τμήμα να είναι ίσο με το συνολικό ποσοστό του ελαφρού τμήματος στο καύσιμο. Αντίστοιχα, στον κώδικα KIVA-3 εισήχθησαν οι ακόλουθες νέες μεταβλητές:

PILOT_MC : εγχυόμενη μάζα καυσίμου κατά τη φάση της προέγχυσης
tminj2tot : εγχυθείσα μάζα καυσίμου μέχρι την τρέχουσα χρονική στιγμή

Όσο η εγχυθείσα μάζα καυσίμου παραμένει μικρότερη από την εγχυόμενη μάζα κατά την προέγχυση (*tminj2tot* < *PILOT_MC*), δηλαδή κατά την καύση της μάζας προέγχυσης, η τιμή της παραμέτρου *frburned* υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$frburned = \frac{\text{μάζα καυσίμου που έχει καεί}}{\text{μάζα προέγχυσης καυσίμου}}$$

Για *frburned* < *percut*, το καύσιμο καίγεται με ρυθμό που αντιστοιχεί στο ελαφρύ τμήμα, και στη συνέχεια, με ρυθμό που αντιστοιχεί στο τμήμα καταλοίπων.

Για τιμές της εγχυθείσας μάζας μεγαλύτερες της μάζας προέγχυσης ($t_{minj2tot} > PILOT_MC$), δηλαδή κατά την καύση της μάζας της κύριας έγχυσης, η τιμή της παραμέτρου $frburned$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$frburned = \frac{(μάζα\ καυσ.\ που\ έχει\ καεί) - (μάζα\ προέγχ.\ καυσ.)}{(συν.\ εγχ.\ μάζα\ καυσ.) - (μάζα\ προέγχ.\ καυσ.)}$$

Καί κατά τη φάση αυτή, όσο ισχύει η ανισότητα $frburned < percut$, το καύσιμο καίγεται με ρυθμό που αντιστοιχεί στο ελαφρύ τμήμα, και στη συνέχεια, με ρυθμό που αντιστοιχεί στο τμήμα καταλοίπων.

Με την προσαρμογή αυτή επιτυγχάνεται η ισοκατανομή των ποσοστών του καυσίμου που καίγονται ως ελαφρύ τμήμα και τμήμα καταλοίπων σε όλες τις επιμέρους εγχύσεις. Είναι προφανές πως, αν δοθεί στη μεταβλητή $PILOT_MC$ η τιμή μηδέν, τότε το πρόβλημα εκφυλίζεται στην περίπτωση μίας μόνο έγχυσης ανά κύκλο λειτουργίας, με συμπεριφορά ως προς το ρυθμό καύσης που αντιστοιχεί στην αρχική περιγραφή.

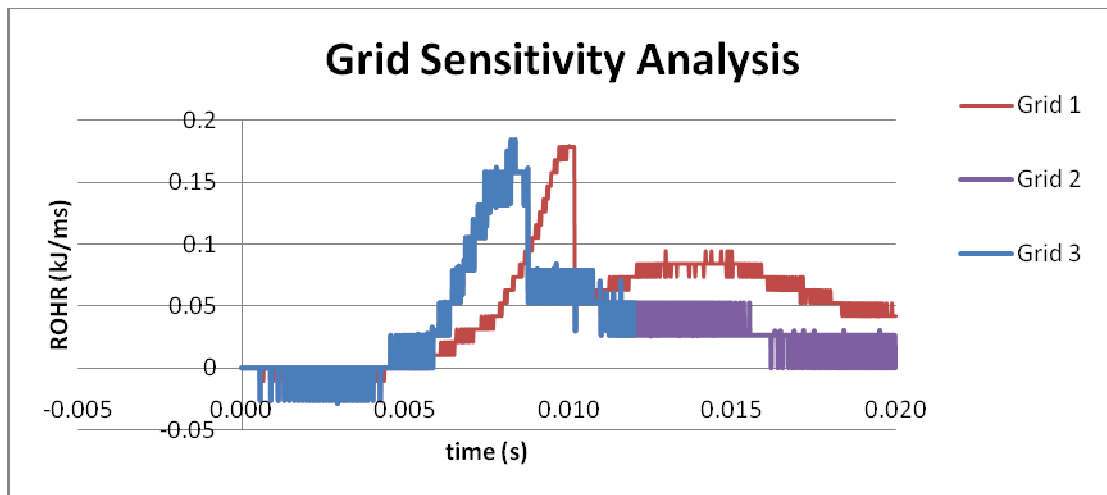
Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος

Για τη μοντελοποίηση των πειραμάτων στον Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA), είναι απαραίτητη η διακριτοποίηση της γεωμετρίας, και η δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος. Εδώ, δημιουργήθηκαν συνολικά τρία πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας, βλ. Πίνακα 4-2, και μελετήθηκε η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε σχέση με την πυκνότητα του πλέγματος.

Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά των τριών πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν για την προσομοίωση του Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA): αριθμός κόμβων στην ακτινική, αζιμουθιακή και αξονική κατεύθυνση.

	N_r	N_θ	N_z
GRID 1	7	20	38
GRID 2	12	30	50
GRID 3	22	36	70

Στο Σχήμα 4-11 παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, για τα τρία πλέγματα που δημιουργήθηκαν. Οι τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων είναι αυτές του βαρέος καυσίμου (Κυριακίδης, 2009), ενώ στο μοντέλο καύσης οι τιμές της ενέργειας ενεργοποίησης της αντίδρασης και του προεκθετικού παράγοντα αντιστοιχούν σε αυτές του δεκατετρανίου. Το χρονικό βήμα διατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις σταθερό, ίσο με $2 \cdot 10^{-5}$ s. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4-11, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την πυκνότητα του πλέγματος. Τα αποτελέσματα των πυκνών πλεγμάτων 2 και 3 πρακτικά ταυτίζονται, αλλά είναι διαφορετικά από αυτά του αραιού πλέγματος 1. Έτσι, για τους περαιτέρω υπολογισμούς επιλέγεται το πλέγμα 2, επειδή αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων, και ταυτόχρονα μειωμένες απαιτήσεις υπολογιστικού χρόνου σε σχέση με το πυκνότερο πλέγμα 3.

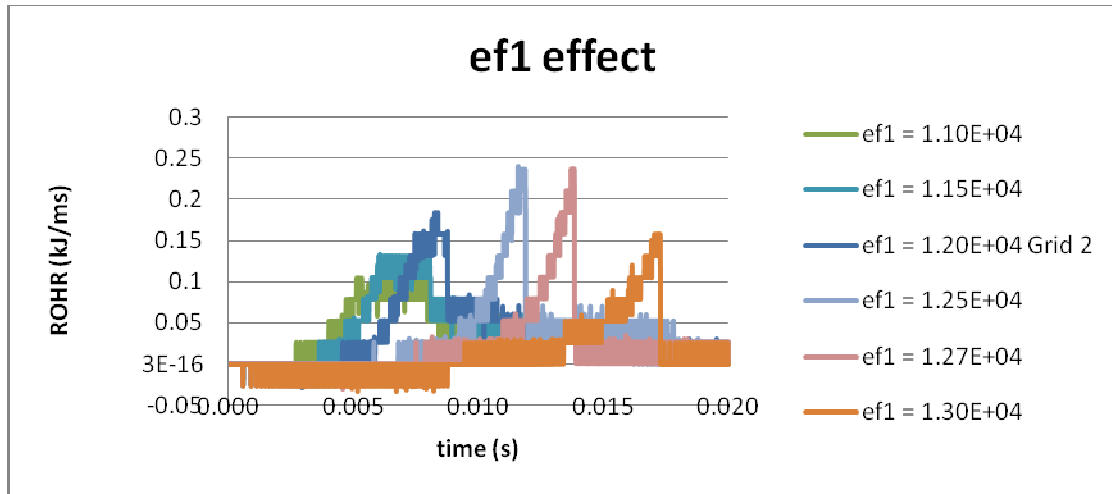


Σχήμα 4-11: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας στον Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA) συναρτήσει του χρόνου, για τα τρία υπολογιστικά πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας (βλ. Πίνακα 4-2).

Ακολούθως, αναλύονται αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του πλέγματος 2. Στο Σχήμα 4-11 παρατηρείται ότι, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του Σχήματος 4-3, οι υπολογισμοί δίνουν μεγαλύτερη καθυστέρηση έναυσης, καθώς και ηπιότερο ρυθμό καύσης.

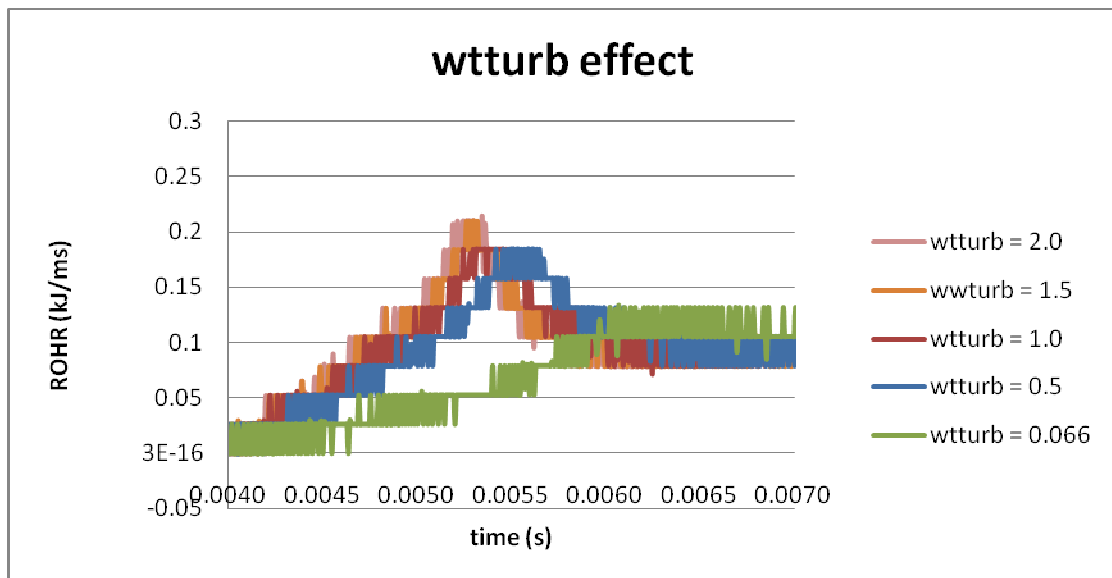
Ακολούθως, παρουσιάζονται αποτελέσματα με χρήση του παρόντος μοντέλου καύσης, το οποίο συνίσταται στη διαδοχική καύση ενός ελαφρού και ενός βαρέος τμήματος. Εδώ, το ελαφρύ τμήμα αποτελεί το 20% της σύστασης του καυσίμου. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά υπολογισμών, με στόχο τον προσδιορισμό βέλτιστου συνδυασμού τιμών του προεκθετικού παράγοντα και της ενέργειας ενεργοποίησης της αντίδρασης για το ελαφρύ και βαρύ τμήμα του καυσίμου, καθώς και της παραμέτρου *wtturb* του μοντέλου καύσης (μεταβλητές: *cf1*, *ef1*, *cfres*, *efres*, *wtturb*). Οι αρχικές τιμές επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις συστάσεις του Goldsworthy (2005), για αντίστοιχο μοντέλο βαρέος καυσίμου.

Αρχικά, έγινε μεταβολή μόνο της τιμής της ενέργειας ενεργοποίησης του ελαφρού τμήματος (μεταβλητή: *ef1*). Η επίδραση στη χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-12. Παρατηρείται ότι, για αύξηση της τιμής της μεταβλητής *ef1* από 1.10^E+04 σε $1.25^E+04 K^{-1}$, η μέγιστη τιμή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας προσεγγίζει τα πειραματικά επίπεδα, ταυτόχρονα όμως αυξάνεται, όπως είναι αναμενόμενο από την αντίδραση ενός βήματος, η καθυστέρηση έναυσης. Η εντονότερη καύση για μεγαλύτερες τιμές της μεταβλητής *ef1* πρέπει να αποδοθεί στην ύπαρξη μεγαλύτερης ποσότητας εξαμισθέντος καυσίμου (λόγω της μεγαλύτερης καθυστέρησης έναυσης).



Σχήμα 4-12: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας στον Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA) συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής $ef1$ (ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης καύσης του ελαφρού τμήματος διαιρεμένη με την παγκόσμια σταθερά των αερίων).

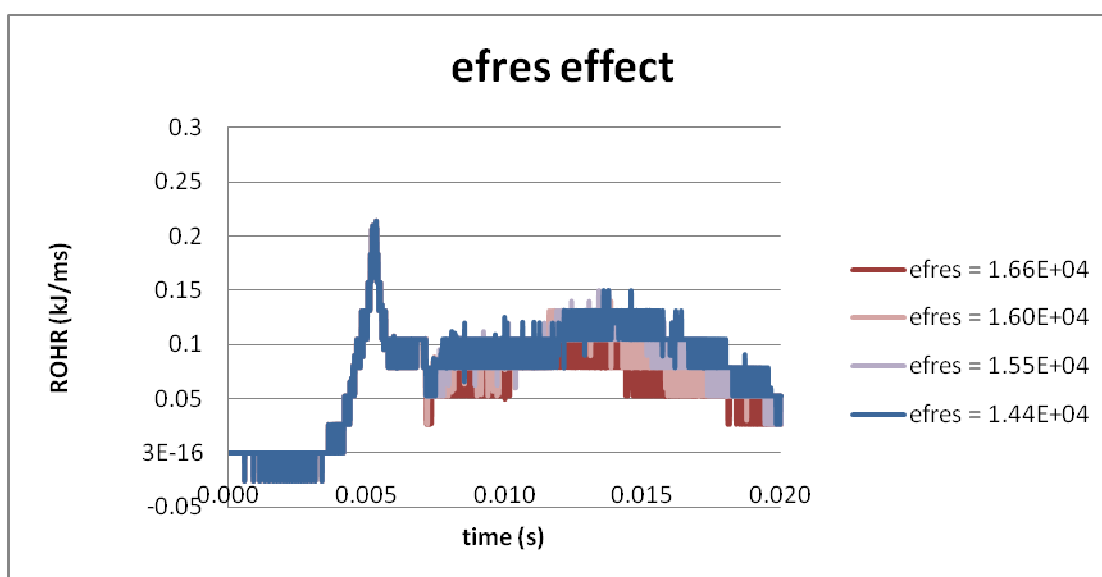
Για την επίτευξη τιμών του ρυθμού έκλυσης θερμότητας οι οποίες να βρίσκονται εγγύτερα προς τις πειραματικές, μεταβλήθηκαν οι τιμές της παραμέτρου $wtturb$, η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού ανάμιξης καυσίμου αέρα (μεταβλητή: $wtturb$). Εδώ, διατηρήθηκε σταθερή η τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης της αντίδρασης, αντιστοιχώντας σε $ef1 = 1.15E+04 K^{-1}$. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-13, συμπεραίνεται ότι αύξηση της τιμής του $wtturb$ συνεπάγεται αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, λόγω της αντίστοιχης αύξησης του ρυθμού ανάμιξης καυσίμου-αέρα. Με βάση το Σχήμα 4-13, επιλέγεται $wtturb = 2.0$, τιμή που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια.



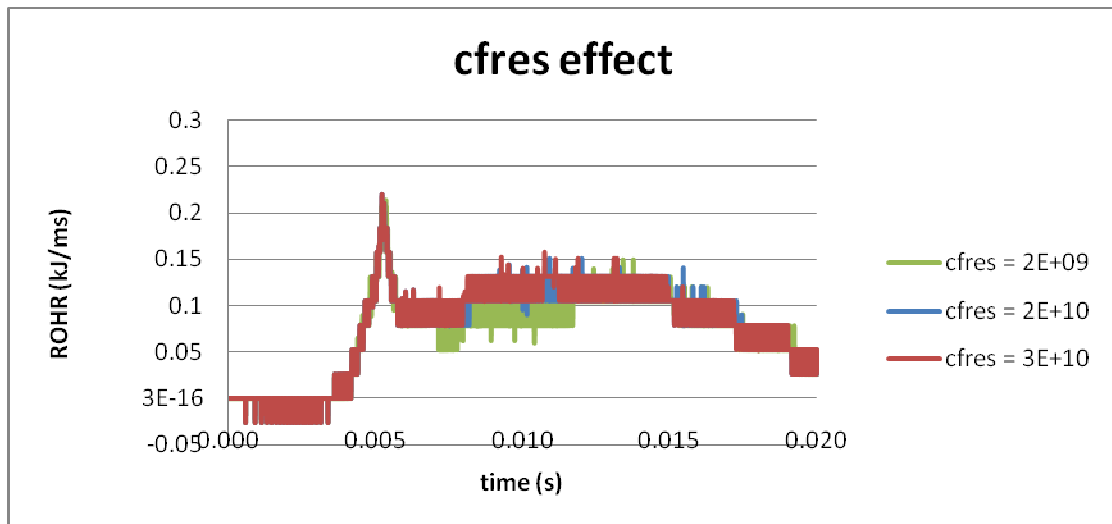
Σχήμα 4-13: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας στον Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA) συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής $wtturb$. Εδώ, $ef1=1.15E+04 K^{-1}$.

Στο Σχήμα 4-13, για τιμές του χρόνου μεγαλύτερες από περίπου 0.006 s, οι καμπύλες αντιστοιχούν στην καύση του βαρέος τμήματος του καυσίμου. Για το διάστημα αυτό, οι υπολογιζόμενες τιμές πρέπει να είναι σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές, βλ. Σχήμα 4-3. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές υπολογισμών, με στόχο τον προσδιορισμό βέλτιστων τιμών των μεταβλητών $efres$ και $cfres$. Σε καθεμία σειρά υπολογισμών, μεταβλήθηκε μία από τις παραπάνω δύο μεταβλητές, ενώ η τιμή της άλλης διατηρήθηκε σταθερή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-14 (μεταβολή $efres$) και 4-15 (μεταβολή $cfres$).

Το τμήμα της καμπύλης που περιγράφει τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας από τη χρονική στιγμή των 6 ms και μετά, αναφέρεται στην καύση που αντιπροσωπεύει τη φάση της καύσης του βαρέος τμήματος. Για να επιτευχθεί σύγκλιση αυτού του τμήματος της καμπύλης με το αντίστοιχο της καμπύλης του Σχήματος 4-3 επιλέγονται οι καταλληλότερες τιμές για τις μεταβλητές $efres$ και $cfres$. Οι καμπύλες που προκύπτουν για διάφορες τιμές των μεταβλητών αυτών φαίνονται στα Σχήματα 4-14 και 4-15. Με σταθερές $wtturb = 2.0$ και $ef1 = 1.15E+04$, μεταβάλλεται η τιμή της $efres$. Τα αποτελέσματα του Σχήματος 4-14 επαληθεύουν τη μείωση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με αύξηση της ενέργειας ενεργοποίησης της αντίδρασης. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα του Σχήματος 4-15 επαληθεύουν την αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με αύξηση του προεκθετικού παράγοντα. Τελικά επιλέγονται οι τιμές $efres = 1.55E+04$ και $cfres = 3.00E+10$ ως βέλτιστες. Ο υπολογισμός στον θάλαμο FIA για τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών του μοντέλου καύσης θα συνιστά εφεξής την περίπτωση αναφοράς.



Σχήμα 4-14: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας στον Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA) συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής $efres$ (ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης καύσης του βαρέος τμήματος διαιρεμένη με την παγκόσμια σταθερά των αερίων).



Σχήμα 4-15: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας στον Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA) συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής $cfres$ (προεκθετικός παράγοντας της αντίδρασης καύσης του βαρέος τμήματος).

Στον Πίνακα 4-3 συνοψίζεται η διαδικασία επιλογής των τιμών των μεταβλητών που ακολουθήθηκε.

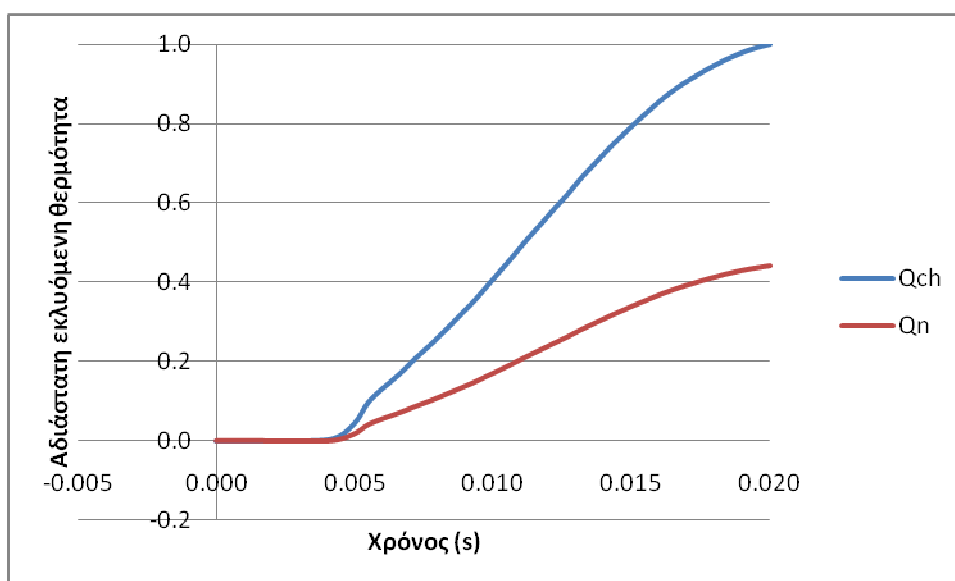
Πίνακας 4-3: Τιμές των μεταβλητών που αντιστοιχούν στις παραμέτρους του μοντέλου καύσης, κατά τις δοκιμές που έγιναν με στόχο τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού τιμών. Οι τιμές που αντιστοιχούν σε καύση δεκατετρανίου παρατίθενται, επίσης.

C ₁₄ H ₃₀					
	<i>ef1</i>	<i>cf1</i>	<i>efres</i>	<i>cfres</i>	<i>wtturb</i>
	9.297E+03	1.54E+10	-	-	0.066

FIA					
Run	<i>ef1</i>	<i>cf1</i>	<i>efres</i>	<i>cfres</i>	<i>wtturb</i>
ef1 effect					
T1	<i>1.10E+04</i>	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	0.066
T2	<i>1.15E+04</i>	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	0.066
TB1	<i>1.20E+04</i>	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	0.066
T4	<i>1.25E+04</i>	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	0.066
T5	<i>1.27E+04</i>	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	0.066
T3	<i>1.30E+04</i>	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	0.066
wtturb effect					
T2	1.15E+04	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	<i>0.066</i>
T9_3	1.15E+04	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	<i>0.100</i>
T9_4	1.15E+04	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	<i>0.200</i>
T9_1	1.15E+04	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	<i>0.500</i>
T9_2	1.15E+04	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	<i>1.000</i>
T11	1.15E+04	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	<i>1.500</i>
T13	1.15E+04	2.00E+09	1.66E+04	2.00E+09	<i>2.000</i>
efres effect					
T13	1.15E+04	2.00E+09	<i>1.66E+04</i>	2.00E+09	2.000
T19	1.15E+04	2.00E+09	<i>1.60E+04</i>	2.00E+09	2.000
T21	1.15E+04	2.00E+09	<i>1.55E+04</i>	2.00E+09	2.000
T23	1.15E+04	2.00E+09	<i>1.44E+04</i>	2.00E+09	2.000
cfres effect					
T21	1.15E+04	2.00E+09	1.55E+04	<i>2.00E+09</i>	2.000
T21_1	1.15E+04	2.00E+09	1.55E+04	<i>2.00E+10</i>	2.000
T21_2	1.15E+04	2.00E+09	1.55E+04	<i>3.00E+10</i>	2.000
ΤΕΛΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ					
	<i>ef1</i>	<i>cf1</i>	<i>efres</i>	<i>cfres</i>	<i>wtturb</i>
	1.15E+04	2.00E+09	1.55E+04	3.00E+10	2.000

Στο Σχήμα 4-16 παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες τιμές της αθροιστικής έκλυσης θερμότητας (μικτή και καθαρή) συναρτήσεως του χρόνου, για την περίπτωση αναφοράς στον θάλαμο FIA.

Παρατηρείται ότι στον θάλαμο FIA η καθαρή έκλυση θερμότητας αποτελεί περίπου το 40% της συνολικής, ενώ για κινητήρα Diesel, σύμφωνα με το Σχήμα 3-1, περίπου το 80% της συνολικής. Αυτή η διαφορά εξηγείται αν ληφθεί υπόψη το μικρό σχετικά με τον κινητήρα μέγεθος του πειραματικού θαλάμου FIA (λόγος επιφάνειας προς όγκο), με αποτέλεσμα οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον να είναι συγκριτικά υψηλότερες για τον θάλαμο, σε σχέση με μεγάλο ναυτικό κινητήρα. Στον παράγοντα αυτό πρέπει να προστεθεί και η απουσία ογκομετρικού έργου στην παρούσα περίπτωση θαλάμου σταθερού όγκου.



Σχήμα 4-16: Αδιάστατη μικτή και καθαρή αθροιστική έκλυση θερμότητας συναρτήσει του χρόνου στον Αναλυτή Έναυσης Καυσίμου (FIA), στην περίπτωση αναφοράς.

4.3.2 Μοντελοποίηση Θαλάμου Καύσης Σταθερού Όγκου με Δυνατότητα Οπτικοποίησης (VCVCC)

Τα πειραματικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009) στον θάλαμο VCVCC είναι εικόνες - στιγμιότυπα από την εξέλιξη της καύσης στο εσωτερικό του θαλάμου, για χρήση ενός «καλού» και ενός «φτωχού» καυσίμου. Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσομοίωση της καύσης στον θάλαμο VCVCC σε περιβάλλον KIVA-3 με χρήση βαρέος καυσίμου, για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές των πειραμάτων των Struckmeier et al. (2009). Εδώ, χρησιμοποιείται το μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, για βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, βλ. ανάλυση της Ενότητας 4.3.1. Στόχος της προσομοίωσης της καύσης στον θάλαμο VCVCC είναι η περαιτέρω πιστοποίηση του μοντέλου, με βάση την ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με τις εικόνες των πειραμάτων των Struckmeier et al. (2009).

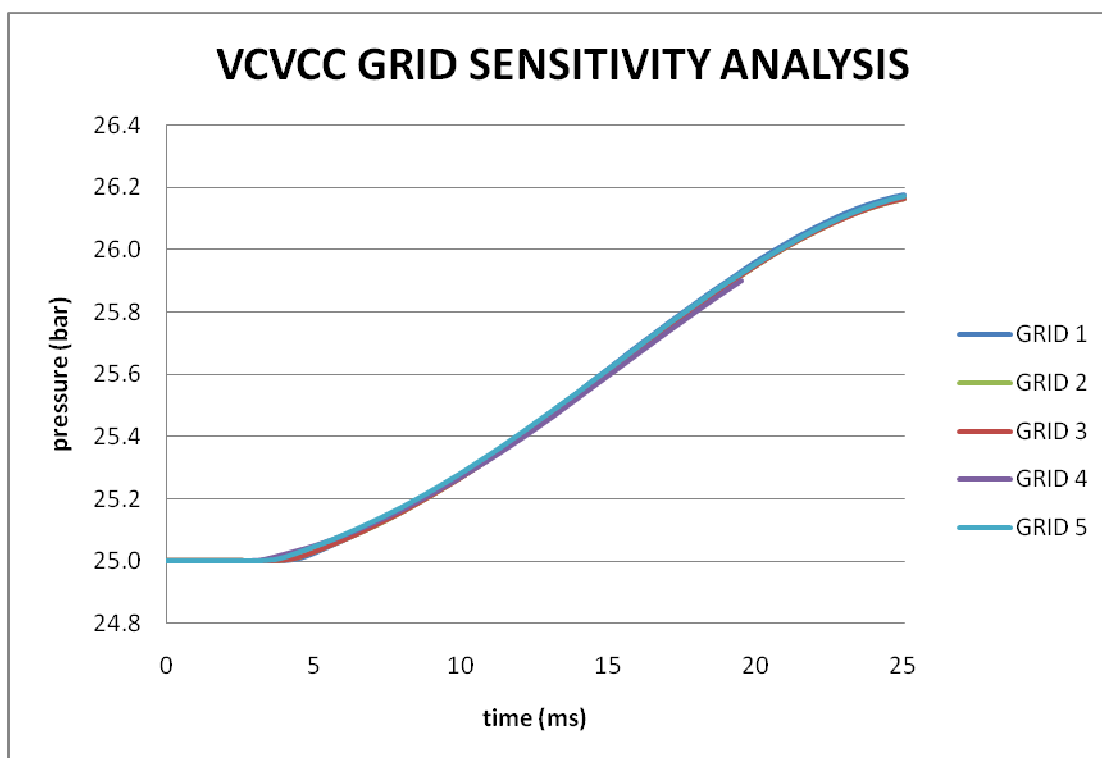
Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος

Για τη μοντελοποίηση των πειραμάτων των Struckmeier et al. (2009) στον Θάλαμο Καύσης Σταθερού Όγκου - VCVCC είναι απαραίτητη η δημιουργία υπολογιστικού

πλέγματος. Εδώ, δημιουργήθηκαν συνολικά πέντε πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας, βλ. Πίνακα 4-4, και μελετήθηκε η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε σχέση με την πυκνότητα του πλέγματος.

Πίνακας 4-4: Χαρακτηριστικά των τριών πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν για την προσομοίωση του Θαλάμου Καύσης Σταθερού Όγκου (VCVCC): αριθμός κόμβων στην ακτινική, αζιμουθιακή και αξονική κατεύθυνση.

GRID SENSITIVITY ANALYSIS			
	N_r	N_θ	N_z
GRID 1	15	20	70
GRID 2	15	36	70
GRID 3	15	40	70
GRID 4	37	36	175
GRID 5	25	24	110



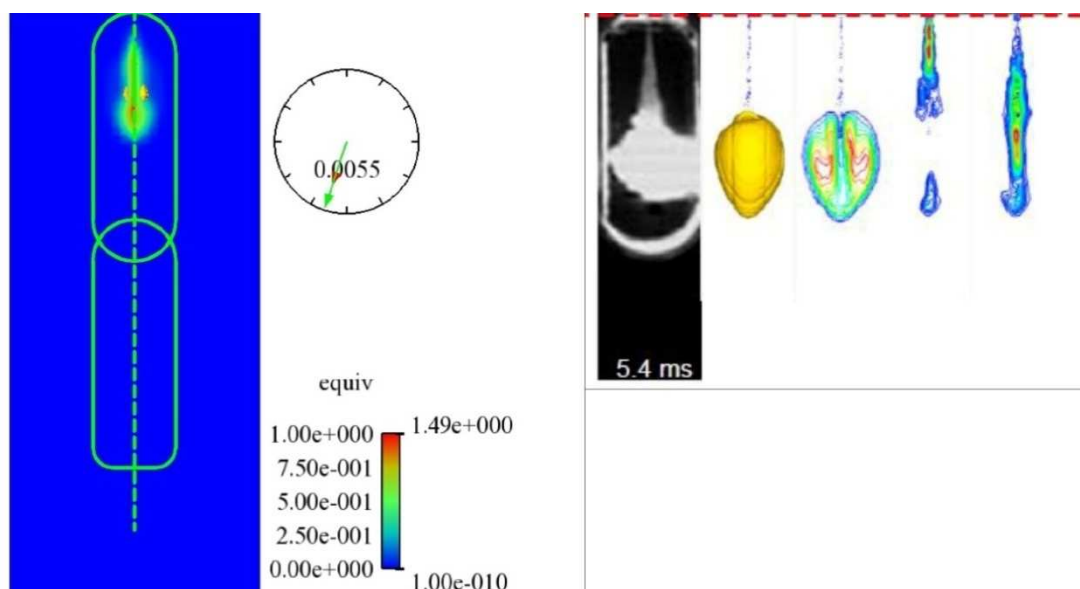
Σχήμα 4-17: Πίεση στον Θάλαμο Καύσης Σταθερού Όγκου (VCVCC) συναρτήσει του χρόνου, για τα πέντε υπολογιστικά πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας (βλ. Πίνακα 4-4). Εδώ, χρησιμοποιείται το μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, για βαρύ καύσιμο ενός συστατικού, με τιμές των παραμέτρων του μοντέλου αυτές των Struckmeier et al. (2009).

Στο Σχήμα 4-17 παρουσιάζονται οι υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης συναρτήσει του χρόνου, για τα πέντε πλέγματα του Πίνακα 4-4. Η προσομοίωση αφορά σε βαρύ καύσιμο ενός συστατικού, ενώ γίνεται χρήση του μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, με τιμές των παραμέτρων του μοντέλου αυτές των Struckmeier et al. (2009). Ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για το πλέγμα 2 ήταν περίπου 10 ώρες, ενώ για τα πλέγματα 5 και 4 περίπου 48 και 60 ώρες, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη το

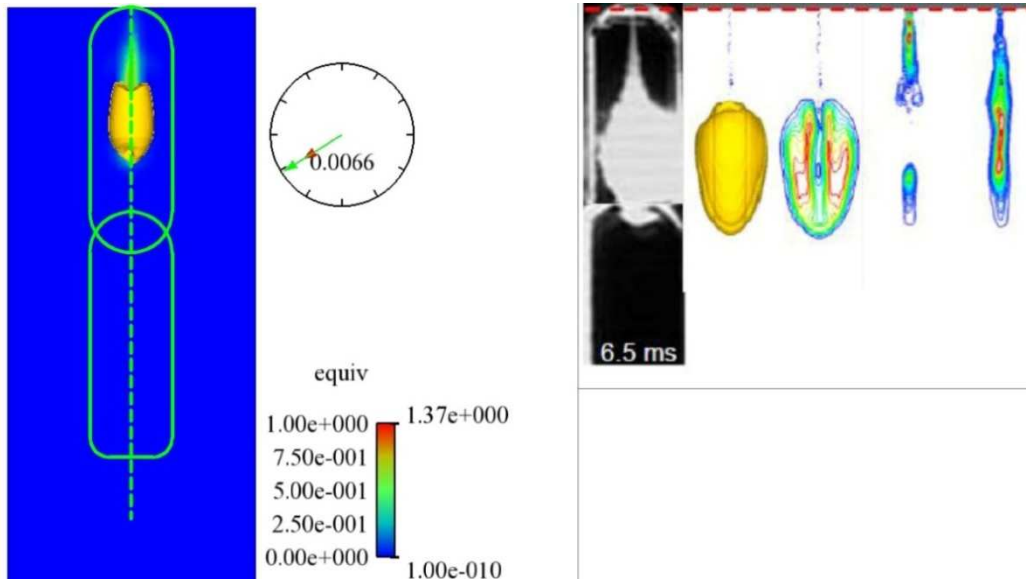
Σχήμα 4-17, επιλέγεται το πλέγμα 2 για περαιτέρω υπολογισμούς στον θάλαμο VCVCC, επειδή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς υπέρμετρη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

Ακολούθως, με χρήση του πλέγματος 2, γίνεται προσομοίωση της καύσης στον θάλαμο VCVCC, για βαρύ καύσιμο που περιέχει ελαφρύ τμήμα (cutter) και τμήμα καταλοίπων (residual), για τις συνθήκες των πειραμάτων των Struckmeier et al., βλ. Πίνακα 4-1. Εδώ, γίνεται χρήση του μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, και τιμές των παραμέτρων του μοντέλου τις βέλτιστες που προέκυψαν από την ανάλυση στον θάλαμο FIA, βλ. Ενότητα 4.3.1.

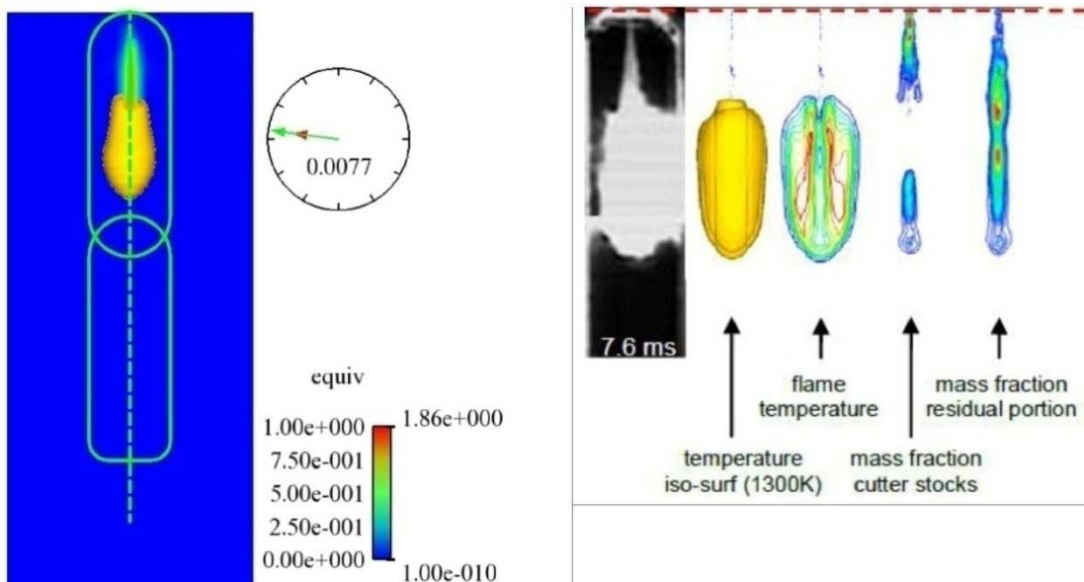
Στα Σχήματα 4-18 έως 4-22 παρουσιάζονται (στο αριστερό τμήμα) στιγμιότυπα με βάση τους παρόντες υπολογισμούς, σε διαφορετικά χρονικά σημεία. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα σε χρωματική κλίμακα, καθώς και η ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια 1300 K (με κίτρινο χρώμα). Στο δεξί τμήμα των ίδιων σχημάτων παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα των Struckmeier et al., στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Εδώ, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης της διάδοσης της φλόγας, καθώς και υπολογιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν την ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K (με κίτρινο χρώμα), ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, και ισοϋψείς καμπύλες του κλάσματος μάζας του ελαφρού τμήματος (cutter) και του τμήματος καταλοίπων (residual). Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα υπολογίζεται με βάση μόνο το εξατμισμένο καύσιμο (το καύσιμο που βρίσκεται σε υγρή φάση δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό).



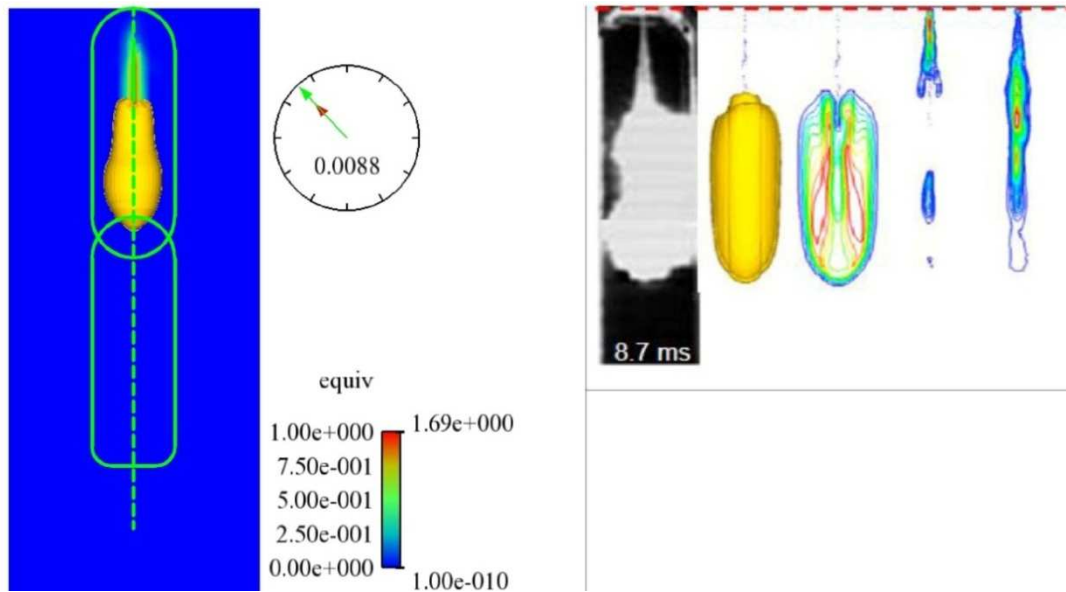
Σχήμα 4-18: Αποτελέσματα σε $t \approx 5.4$ ms μετά την έναρξη της έγχυσης. Αριστερά: ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, και ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, με βάση τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα. Δεξιά: πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009): πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης της διάδοσης της φλόγας, και υπολογιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν την ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, και ισοϋψείς καμπύλες του κλάσματος μάζας του ελαφρού τμήματος (cutter) και του τμήματος καταλοίπων (residual).



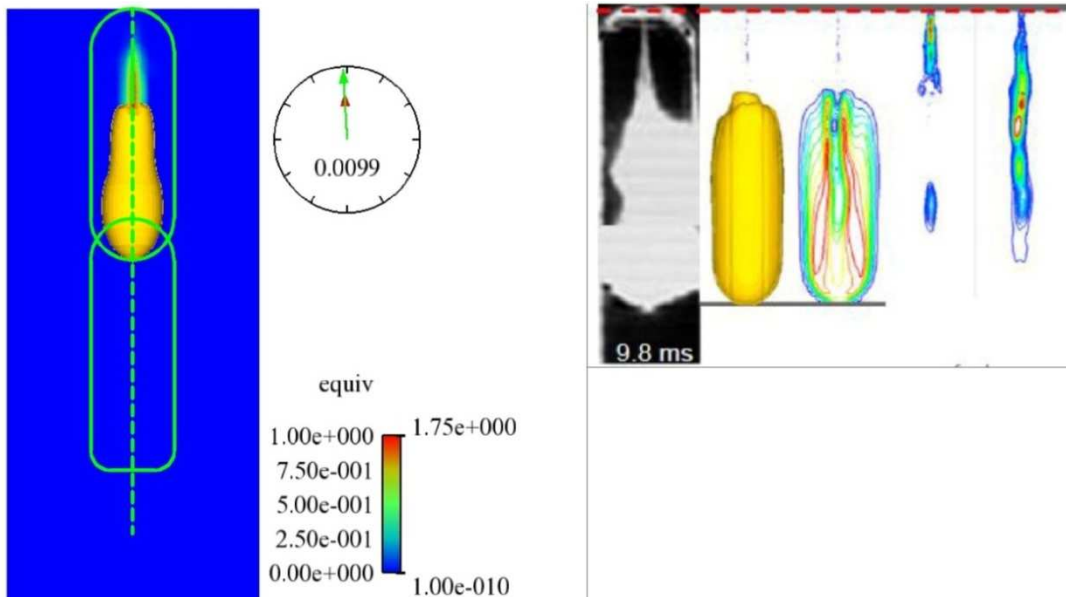
Σχήμα 4-19: Αποτελέσματα σε $t \approx 6.5$ ms μετά την έναρξη της έγχυσης. Αριστερά: ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, και ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, με βάση τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα. Δεξιά: πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009): πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης της διάδοσης της φλόγας, και υπολογιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν την ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, και ισοϋψείς καμπύλες του κλάσματος μάζας του ελαφρού τμήματος (cutter) και του τμήματος καταλοίπων (residual).



Σχήμα 4-20: Αποτελέσματα σε $t \approx 7.6$ ms μετά την έναρξη της έγχυσης. Αριστερά: ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, και ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, με βάση τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα. Δεξιά: πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009): πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης της διάδοσης της φλόγας, και υπολογιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν την ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, και ισοϋψείς καμπύλες του κλάσματος μάζας του ελαφρού τμήματος (cutter) και του τμήματος καταλοίπων (residual).



Σχήμα 4-21: Αποτελέσματα σε $t \approx 8.7$ ms μετά την έναρξη της έγχυσης. Αριστερά: ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, και ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, με βάση τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα. Δεξιά: πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009): πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης της διάδοσης της φλόγας, και υπολογιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν την ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, και ισοϋψείς καμπύλες του κλάσματος μάζας του ελαφρού τμήματος (cutter) και του τμήματος καταλοίπων (residual).



Σχήμα 4-22: Αποτελέσματα σε $t \approx 9.8$ ms μετά την έναρξη της έγχυσης. Αριστερά: ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, και ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, με βάση τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα. Δεξιά: πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009): πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης της διάδοσης της φλόγας, και υπολογιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν την ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια των 1300 K, ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, και ισοϋψείς καμπύλες του κλάσματος μάζας του ελαφρού τμήματος (cutter) και του τμήματος καταλοίπων (residual).

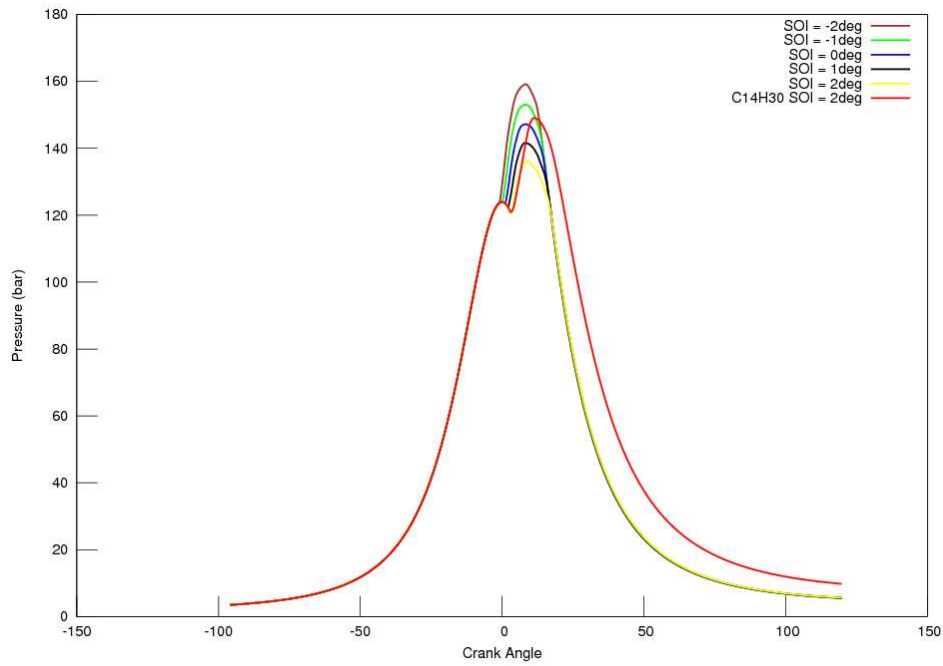
Από τα Σχήματα 4-18 έως 4-22 προκύπτει ότι υπάρχει ποιοτικά καλή συμφωνία μεταξύ των εικόνων που προέκυψαν από τον υπολογισμό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και των στιγμιοτύπων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία στον θάλαμο FIA. Επίσης, παρατηρείται μικρή καθυστέρηση έναυσης στους υπολογισμούς σε σχέση με τα πειράματα (Σχήμα 4-18).

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η συμπεριφορά του μοντέλου βαρέος καυσίμου στην προσομοίωση της καύσης σε μικρούς θαλάμους σταθερού όγκου είναι ικανοποιητική.

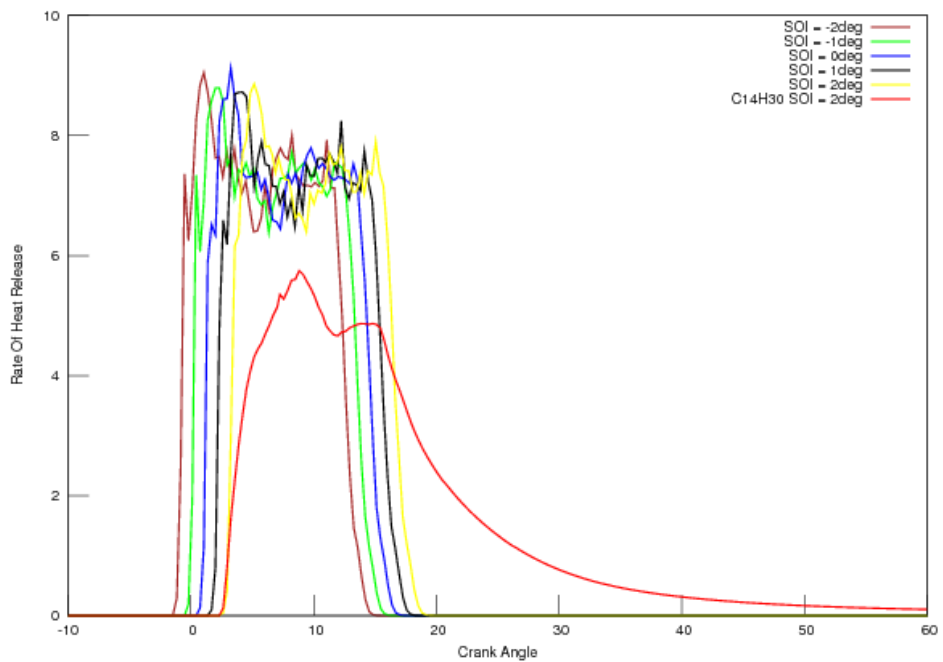
4.4 Προσομοίωση περίπτωσης αναφοράς στον κινητήρα RT-flex58T-B της Wärtsilä

Στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιείται το μοντέλο καύσης βαρέος καυσίμου στην προσομοίωση της καύσης στον μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα RT-flex58T-B της κατασκευάστριας εταιρίας Wärtsilä Switzerland, σε πλήρες φορτίο. Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα έχουν παρουσιαστεί στην Ενότητα 2.3. Ο βασικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί συνεχές προφίλ έγχυσης. Για τον κινητήρα, είναι διαθέσιμα από την κατασκευάστρια εταιρία πειραματικά δεδομένα που αντιστοιχούν σε χρήση καυσίμου Diesel.

Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα αντιστοιχούν σε προφίλ έγχυσης με αρχή και πέρασ έγχυσης $+2^\circ$ και $+17.2^\circ$ γωνίας στροφάλου, αντίστοιχα. Στην πράξη, ο έλεγχος της εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου γίνεται με ογκομετρική μέτρηση (Weisser G., Κοντούλης Π., προσωπική επικοινωνία). Επειδή η πυκνότητα του (θερμανθέντος) βαρέος καυσίμου είναι μεγαλύτερη από αυτήν του καυσίμου Diesel (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) κατά περίπου 10% (Κυριακίδης, 2009), θεωρούμε ότι η εγχυόμενη μάζα βαρέος καυσίμου είναι μεγαλύτερη από αυτή του καυσίμου Diesel κατά 10%. Στα Σχήματα 4-23 και 4-24 φαίνονται τα διαγράμματα πίεσης και ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσεως της γωνία στροφάλου για την περίπτωση αναφοράς. Εδώ, παρουσιάζονται αποτελέσματα για χρήση δεκατετρανίου (αρχή έγχυσης: $+2^\circ$) και βαρέος καυσίμου (για διαφορετικές τιμές της αρχής της έγχυσης) ως καύσιμο.



Σχήμα 4-23: Υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, στην περίπτωση αναφοράς του κινητήρα RT-flex58T-B. Τα αποτελέσματα αφορούν σε χρήση δεκατετρανίου (αρχή έγχυσης: +2°) και βαρέος καυσίμου (για διαφορετικές τιμές της αρχής της έγχυσης) ως καύσιμο.



Σχήμα 4-24: Υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, στην περίπτωση αναφοράς του κινητήρα RT-flex58T-B. Τα αποτελέσματα αφορούν σε χρήση δεκατετρανίου (αρχή έγχυσης: +2°) και βαρέος καυσίμου (για διαφορετικές τιμές της αρχής της έγχυσης) ως καύσιμο.

Από το Σχήμα 4-23 προκύπτει ότι, για χρήση βαρέος καυσίμου, είναι αναγκαίο η αρχή της έγχυσης να είναι μετατοπισμένη περίπου δύο μοίρες νωρίτερα από την περίπτωση της χρήσης καυσίμου Diesel (δεκατετράνιο), ώστε η μέγιστη πίεση να κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα (λίγο χαμηλότερη από 150 bar, που είναι το όριο αντοχής του παρόντος κινητήρα). Έτσι, ως περίπτωση αναφοράς για το βαρύ καύσιμο επιλέγεται αυτή στην οποία η έγχυση ξεκινά ακριβώς στο Άνω Νεκρό Σημείο.

Κατά τη φάση της εκτόνωσης, τα επίπεδα πίεσης για χρήση βαρέος καυσίμου είναι χαμηλότερα, σε σχέση με τα αντίστοιχα για καύσιμο Diesel.

Αυτή η συμπεριφορά δεν είναι σε συμφωνία με την καύση βαρέος καυσίμου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Weisser G., προσωπική επικοινωνία). Σύμφωνα με το διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας του Σχήματος 4-24, είναι φανερό ότι το βαρύ καύσιμο αρχίζει να καίγεται με πολύ έντονο ρυθμό περίπου μία μοίρα μετά την αρχή της έγχυσης. Στις καμπύλες του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, η περιοχή περί την πρώτη κορυφή αντιστοιχεί στην καύση του ελαφρού τμήματος του καυσίμου, το οποίο αποτελεί το 20% της συνολικά εγχυόμενης μάζας (μεταβλητή: *percut* = 0.20). Περίπου 5° μετά την αρχή της έγχυσης και μετέπειτα, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι κατά τι μειωμένος. Το τμήμα αυτό της καμπύλης αντιστοιχεί στην καύση του τμήματος καταλοίπων. Η καύση του βαρέος καυσίμου ολοκληρώνεται περί τις 18° μετά την αρχή της έγχυσης, ενώ για καύσιμο Diesel η καύση συνεχίζεται και μετά τις 30°, γεγονός που εξηγεί τα χαμηλότερα επίπεδα πίεσης στην περίπτωση του βαρέος καυσίμου.

Τα αίτια της παραπάνω απόκλισης εκτιμάται πως σχετίζονται με τα μοντέλα διάσπασης του spray και ατμοποίησης του καυσίμου. Η ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έγινε για αμετάβλητα μοντέλα διάσπασης του spray και ατμοποίησης, και μεταβολή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του καυσίμου, ώστε αυτές να αντιστοιχούν σε βαρύ καύσιμο (Kyriakides et al., 2009). Το συνολικό μοντέλο είχε καλή συμπεριφορά στην προσομοίωση της καύσης σε μικρούς θαλάμους σταθερού όγκου. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι, σε σχέση με τις συνθήκες του μεγάλου δίχρονου κινητήρα, τα πειράματα χαρακτηρίζονται από διαφορετικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, η χρονική διάρκεια της έγχυσης κυμαίνεται περί τα 20 ms για τα πειράματα και αντιστοιχεί σε διάρκεια περίπου 12° γωνίας στροφάλου στον υπό μελέτη κινητήρα, ο οποίος λειτουργεί στις 105 RPM στο πλήρες φορτίο, αφού:

$$105 \text{ RPM} = \frac{105 \text{ R}}{60 \text{ s}} \cdot 360 \frac{\text{CA}}{\text{R}} = 630 \frac{\text{CA}}{\text{s}}$$

οπότε σε χρόνο 0.02sec ο στρόφαλος θα περιστραφεί κατά

$$\Phi_{\text{CA}} = 0.02\text{s} \cdot 630 \frac{\text{CA}}{\text{s}} = 12.6^\circ \text{CA}$$

Επιπλέον, στα πειράματα το καύσιμο εγχύεται από εγχυτήρες με διάμετρο οπής 0.16 mm, ενώ οι εγχυτήρες του υπό μελέτη κινητήρα έχουν διάμετρο οπής της τάξης του

ενός χιλιοστού. Απόρροια των διαφορετικών συνθηκών είναι η παρατηρούμενη συμπεριφορά του βαρέος καυσίμου ως προς την καύση του. Έτσι, είναι σαφής η ανάγκη πειραματικών δεδομένων για συνθήκες αντίστοιχες μεγάλων ναυτικών κινητήρων. Η ανάπτυξη ενός κατάλληλου θαλάμου καύσης έλαβε χώρα κατά τα τελευταία έτη, βλ. Herrmann et al. (2007), και τα πρώτα πειραματικά δεδομένα έχουν παρουσιαστεί πρόσφατα Herrmann et al. (2009).

5 Βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρα με βαρύ καύσιμο

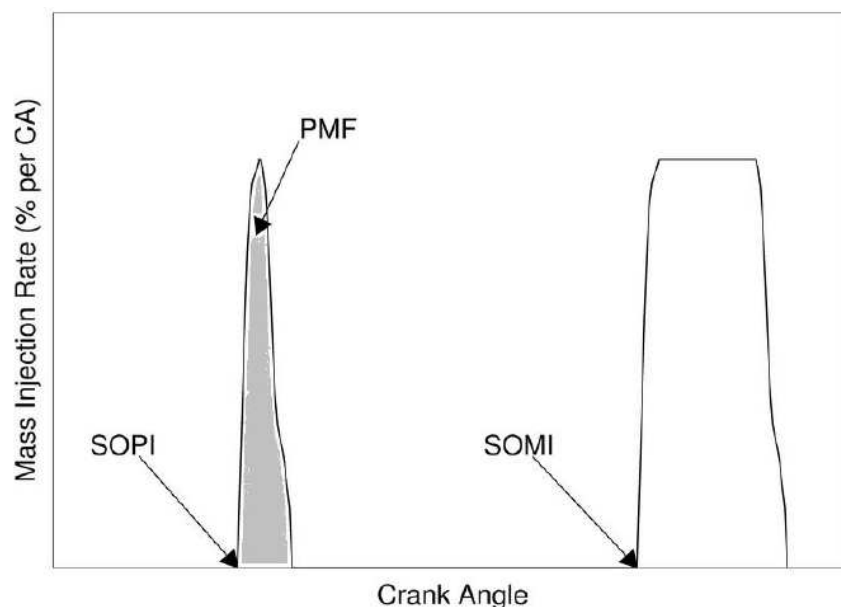
5.1 Εισαγωγή

5.1.1 Προφίλ έγχυσης

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης βαρέος καυσίμου, με σκοπό την ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Oil Consumption - *SFOC*) στον κινητήρα RT-flex58T-B της εταιρίας Wärtsilä. Η βελτιστοποίηση έγινε για λειτουργία σε πλήρες φορτίο. Για τον ορισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων χρησιμοποιήθηκαν (ως τιμές αναφοράς) οι αντίστοιχες τιμές για συνεχές προφίλ έγχυσης, με έναρξη έγχυσης στο Άνω Νεκρό Σημείο.

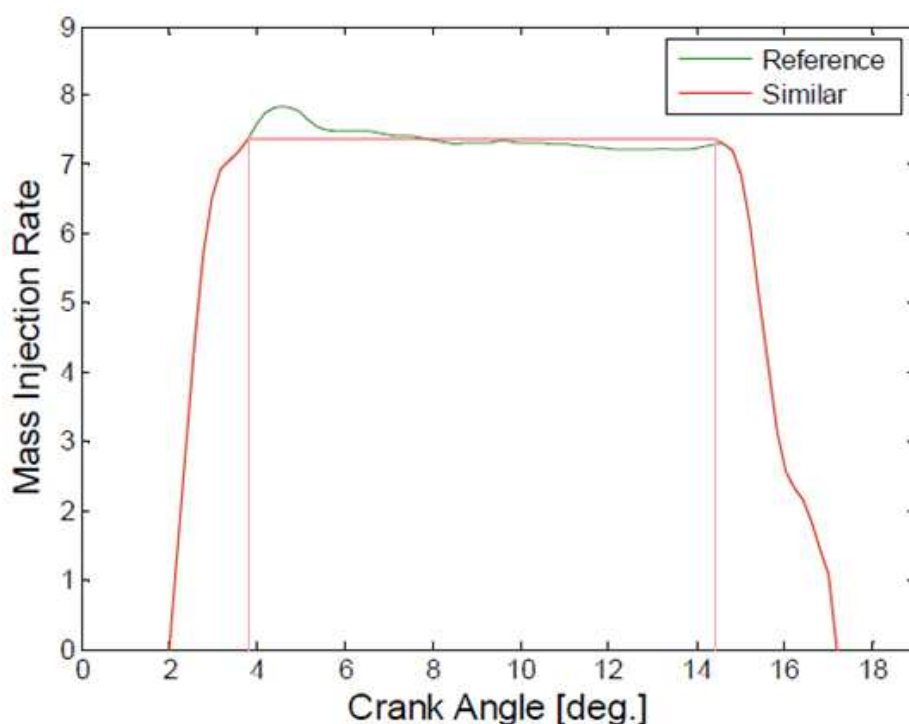
Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης, θεωρήθηκε προφίλ έγχυσης με παρουσία προέγχυσης, το οποίο παρίσταται σχηματικά στο Σχήμα 5-1, περιγράφεται δε από τις ακόλουθες μεταβλητές σχεδίασης:

- έναρξη της προέγχυσης (Start Of Pilot Injection - *SOPI*)
- έναρξη της κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection - *SOMI*)
- κλάσμα μάζας καυσίμου προέγχυσης προς συνολική μάζα εγχυόμενου καυσίμου (Pilot Mass Fraction - *PMF*)
- συνολική μείωση μάζας καυσίμου σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς (Mass Reduction - *MR*)



Σχήμα 5-1: Σχηματική παράσταση προφίλ εγχύσεως με προέγχυση. Τρεις μεταβλητές σχεδίασης (έναρξη προέγχυσης - *SOPI*, έναρξη της κύριας έγχυσης - *SOMI* και ποσοστό μάζας προέγχυσης - *PMF*) δείχνονται από τα βέλη της εικόνας (Ανδρεάδης, 2008).

Στο Σχήμα 5-2 παρίστανται το μετρηθέν προφίλ έγχυσης, το οποίο μάς παρασχέθηκε από την εταιρία Wartsila Switzerland, καθώς και ένα απλοποιημένο, στο οποίο η ταχύτητα έγχυσης μετά το άνοιγμα και πριν το κλείσιμο του εγχυτήρα διατηρείται ακριβώς η ίδια. Το απλοποιημένο προφίλ του Σχήματος 5-2 έχει την ίδια διάρκεια έγχυσης και πανομοιότυπο άνοιγμα – κλείσιμο της βελόνας του εγχυτήρα με το μετρηθέν. Επίσης, η μέση ταχύτητα έγχυσης είναι κοινή στα δύο προφίλ. Διαφορά υπάρχει κυρίως μετά το πλήρες άνοιγμα της βαλβίδας, όπου στο πραγματικό προφίλ αποτυπώνεται η ταλάντωση της βελόνας κατά το άνοιγμά της. Κατά τη βελτιστοποίηση, υπολογίζεται η νέα εγχυόμενη μάζα καυσίμου, για τον προσδιορισμό της οποίας γίνεται, στο επιμέρους προφίλ της κύριας έγχυσης (βλ. Σχήμα 5-1), προσθαφαίρεση ενός παράλληλου ενδιάμεσου τμήματος, κατάλληλης διάρκειας. Αυτό διευκολύνει τεχνικά τους υπολογισμούς. Με βάση προγενέστερες εργασίες, το μετρηθέν και το απλοποιημένο προφίλ έγχυσης δίνουν πρακτικά τα ίδια υπολογιστικά αποτελέσματα (Κοντούλης, 2008). Για έγχυση με παρουσία προέγχυσης, η ποσότητα της μάζας της προέγχυσης αφαιρείται από αυτή της κύριας έγχυσης. Το προφίλ της προέγχυσης λαμβάνει ακριβώς την ίδια μορφή με αυτή του προφίλ της κύριας έγχυσης, στις περιόδους που αντιστοιχούν στο άνοιγμα και κλείσιμο της βελόνας.



Σχήμα 5-2: Μετρηθέν και απλοποιημένο συνεχές προφίλ έγχυσης (Ανδρεάδης, 2008).

Στην παρούσα βελτιστοποίηση, η γεωμετρία του κινητήρα και των εγχυτήρων θεωρείται δεδομένη, και βελτιστοποιείται μόνο το προφίλ έγχυσης καυσίμου, συνεπώς η βελτιστοποίηση αφορά μόνο στη θερμορευστομηχανική του προβλήματος. Κατά τη βελτιστοποίηση, το εύρος των μεταβλητών σχεδίασης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-1, επιλέχθηκε κατ' εκτίμηση, και με γνώμονα παρόμοιες μελέτες για μικρότερους κινητήρες, καθώς και προηγούμενες μελέτες για τον ίδιο κινητήρα (Κοντούλης, 2008, Ανδρεάδης, 2008).

Πίνακας 5-1: Εύρος μεταβλητών σχεδίασης.

Μεταβλητές σχεδίασης (Design Variables)	Εύρος	
	min	max
Start Of Pilot Injection, SOPI [deg CA aTDC]	-40	-7
Start Of Main Injection, SOMI [deg CA aTDC]	-3	5
Pilot Mass Fraction, PMF [% of total injected mass]	4	20
Mass Reduction, MR [% of reference case]	0	4

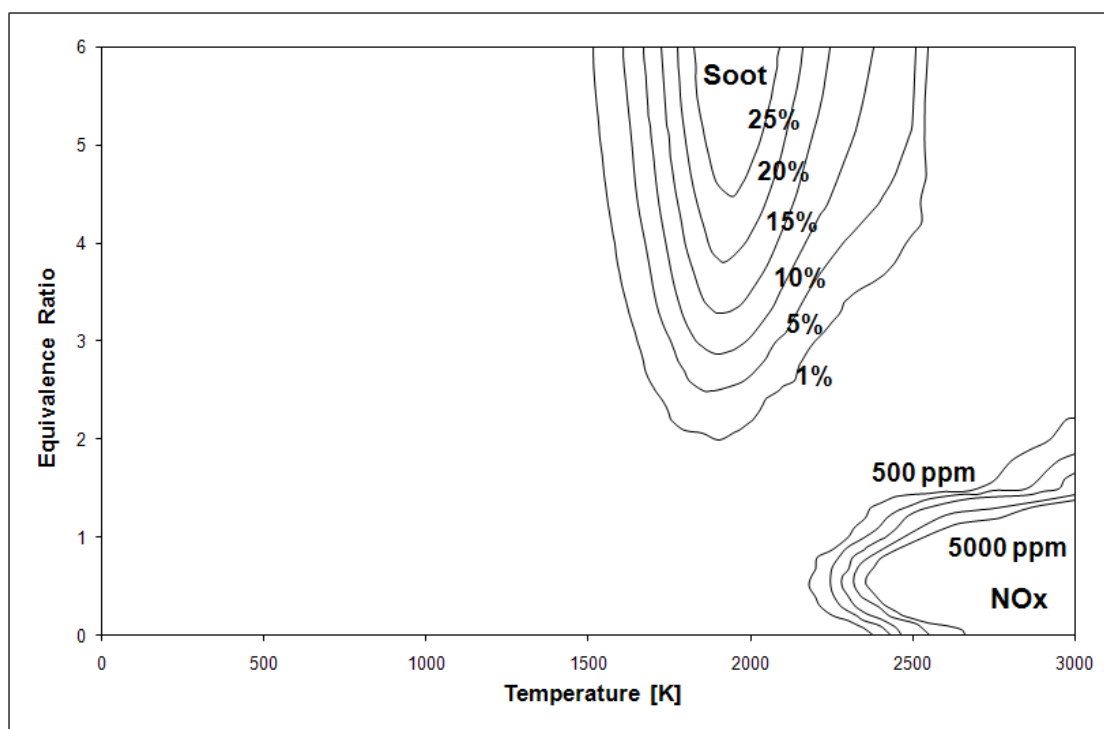
Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ανάγονται σε μια περίπτωση αναφοράς. Αυτή, ορίζεται ως η λειτουργία σε πλήρες φορτίο, με συνεχές προφίλ έγχυσης, και αρχή της έγχυσης στο Άνω Νεκρό Σημείο. (Στην περίπτωση αναφοράς, η μέγιστη πίεση στον κινητήρα υπολογίζεται πολύ κοντά στο όριο αντοχής των 150 bar). Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η μάζα των οξειδίων του αζώτου (NO_x) προς το αποδιδόμενο έργο, ανηγμένη στην περίπτωση αναφοράς, καθώς και μια προσέγγιση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Oil Consumption - *SFOC*), επίσης ανηγμένη στην τιμή του ίδιου μεγέθους στην περίπτωση αναφοράς. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου προσεγγίζεται από το πηλίκο της συνολικής εγχυόμενης μάζας καυσίμου προς το ολοκλήρωμα του ωφέλιμου έργου ($\int p \cdot dV$) για τιμές της γωνίας στροφάλου μεταξύ -96° και 120° . Οι υπολογιζόμενες τιμές αδιαστατοποιούνται με την αντίστοιχη της περίπτωσης αναφοράς.

5.1.2 Χάρτες T – φ

Στους κινητήρες Diesel, ο σχηματισμός των κύριων ρύπων, που είναι τα σωματίδια αιθάλης (soot) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x), εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και λόγου ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα, (equivalence ratio) που επικρατούν σε κάθε σημείο του θαλάμου καύσης. Για την κατανόηση των διεργασιών σχηματισμού των κύριων ρύπων σε κινητήρες Diesel, χρησιμοποιούνται οι χάρτες T–φ. Οι χάρτες T–φ είναι διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν, για συγκεκριμένη τιμή της πίεσης, τις συγκεντρώσεις των παραγόμενων ρύπων, συναρτήσει της θερμοκρασίας (T) και του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα (ϕ), βλ. Σχήμα 5-3. Οι χάρτες T–φ προκύπτουν από υπολογισμούς χημικής κινητικής, για συγκεκριμένο χρόνο ολοκλήρωσης.

Για διαφορετικές τιμές πίεσης, προκύπτουν διαφορετικοί χάρτες T–φ, που όμως είναι ποιοτικά όμοιοι. Όταν κατά την ανάλυση υπολογιστικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται μόνο ένας χάρτης T–φ (που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη τιμή της πίεσης), κάνουμε λόγο για «στατικούς χάρτες T–φ», ενώ, όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χάρτες T–φ (συναρτήσει της πίεσης), κάνουμε λόγο για «δυναμικούς χάρτες T–φ» (Bergman & Golovitchev, 2007). Στην παρούσα εργασία, θα γίνει χρήση ενός («στατικού») χάρτη T–φ, ο οποίος έχει δημιουργηθεί για πίεση 60 bar, και χρόνο ολοκλήρωσης 2 ms (Kitamura et al., 2002). Ο χρόνος ολοκλήρωσης των 2 ms αντιστοιχεί, για ταχύτητα περιστροφής 105 RPM, σε 1.3° γωνίας στροφάλου.

Στο Σχήμα 5-3 παρίσταται ο χάρτης T-φ που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Στις ισοϋψείς καμπύλες του Σχήματος 5-3, η συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης εκφράζεται ως επί τοις εκατό ποσοστό της συνολικής μάζας, ενώ η (μοριακή) συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου σε μέρη στο εκατομμύριο (parts per million – ppm). Υπογραμμίζεται ότι οι τιμές της συγκέντρωσης σωματιδίων αιθάλης προκύπτουν μόνο με βάση τον ρυθμό παραγωγής, χωρίς συνυπολογισμό της οξείδωσης.



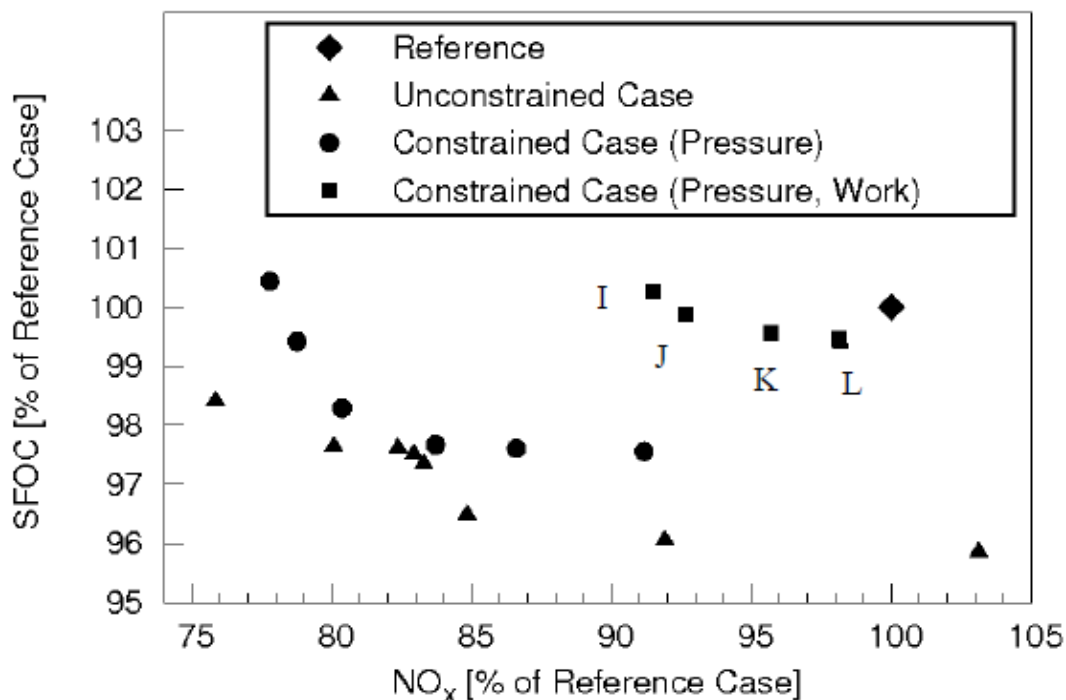
Σχήμα 5-3: Χάρτης T-φ για πίεση 60 bar και χρόνο ολοκλήρωσης 2ms (Kitamura et al., 2002).

Από τους υπολογισμούς υπολογιστικής ρευστοδυναμικής προκύπτουν η θερμοκρασία και ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα, σε κάθε υπολογιστικό κελί, συναρτήσει του χρόνου. Έτσι, η εισαγωγή των παραπάνω τιμών σε χάρτη T-φ μπορεί να δώσει μια ποιοτική εικόνα σχετικά με τη χρονική εξέλιξη των διεργασιών παραγωγής των κύριων ρύπων του κινητήρα Diesel.

5.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση: βελτιστοποίηση προφίλ έγχυσης καυσίμου Diesel

Πρόσφατα, παρουσιάστηκε μια υπολογιστική μελέτη βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης, με παρουσία προέγχυσης, στον ναυτικό κινητήρα Diesel RT-flex58T-B, σε συνθήκες πλήρους φορτίου, με χρήση δεκατετρανίου ως καύσιμο (Ανδρεάδης, 2008, Andreadis et al., 2009). Η βελτιστοποίηση είχε ως στόχο την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Συγκεκριμένα, έγινε βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης για τις

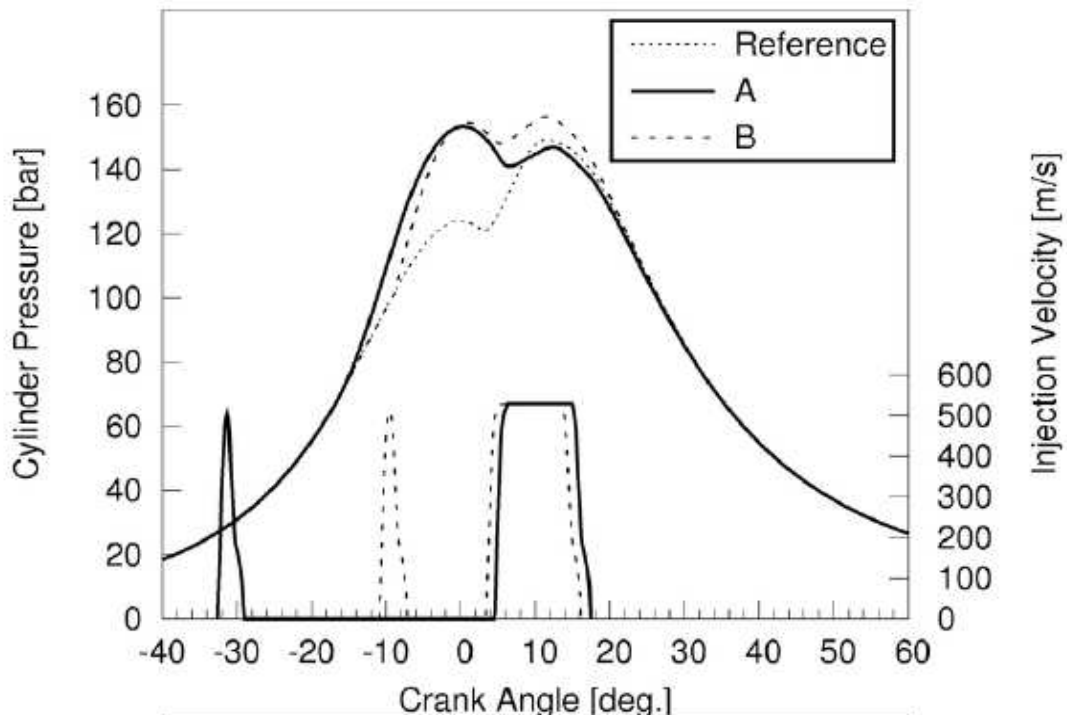
ακόλουθες περιπτώσεις: (α) χωρίς περιορισμούς, (β) με περιορισμό στη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ($p_{max} = 150 \text{ bar}$), και (γ) για $p_{max} = 150 \text{ bar}$ και ελάχιστο ωφέλιμο έργο αυτό μιας περίπτωσης αναφοράς (με συνεχές προφίλ έγχυσης). Ακολούθως, παρουσιάζονται, ενδεικτικά, αποτελέσματα, με έμφαση στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, το οποίο είναι αντικείμενο και της παρούσας εργασίας, με τη διαφοροποίηση της χρήσης βαρέος καυσίμου.



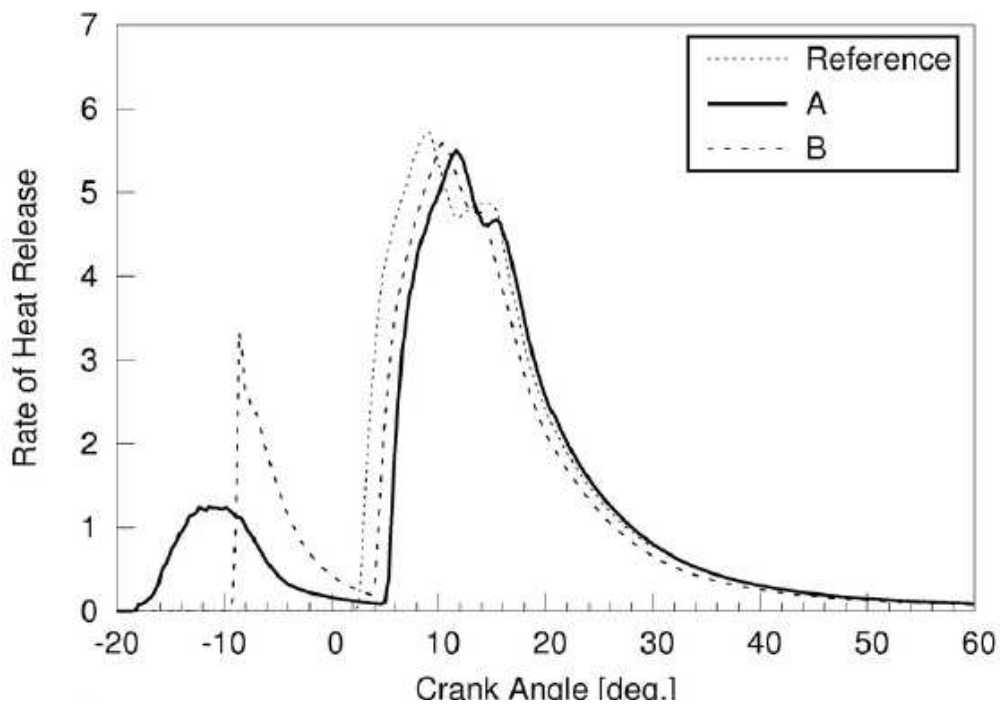
Σχήμα 5-4: Τελικά μέτωπα Pareto (κανονικοποιημένες τιμές συγκέντρωσης NO_x και SFOC) για βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης καυσίμου Diesel στον κινητήρα RT-flex58T-B: πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση, και πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση και το ελάχιστο ωφέλιμο έργο (Ανδρεάδης, 2008).

Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζονται τα τελικά μέτωπα Pareto, για τα τρία προβλήματα βελτιστοποίησης (Ανδρεάδης, 2008). Παρατηρείται ότι, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, είναι δυνατή η ταυτόχρονη μείωση και των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Επιπλέον, με την αύξηση των περιορισμών του προβλήματος, μειώνεται η βελτίωση των στόχων της βελτιστοποίησης, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Στις περιπτώσεις με κανέναν ή έναν μόνο περιορισμό, είναι σαφές ότι η κατάλληλη διαμόρφωση του προφίλ έγχυσης μπορεί να επιφέρει ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και στα επίπεδα εκπομπών NO_x. Τέλος, η παρουσία πολλών βέλτιστων λύσεων παρέχει τη δυνατότητα επιλογής της καταλληλότερης, με κριτήριο τη σημασία των επιμέρους στόχων.

Στα Σχήματα 5-5 και 5-6 παρουσιάζονται, για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, τα προφίλ έγχυσης, οι καμπύλες πίεσης και ρυθμού έκλυσης θερμότητας για δύο επιλεγμένες λύσεις του μετώπου Pareto, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς. Οι επιλεγείσες λύσεις είναι αντιπροσωπευτικές των δύο οικογενειών λύσεων που προέκυψαν, και αντιστοιχούν σε αρχή της προέγχυσης περί τις -30° ή περί τις -10° γωνίας στροφάλου (Ανδρεάδης, 2008).



Σχήμα 5-5: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: προφίλ έγχυσης με προέγχυση, και υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, B και την περίπτωση αναφοράς (Ανδρεάδης, 2008).



Σχήμα 5-6: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, B και την περίπτωση αναφοράς (Ανδρεάδης, 2008).

5.3 Βελτιστοποίηση προφίλ έγχυσης βαρέος καυσίμου

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, έγινε υπολογιστική βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης με παρουσία προέγχυσης στον ναυτικό κινητήρα Diesel RT-flex58T-B, σε πλήρες φορτίο, για χρήση βαρέος καυσίμου. Η βελτιστοποίηση είχε ως στόχο την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε ενδεικτικά η βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς.

5.3.1 Αποτελέσματα Προβλήματος χωρίς Περιορισμούς

Για την παρούσα βελτιστοποίηση, έγινε σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 με το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY, βλ. Ενότητα 3.2.4. Ως αντικειμενικές συναρτήσεις ορίζονται: (α) Μια προσέγγιση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, συνιστάμενη από την ολική μάζα καυσίμου ανά κύκλο, προς το ωφέλιμο έργο στο κλειστό τμήμα του κύκλου (-96° έως 120° CA). (β) Η μάζα οξειδίων του αζώτου προς το ωφέλιμο έργο. Καί οι δύο τιμές ανάγονται στις αντίστοιχες της περίπτωσης αναφοράς. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, τα διαδοχικά αποτελέσματα συνιστούν διαδοχικές γενιές βέλτιστων λύσεων (μέτωπα Pareto). Κάθε γενιά μπορεί να περιέχει λύσεις οι οποίες περιέχονται και σε προηγούμενες γενιές. Στην παρούσα βελτιστοποίηση, υπολογίζονται 32 άτομα ανά γενιά, και παρατηρείται ουσιαστική ταύτιση των λύσεων των μετώπων Pareto μετά την 18^η γενιά. Έτσι, το μέτωπο Pareto της 18^{ης} γενιάς, αποτελούμενο από 13 άτομα, θεωρείται το βέλτιστο, και οι λύσεις που το αποτελούν λαμβάνονται ως οι βέλτιστες. Τα χαρακτηριστικά των λύσεων αυτών, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς, παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-2, 5-3 και 5-4.

Πίνακας 5-2: Τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για τις περιπτώσεις REF., A, B, C και D.

	REF.	A	B	C	D
Μεταβλητές σχεδίασης					
SOPI [deg CA aTDC]	-	-28.9	-24.6	-23.7	-28.1
SOMI [deg CA aTDC]	0.0	4.0	3.5	3.8	3.5
PMF [% of total injected mass]	-	19.95	19.78	19.42	18.76
MR [% of reference case]	-	3.73	2.98	3.04	3.47
Στόχοι					
NOx [%]	100.00	77.74	77.88	78.72	79.27
SFOC [%]	100.00	99.18	99.17	99.11	99.01
Πίεση κυλίνδρου [bar]					
Max. Pressure [bar]	147.2	146.2	146.2	146.0	144.9

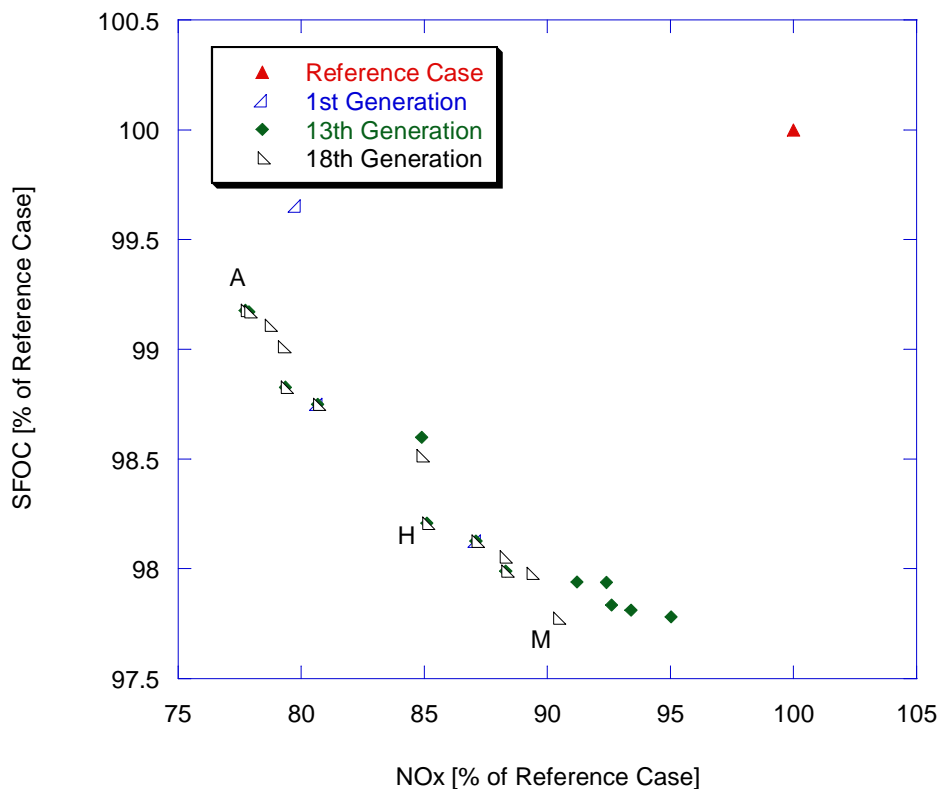
Πίνακας 5-3: Τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για τις περιπτώσεις REF., E, F, G και H.

	REF.	E	F	G	H
Μεταβλητές σχεδίασης					
SOPI [deg CA aTDC]	-	-24.5	-29.7	-34.0	-27.8
SOMI [deg CA aTDC]	0.0	3.2	3.0	2.0	1.9
PMF [% of total injected mass]	-	19.05	20.00	18.37	18.81
MR [% of reference case]	-	3.46	2.45	3.41	3.05
Στόχοι					
NO _x [%]	100.00	79.35	80.68	84.88	85.11
SFOC [%]	100.00	98.83	98.75	98.52	98.21
Πίεση κυλίνδρου [bar]					
Max. Pressure [bar]	147.2	146.0	147.9	151.9	153.7

Πίνακας 5-4: Τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για τις περιπτώσεις REF., I, J, K, L και M.

	REF.	I	J	K	L	M
Μεταβλητές σχεδίασης						
SOPI [deg CA aTDC]	-	-31.6	-29.2	-14.7	-14.7	-14.2
SOMI [deg CA aTDC]	0.0	1.4	1.2	1.9	1.7	1.4
PMF [% of total injected mass]	-	18.81	16.40	19.98	19.66	18.80
MR [% of reference case]	-	2.96	2.88	3.94	3.43	3.77
Στόχοι						
NO _x [%]	100.00	87.11	88.25	88.32	89.33	90.43
SFOC [%]	100.00	98.13	98.05	97.99	97.98	97.78
Πίεση κυλίνδρου [bar]						
Max. Pressure [bar]	147.2	156.3	155.5	154.2	155.1	155.9

Στο Σχήμα 5-7 παρουσιάζονται τα μέτωπα Pareto ενδιάμεσων γενιών, καθώς και το μέτωπο Pareto της 18^{ης} γενιάς. Όπως προαναφέρθηκε, οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι ανηγμένες στην περίπτωση αναφοράς (100, 100). Το εύρος των τιμών των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων στο μέτωπο Pareto είναι παρόμοιο με αυτό που προέκυψε σε πρόσφατη μελέτη βελτιστοποίησης για καύσιμο Diesel (Ανδρεάδης, 2008).



Σχήμα 5-7: Μέτωπα Pareto στα οποία απεικονίζονται οι δύο αντικειμενικές (κανονικοποιημένες τιμές ειδικής εκπομπής NO_x , και SFOC) για αντιπροσωπευτικές γενιές, για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται επίσης η περίπτωση αναφοράς.

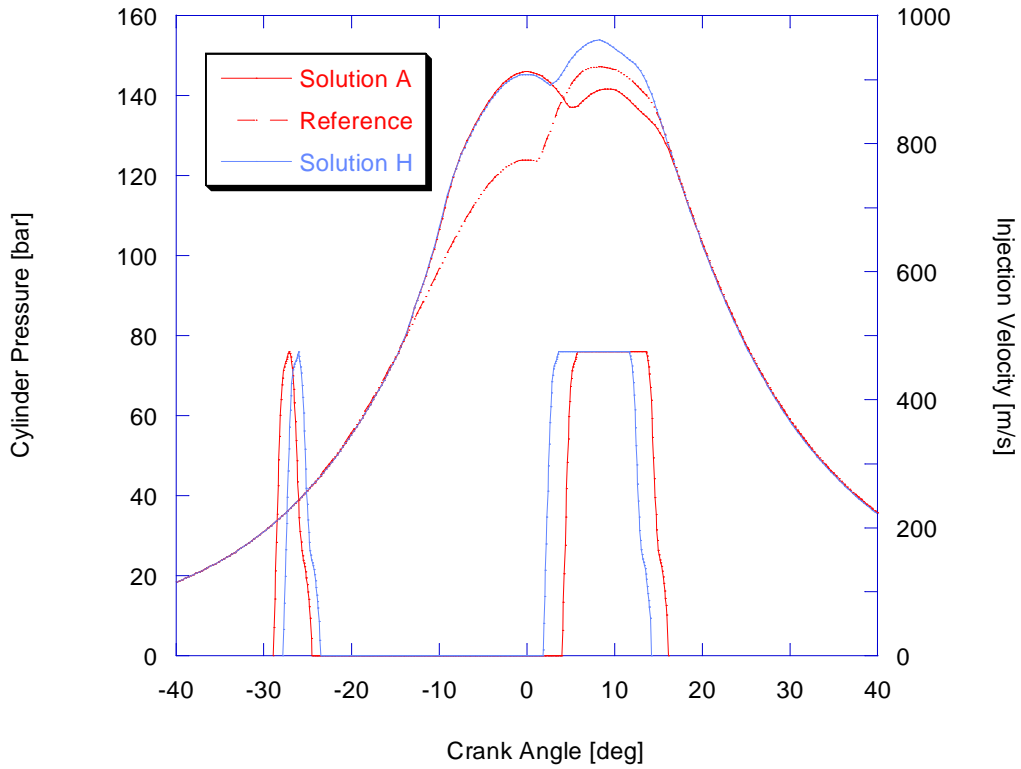
Το Σχήμα 5-7 καταδεικνύει τη θετική επίδραση κατάλληλων προφίλ έγχυσης στους δύο στόχους της βελτιστοποίησης, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Επιπλέον, είναι σαφές, ότι ανάλογα με τις εκάστοτε προτεραιότητες (μείωση SFOC ή μείωση NO_x) είναι δυνατή η επιλογή διαφορετικής στρατηγικής έγχυσης. Για παράδειγμα, αν απαιτούνται κυρίως μειωμένα επίπεδα εκπομπών NO_x , τότε μπορεί να επιλεγεί το προφίλ έγχυσης που αντιστοιχεί στη λύση A, το οποίο μειώνει τα NO_x κατά 22.3% και την ειδική κατανάλωση κατά 0.8%. Αν απαιτείται κυρίως μείωση της ειδικής κατανάλωσης, τότε καταλληλότερο κρίνεται το προφίλ έγχυσης που αντιστοιχεί στην λύση M, το οποίο μειώνει τις εκπομπές NO_x κατά 9.6% και την ειδική κατανάλωση κατά 2.2%. Συχνά, απαιτείται ισόρροπη μείωση και των δύο στόχων (SFOC και NO_x). Παράδειγμα τέτοιας λύσης αποτελεί η λύση H, σύμφωνα με την οποία μειώνεται η εκπομπή των NO_x κατά 14.9% και συγχρόνως η ειδική κατανάλωση κατά 1.8%. Επιπρόσθετα, μπορεί να υπάρχουν περιορισμοί, όπως η μέγιστη πίεση στον κύλινδρο (150 bar για τον υπό μελέτη κινητήρα), ή τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής ρύπων (15% για ναυτικούς κινητήρες Diesel που θα εγκατασταθούν μετά το 2011, βλ. Ενότητα 1.1). Μια λύση που ικανοποιεί ταυτόχρονα τους περιορισμούς της μέγιστης πίεσης και των εκπομπών είναι η λύση F, η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστη πίεση 147.9 bar, μείωση των NO_x κατά 19.3%, και συγχρόνως χαρακτηρίζεται από μείωση της ειδικής κατανάλωσης κατά 1.25%. Στη συνέχεια, αναλύονται οι αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις A, H και M, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στον Πίνακα 5-5.

Πίνακας 5-5: Τιμές των μεταβλητών σχεδίασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων για τις περιπτώσεις REF., A ,H και M.

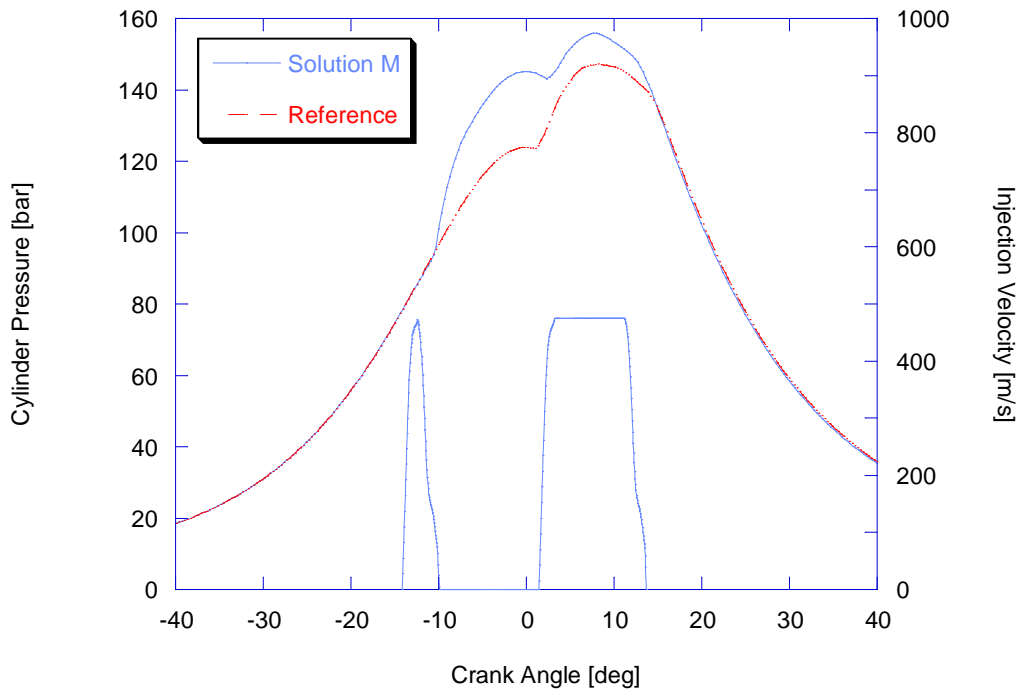
	REF.	A	H	M
Μεταβλητές σχεδίασης				
SOP1 [deg CA aTDC]	-	-28.9	-27.8	-14.2
SOMI [deg CA aTDC]	0.0	4.0	1.9	1.4
PMF [% of total injected mass]	-	19.95	18.81	18.80
MR [% of reference case]	-	3.73	3.05	3.77
Στόχοι				
NO _x [%]	100.00	77.74	85.11	90.43
SFOC [%]	100.00	99.18	98.21	97.78
Πίεση κυλίνδρου [bar]				
Max. Pressure [bar]	147.2	146.2	153.7	155.9

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5-5, η αρχή της πιλοτικής έγχυσης κυμαίνεται περί τις -28° CA, με εξαίρεση την περίπτωση M, και η αρχή της κύριας έγχυσης κυμαίνεται από 1.4° έως 4° CA (0° CA στην περίπτωση αναφοράς). Η εγχυόμενη κατά την προέγχυση μάζα καυσίμου κυμαίνεται περί το 19% της συνολικής. Η μείωση της εγχυόμενης μάζας, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, κυμαίνεται περί το 3.5%. Από τα δεδομένα του Πίνακα 5-5 συμπεραίνεται ότι, για καθυστερημένη κύρια έγχυση, μειώνονται οι εκπομπές NO_x , αφού, λόγω της εκτόνωσης, η διεργασία της καύσης λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εντός του θαλάμου (με μειωμένο όφελος στην ειδική κατανάλωση καυσίμου). Η επίδραση θα διερευνηθεί περαιτέρω στην ανάλυση με χρήση των χαρτών T-φ, που ακολουθεί.

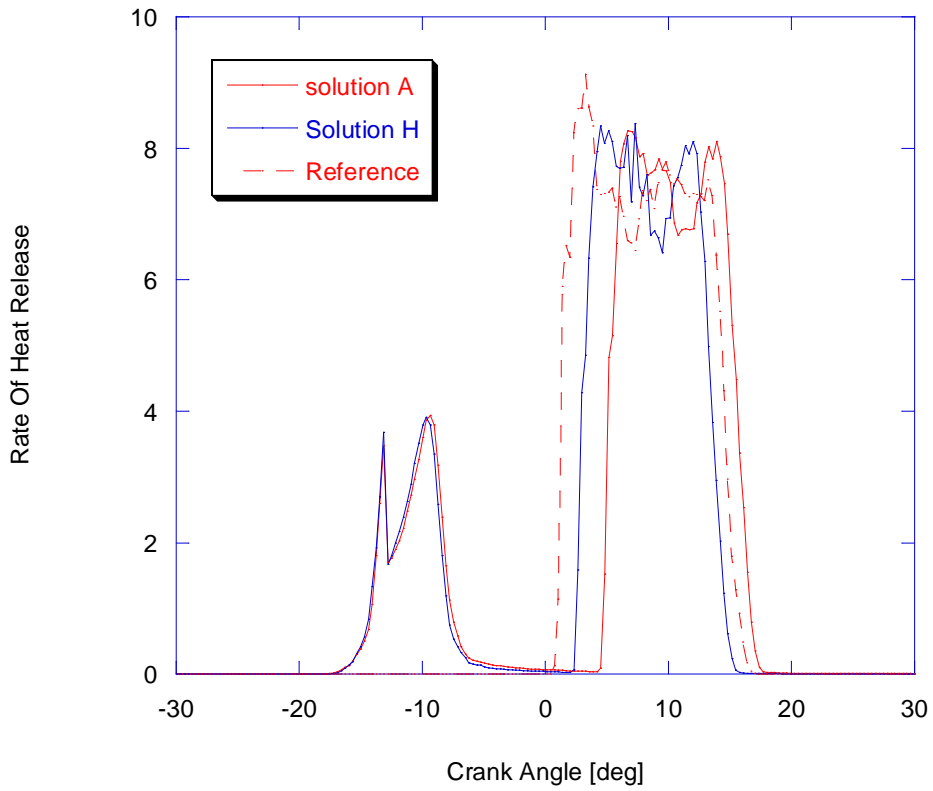
Στα Σχήματα 5-8 έως 5-11 απεικονίζονται τα προφίλ έγχυσης και οι καμπύλες πίεσης και ROHR συναρτήσεως της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, H, M και την περίπτωση αναφοράς.



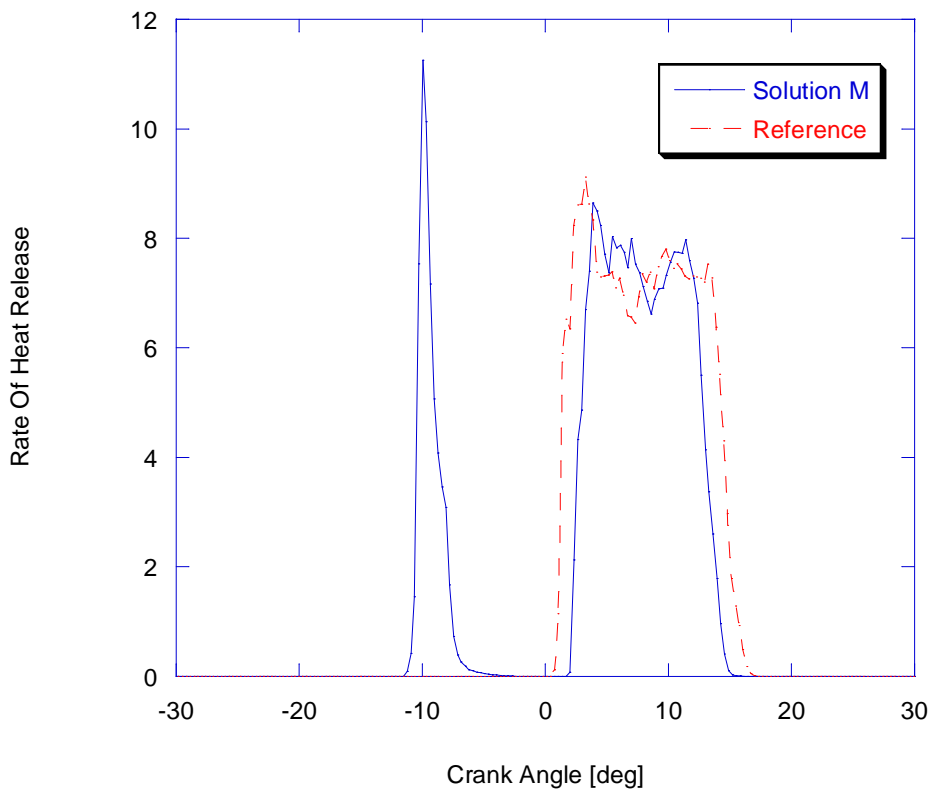
Σχήμα 5-8: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: προφίλ έγχυσης με προέγχυση και υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, M και την περίπτωση αναφοράς.



Σχήμα 5-9: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: προφίλ έγχυσης με προέγχυση και υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση H και την περίπτωση αναφοράς.



Σχήμα 5-10: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, H, και την περίπτωση αναφοράς.



Σχήμα 5-11: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση M και την περίπτωση αναφοράς.

Στην περίπτωση M, η προέγχυση εκκινά στις -14.2° , σημαντικά αργότερα σε σχέση με τις περιπτώσεις A και H. Το Σχήμα 5-11 αποτυπώνει για την περίπτωση M μια εξαιρετικά βίαιη έναυση (περί τις -10° CA), η οποία οδηγεί σε ταχεία κατανάλωση του καυσίμου που εγχύεται κατά την προέγχυση. Η αντίστοιχη διεργασία είναι λιγότερο έντονη στις περιπτώσεις A και H. Αυτό μπορεί ποιοτικά να ερμηνευθεί από τα υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας κατά την έγχυση του καυσίμου, στην περίπτωση M. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση M η αρχή της προέγχυσης αντιστοιχεί σε -14.2° CA, όταν στον κύλινδρο επικρατεί μέση πίεση 78 bar και μέση θερμοκρασία 778 K. Από την άλλη μεριά, η αρχή της προέγχυσης για την περίπτωση A είναι στις -28.9° CA, με αντίστοιχες τιμές 33 bar και 620 K. Η καύση της πιλοτικά εγχυόμενης μάζας καυσίμου οδηγεί, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, σε αυξημένα επίπεδα πίεσης κατά τη φάση της συμπίεσης (αύξηση του προσδιδόμενου έργου). Τα αυξημένα επίπεδα πίεσης κατά την αρχή της εκτόνωσης οδηγούν σε πιθανή αύξηση του ωφέλιμου έργου (ανάλογα με την αρχή της κύριας έγχυσης), και, σε συνδυασμό με τη μείωση της συνολικά εγχυόμενης μάζας, σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Σε όλες τις περιπτώσεις με προέγχυση, η συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου είναι μειωμένη σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Στις περιπτώσεις A και H, οι δύο διακριτές φάσεις που παρατηρούνται στην καμπύλη του ROHR κατά τη φάση της συμπίεσης αντιστοιχούν στην καύση του ελαφρού τμήματος και του τμήματος καταλοίπων του καυσίμου.

Στο Σχήμα 5-8 παρατηρείται ότι, στην περίπτωση M, τα επίπεδα πίεσης κατά τη φάση της εκτόνωσης είναι σημαντικά υψηλότερα, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στην αρχή της κύριας έγχυσης λίγο μετά το Άνω Νεκρό Σημείο (1.4° CA). Για καθυστερημένη αρχή της κύριας έγχυσης, μειώνονται τα επίπεδα πίεσης κατά της φάση της εκτόνωσης, και συνεπώς και το αποδιδόμενο έργο, με αντίστοιχη επιβάρυνση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Στα Σχήματα Σχήματα 5-12, 5-13 και 5-14 παρουσιάζονται ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NO_x στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, σε διαφορετικά χρονικά σημεία της διεργασίας, για τις περιπτώσεις A, H και M. Παρατηρείται ότι υπάρχει σύμπτωση ανάμεσα στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας και αυτές υψηλής συγκέντρωσης NO_x . Κατά τη φάση της συμπίεσης, η θερμοκρασία παραμένει σε όλες τις περιπτώσεις χαμηλότερη από 2000 K, με αποτέλεσμα τη μη δημιουργία NO_x . Στις περιπτώσεις A και H (αρχή της προέγχυσης περί τις -28° CA), ως απόρροια της χαμηλής πυκνότητας του αέρα, τμήμα της δέσμης καυσίμου προσκρούει στα τοιχώματα του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα την καύση εγγύς του τοιχώματος, και την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, με αρνητικές συνέπειες στη θερμική φόρτιση του κινητήρα. Αντίθετα, στην περίπτωση M, η ταχεία διάσπαση της δέσμης καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα την καύση σε περιοχές μακριά από τα τοιχώματα.

Στα Σχήματα 5-15, 5-16 και 5-17 παρουσιάζονται ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (ϕ) στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, σε διαφορετικά χρονικά σημεία της διεργασίας, για τις περιπτώσεις A, H και M. Στα ίδια

Σχήματα παρουσιάζονται επίσης οπτικοποιήσεις του spray βαρέος καυσίμου. Παρατηρείται ότι γενικά οι τιμές υψηλών τιμών φ προκύπτουν από τον συνδυασμό της κατεύθυνσης της έγχυσης και της παρουσίας εγκάρσιας συστροφής. Στις περιπτώσεις A και H, υπάρχει σε κάποιες χρονικές στιγμές κατά τη συμπίεση υψηλό επίπεδο τιμών φ εγγύς του τοιχώματος.

Η χρονική εξέλιξη του σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης οπτικοποιείται για τις περιπτώσεις A, H και M στα Σχήματα 5-18, 5-19 και 5-20, αντίστοιχα. Εδώ, παρίστανται ισοϋψείς καμπύλες μιας συνάρτησης σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης, f , η οποία έχει εισαχθεί πρόσφατα (Kontoulis et al., 2008), και βασίζεται στη μορφή των ισοϋψών καμπύλων του χάρτη T- φ των Kitamura et al. (2002), βλ. Σχήμα 5-3. Έτσι, η συνάρτηση f έχει επιλεγεί ώστε ο σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης να εξαρτάται γραμμικά από το φ , και να είναι παραβολική συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αρχικά ορίζεται η συνάρτηση:

$$y(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$$

Με βάση το Σχήμα 5-3, θεωρούμε ότι η συνάρτηση $y(T)$ μηδενίζεται για τιμές της θερμοκρασίας εκτός του εύρους 1500-2500 K, και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή, ίση με τη μονάδα για τιμή της θερμοκρασίας ίση με 2000 K.

Έτσι, οι τιμές των συντελεστών του τριωνύμου, a , b , c , προκύπτουν από την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος 3x3, με βάση τα ακόλουθα ζεύγη τιμών:

$$(T_1, y_1) = (1500, 0)$$

$$(T_2, y_2) = (2000, 1)$$

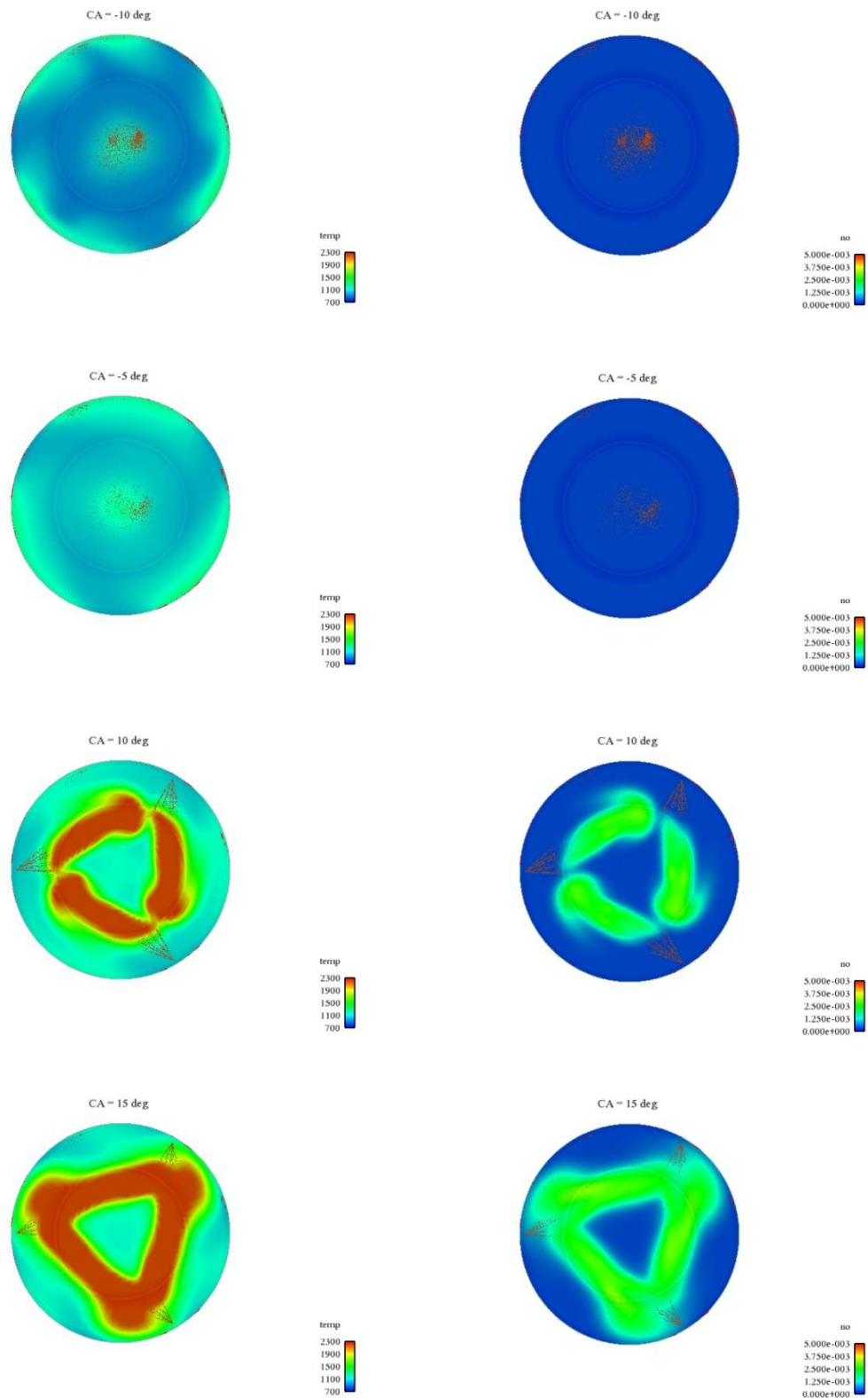
$$(T_3, y_3) = (2500, 0)$$

Η συνάρτηση f μπορεί πλέον να προκύψει από το γινόμενο $\varphi \cdot y(T)$:

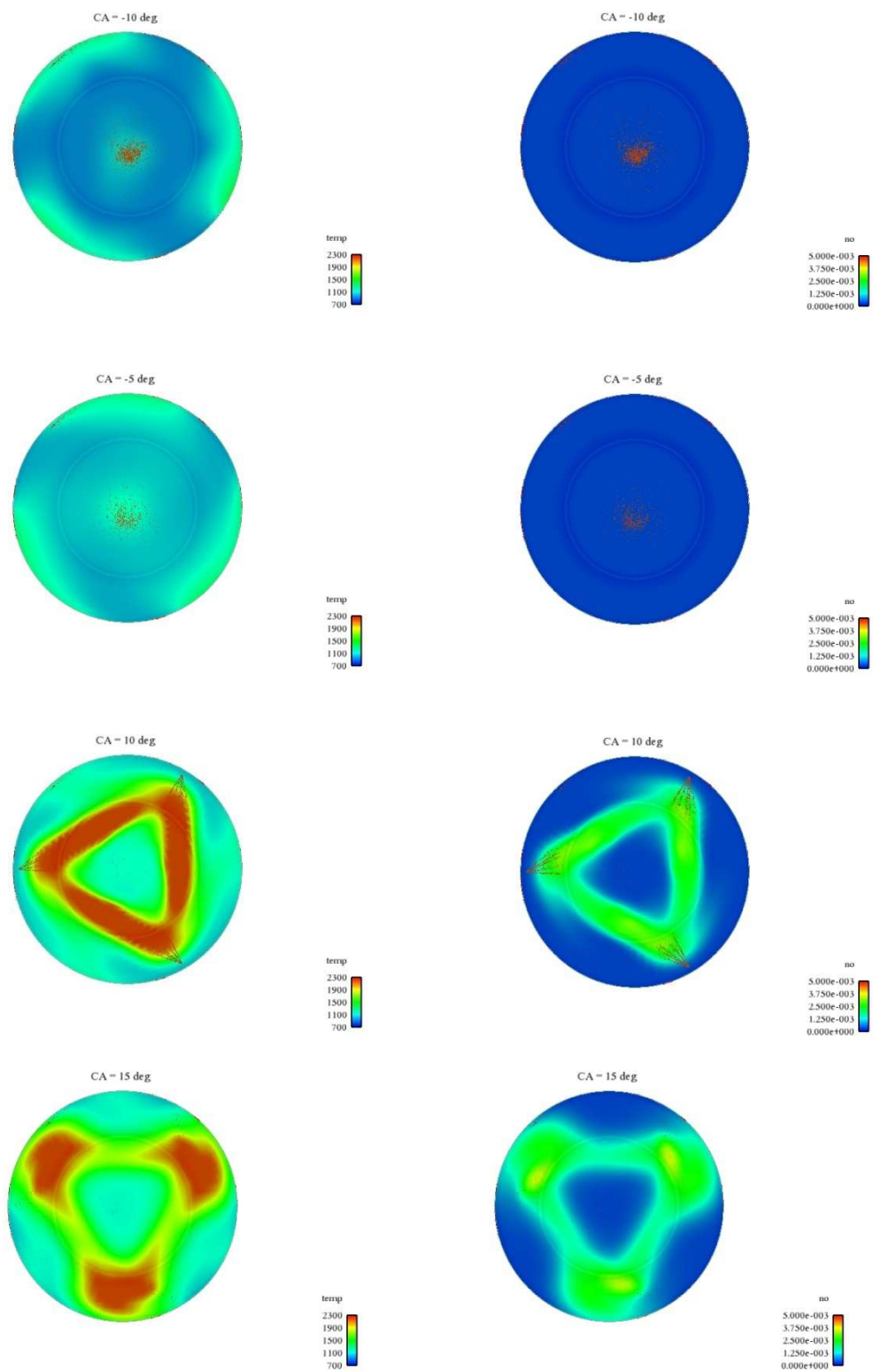
$$f = \varphi \cdot \left(-\frac{1}{250000} \cdot T^2 + \frac{1}{62.5} \cdot T - 15 \right)$$

Οι επιφάνειες που παρίστανται σχηματικά στα Σχήματα 5-18, 5-19 και 5-20 περικλείουν περιοχές στις οποίες η συνάρτηση f παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 3, αντιστοιχούν δε σε τιμές του κλάσματος μάζας παραγόμενων σωματιδίων αιθάλης μεγαλύτερες από περίπου 5%. Εμφανώς, οι περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σωματιδίων αιθάλης συμπίπτουν με τις περιοχές υψηλών τιμών φ .

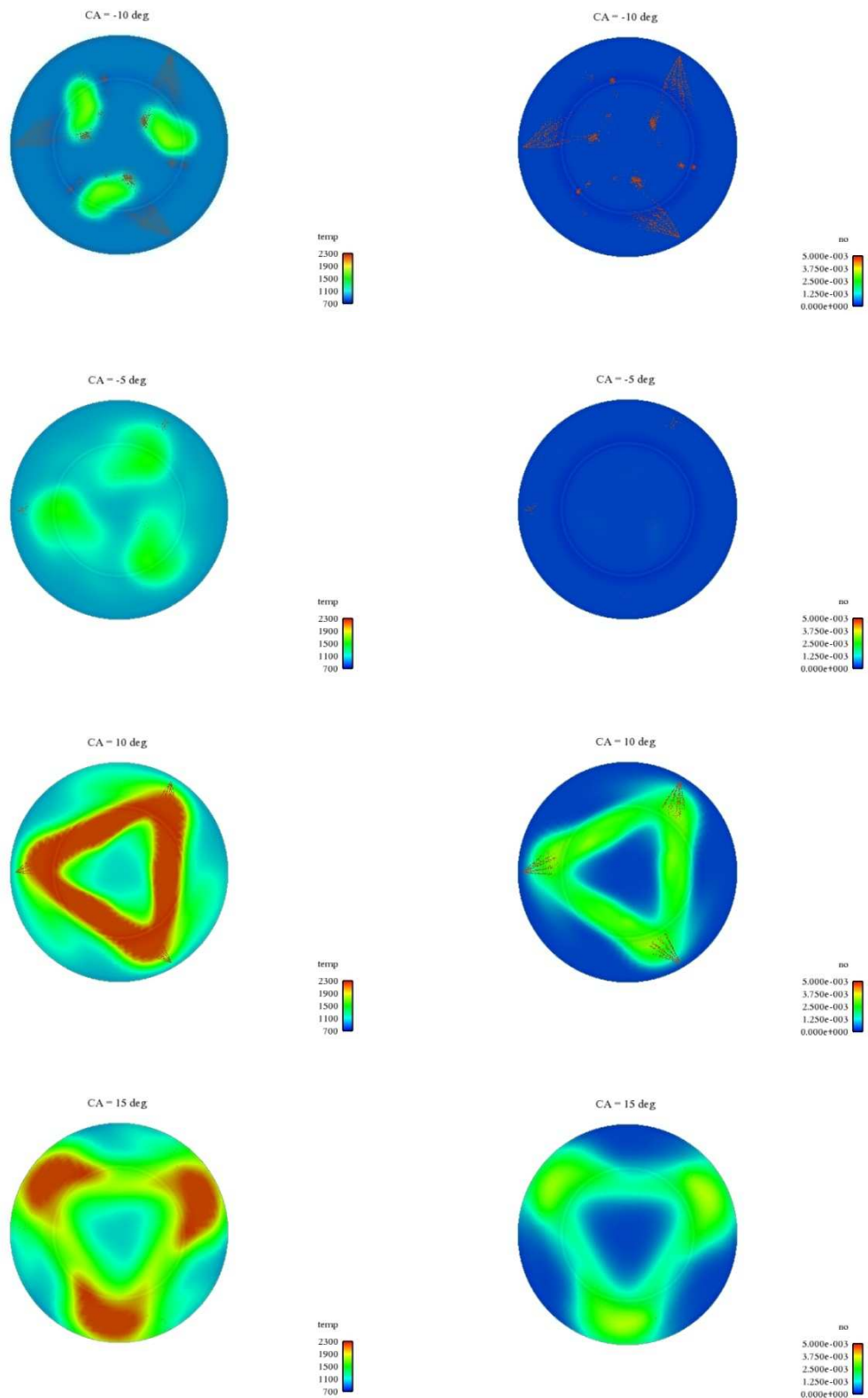
Τέλος, στα Σχήματα 5-21, 5-22 και 5-23 παρουσιάζονται επί του χάρτη T- φ οι τοπικές τιμές T, φ όλων των υπολογιστικών κελιών, σε αντιπροσωπευτικά χρονικά στιγμιότυπα. Στα παραπάνω Σχήματα επιβεβαιώνεται ο σχηματισμός των κύριων ρύπων σε χρονικές στιγμές που συμπίπτουν με αυτές που απορρέουν από την οπτικοποίηση του πεδίου ροής.



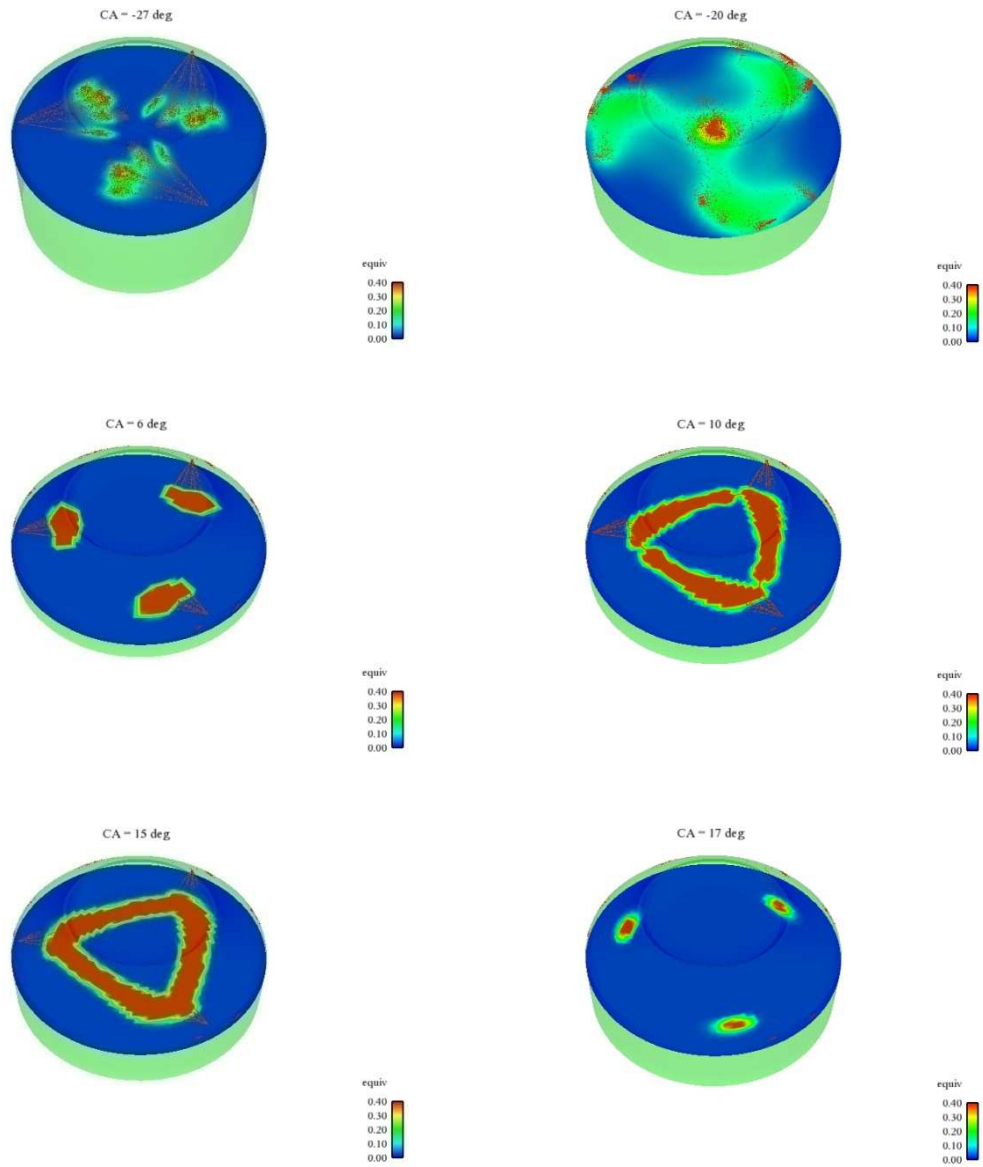
Σχήμα 5-12: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NOx στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για την περίπτωση A, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



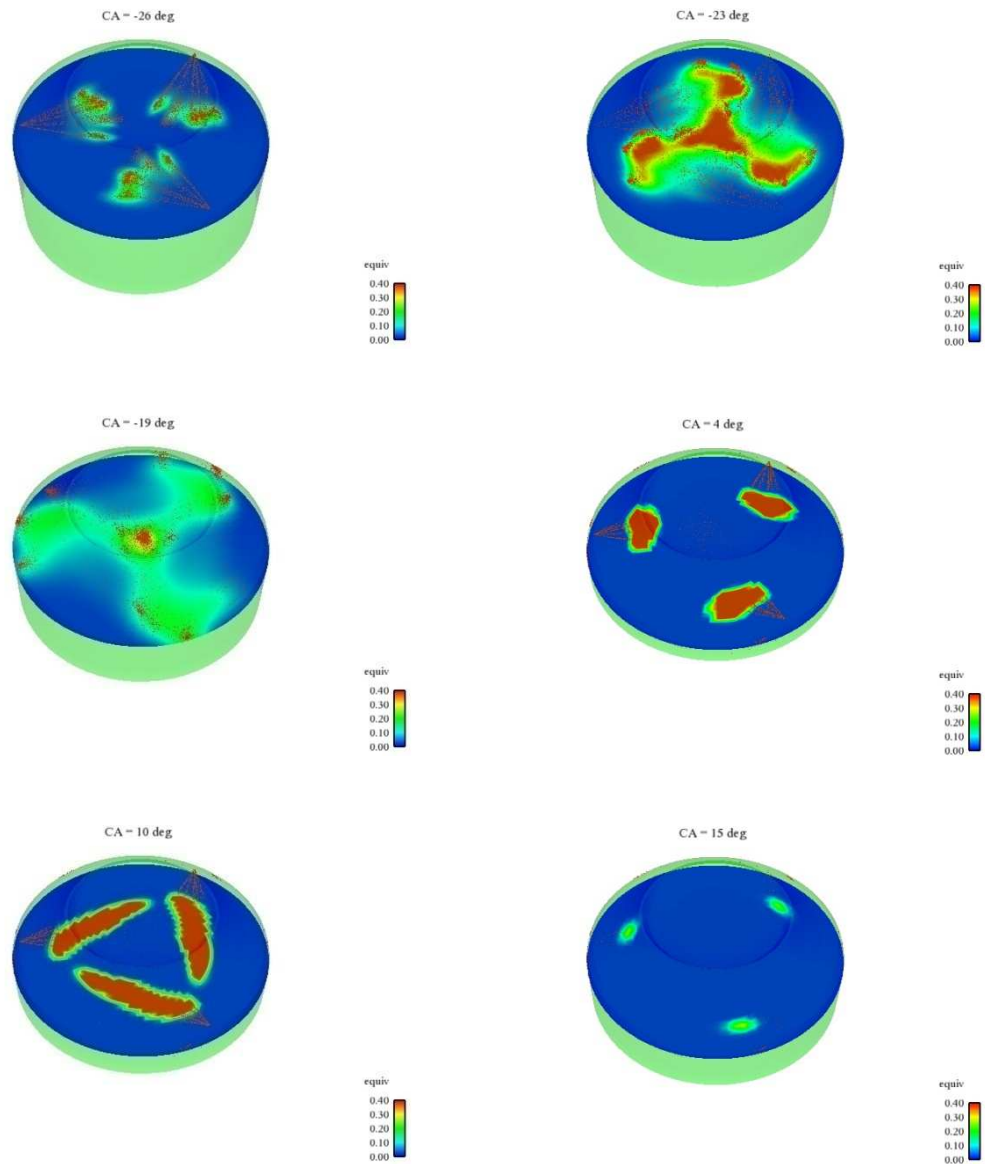
Σχήμα 5-13: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Ισοψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NOx στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για την περίπτωση H, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



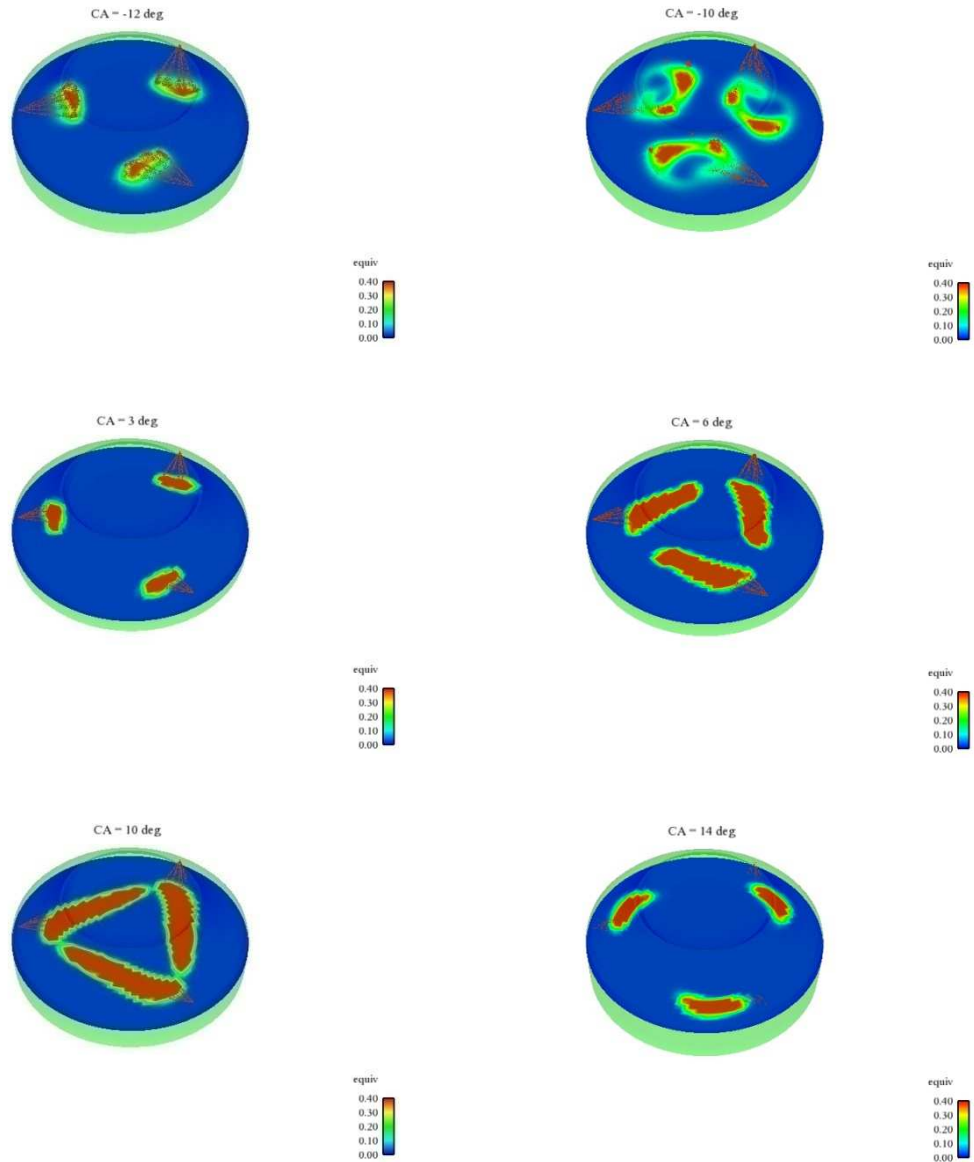
Σχήμα 5-14: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NOx στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για την περίπτωση M, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



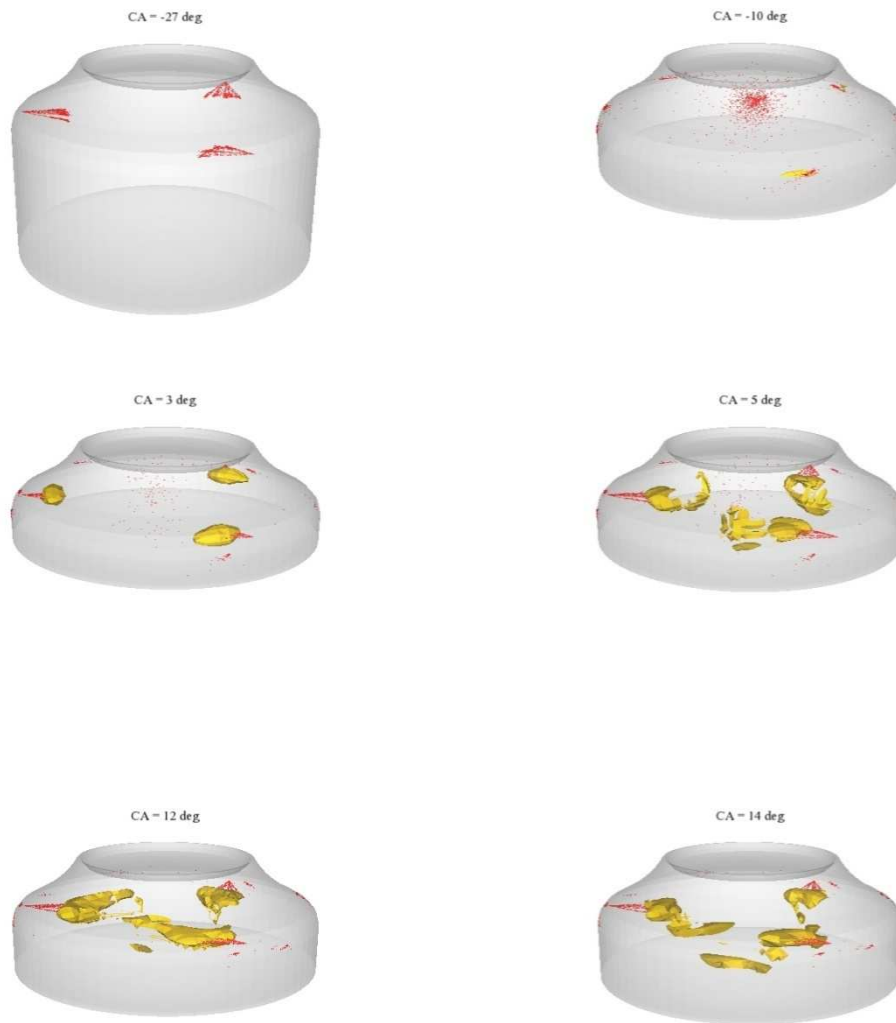
Σχήμα 5-15: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: οπτικοποίηση της υγρής δέσμης κασίμου και ισοϋψείς καμπύλες λόγω ισοδυναμίας κασίμου αέρα στο επίπεδο των εγχυτήρων για την περίπτωση Α, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



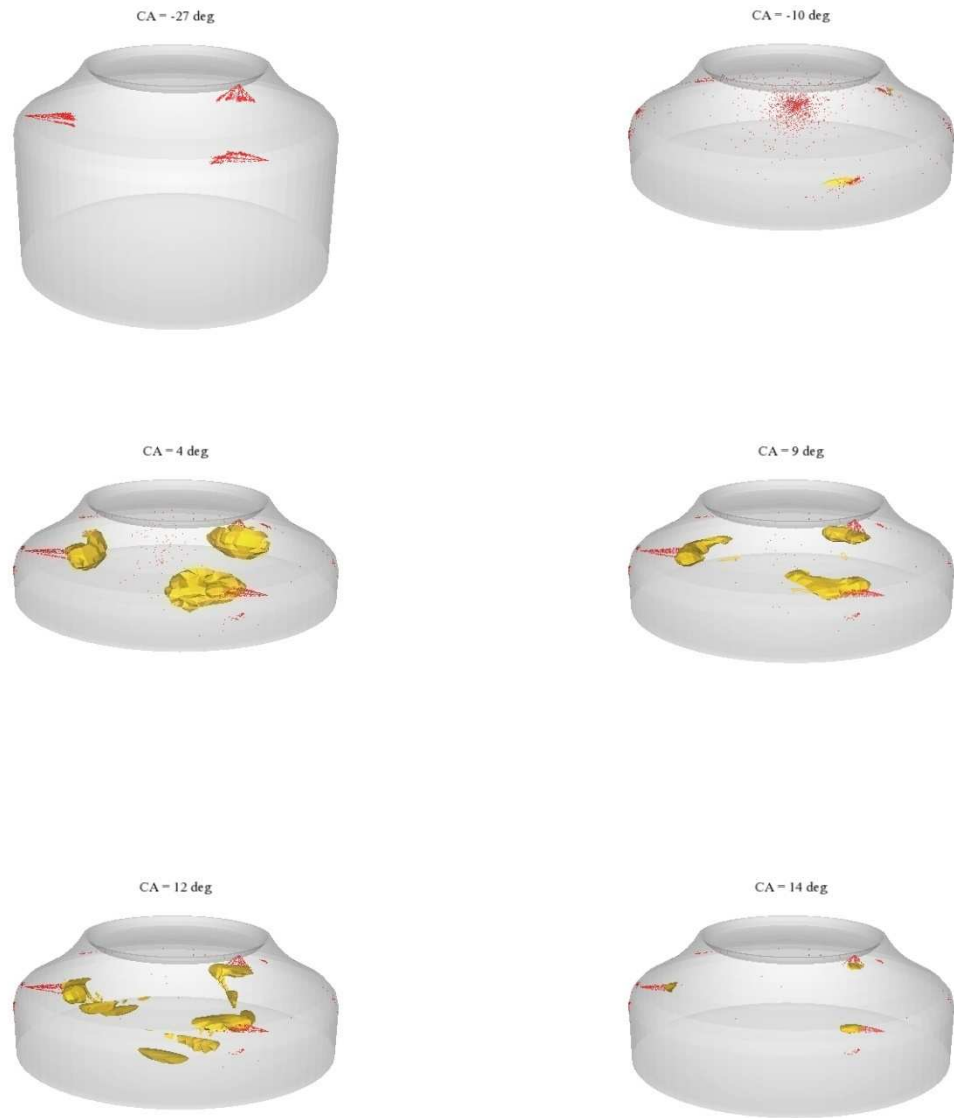
Σχήμα 5-16: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς; οπτικοποίηση της υγρής δέσμης κασίμου και ισοϋψείς καμπύλες λόγω ισοδυναμίας κασίμου αέρα στο επίπεδο των εγχυτήρων για την περίπτωση H, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



Σχήμα 5-17: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: οπτικοποίηση της υγής δέσμης κασίμου και ισοϋψείς καμπύλες λόγω ισοδυναμίας κασίμου αέρα στο επίπεδο των εγχυτήρων για την περίπτωση M, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



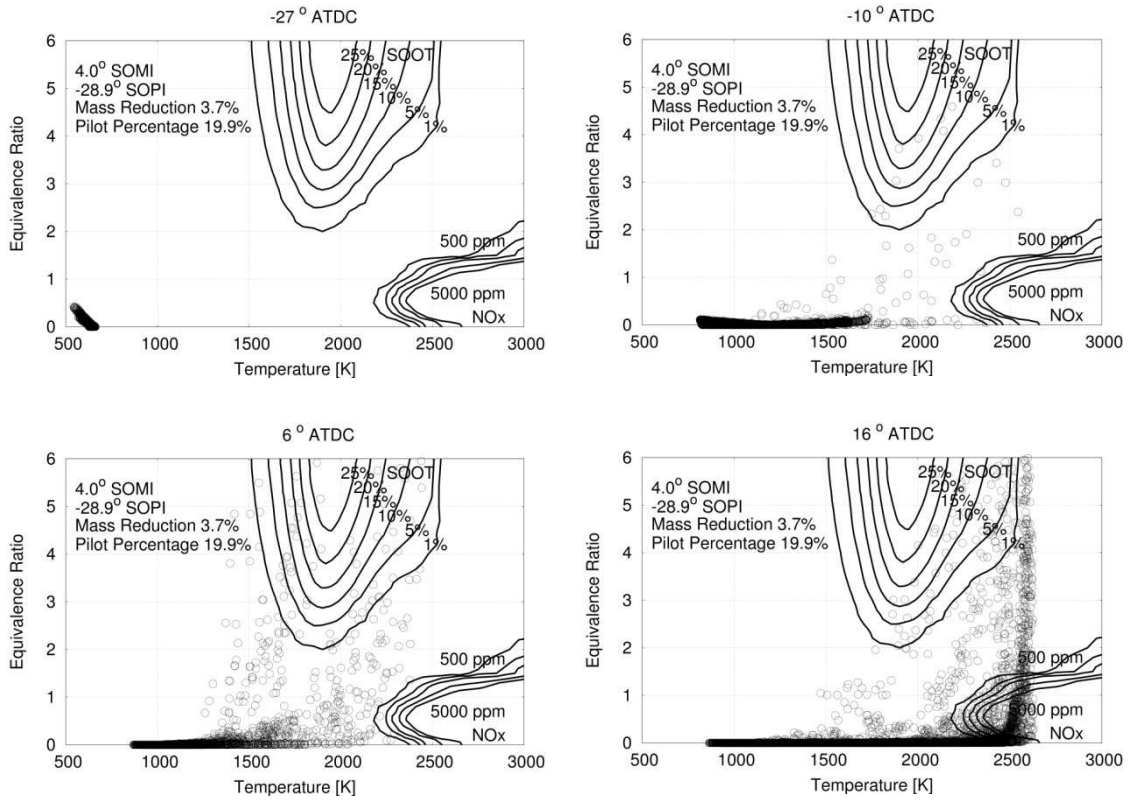
Σχήμα 5-18: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: περιοχές σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης (που αντιστοιχούν σε τιμές της συνάρτησης παραγωγής αιθάλης $f > 3$) στην περίπτωση A, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



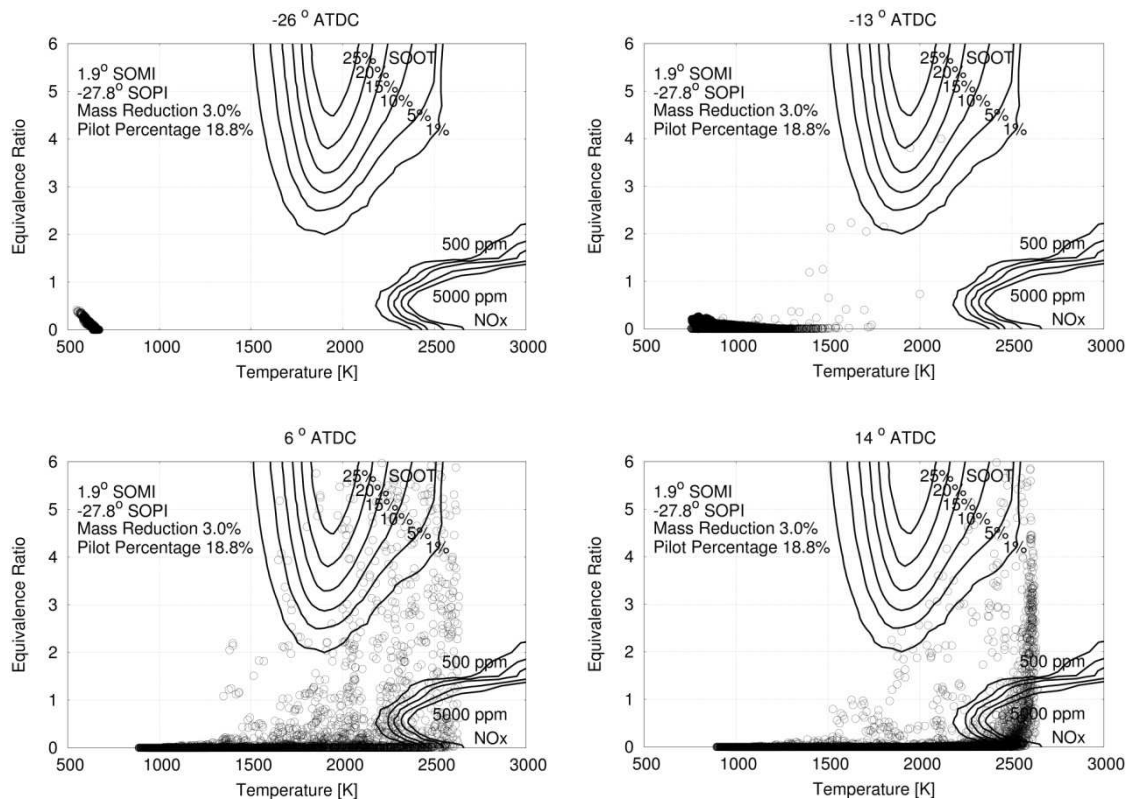
Σχήμα 5-19: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: περιοχές σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης (που αντιστοιχούν σε τιμές της συνάρτησης παραγωγής αιθάλης $f > 3$) στην περίπτωση Η, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



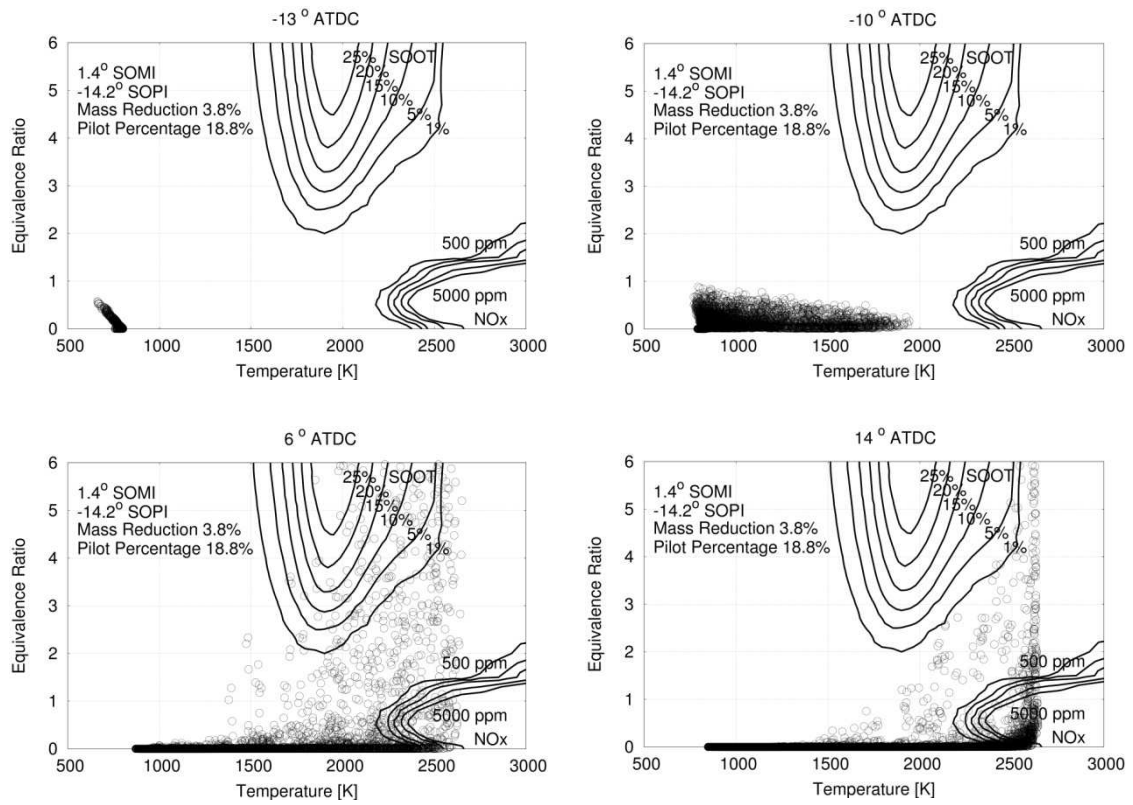
Σχήμα 5-20: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: περιοχές σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης (που αντιστοιχούν σε τιμές της συνάρτησης παραγωγής αιθάλης $f > 3$) στην περίπτωση M, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



Σχήμα 5-21: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: χάρτες T-φ για την περίπτωση A, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



Σχήμα 5-22: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: χάρτες T-f για την περίπτωση H, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.



Σχήμα 5-23: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: χάρτες T-φ για την περίπτωση M, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.

6 Συμπεράσματα - προτάσεις

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, με στόχο τη μοντελοποίηση της καύσης βαρέος καυσίμου με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, και εισήχθη στον κώδικα KIVA-3. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου προσδιορίστηκαν με βάση πρόσφατη σχετική μελέτη (Κυριακίδης, 2009). Το βαρύ καύσιμο μπορεί να θεωρηθεί μίγμα ενός ελαφρύτερου τμήματος και ενός τμήματος καταλοίπων, σε αντιστοιχία με τη συνήθη πρακτική ανάμιξης των εν λόγω δύο τμημάτων σε εφαρμογές της ναυτιλίας. Στο μοντέλο καύσης που αναπτύχθηκε εδώ, θεωρούμε ότι το βαρύ καύσιμο καίγεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αντιστοιχεί στην καύση του ελαφρύτερου τμήματος του καυσίμου, και η δεύτερη στην καύση του τμήματος καταλοίπων. Η επιλογή βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα για μικρούς θαλάμους καύσης σταθερού όγκου (Struckmeier et al., 2009). Ο ρυθμός εξέλιξης της καύσης κατά την πρώτη φάση προκύπτει ταχύτερος από τον αντίστοιχο της δεύτερης. Κριτήριο για τη μετάβαση στη δεύτερη φάση είναι η πλήρης καύση της μάζας καυσίμου που αντιστοιχεί στο ελαφρύ τμήμα. Το μοντέλο καύσης που αναπτύχθηκε εδώ εξάγει ρεαλιστικά αποτελέσματα για εφαρμογές καύσης spray βαρέος καυσίμου σε μικρούς θαλάμους καύσης σταθερού όγκου.

Επίσης, στην παρούσα εργασία, το νέο μοντέλο εφαρμόστηκε στην προσομοίωση της καύσης σε μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel, σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Τα πρώτα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ενθαρρυντικά, αλλά χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, και υποδεικνύουν την ανάγκη προσαρμογής του νέου μοντέλου για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές μεγάλων ναυτικών κινητήρων. Συγκεκριμένα, κρίνεται απαραίτητη η προσαρμογή του μοντέλου με βάση πειραματικά δεδομένα σε μεγάλους θαλάμους καύσης σταθερού όγκου. Επιπλέον, έγινε μια πρώτη προσπάθεια υπολογιστικής βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης του παραπάνω κινητήρα για χρήση βαρέος καυσίμου, με σκοπό την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Εν προκειμένω, θεωρήθηκε προφίλ έγχυσης με παρουσία προέγχυσης. Η βελτιστοποίηση έκανε χρήση σύζευξης του κώδικα KIVA-3 με το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι σε ποιοτική συμφωνία με πρόσφατη σχετική μελέτη για χρήση καυσίμου Diesel (Ανδρεάδης, 2008).

Όπως επισημάνθηκε, το νέο μοντέλο καύσης χρήζει περαιτέρω προσαρμογής για συνθήκες μεγάλων ναυτικών κινητήρων. Για τον σκοπό αυτόν, θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η χρήση πειραματικών δεδομένων για καύση βαρέος καυσίμου στον θάλαμο καύσης σταθερού όγκου που αναπτύχθηκε πρόσφατα στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος HERCULES (Herrmann et al., 2007, 2009). Δεδομένα από την παραπάνω πειραματική διάταξη αναμένονται στο εγγύς μέλλον. Επίσης, θα ήταν επιθυμητή η χρήση πειραματικών δεδομένων από τη λειτουργία του κινητήρα με χρήση βαρέος καυσίμου.

Σε επόμενο στάδιο, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπολογιστικές μελέτες μείωσης των εκπομπών ρύπων σε μεγάλους ναυτικούς κινητήρες, με χρήση βαρέος καυσίμου. Τέτοιες μελέτες μπορούν να περιλαμβάνουν την εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης και την ανακύκλωση καυσαερίων, μπορούν δε να συνδυάζονται με μελέτες βελτιστοποίησης, θέτοντας ως ταυτόχρονο στόχο τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

7 Βιβλιογραφία

- Amsden, A.A. *KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries*. Los Alamos National Laboratory LA-12503-MS, 1993.
- Amsden, A.A., O'Rourke, P.J., Butler, T.D. *KIVA II – A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays*. Los Alamos National Laboratory LA-11560-MS, 1989.
- Andreadis, P., Chryssakis, C., Kaiktsis, L. *Optimization of Injection Characteristics in a Large Marine Diesel Engine Using Evolutionary Algorithms*. SAE Technical Paper Series 2009-01-1448, 2009.
- Bergman, M., Golovitchev, V.I. *Application of Transient Temperature vs. Equivalence Ratio Emission Maps to Engine Simulations*. SAE Technical Paper Series 2007-01-1086, 2007.
- Cantu-Paz, E. *A Survey of Parallel Genetic Algorithm*. *Calculateurs Paralleles*, 10 (2), 1998.
- Chong, E., Zak, S. *An Introduction to Optimization*. John Wiley & Sons, 2001.
- Coello, C. A. *Handling Preferences in Evolutionary Multi-objective Optimization: A Survey*. 2000 Congress on Evolutionary Computation, Vol. 1, p. 30-37, 2000.
- Fonseca, C.M, Fleming, P.J. *An Overview of Evolutionary Algorithms in Multi-objective Optimization*, *Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-16, 1995.
- Goldsworthy, L. *Computational Fluid Dynamics Modelling of Residual Fuel Oil Combustion in the Context of Marine Diesel Engines*. *Int. J. of Engine Research*, Vol. 7, p. 181-199, 2006.
- Herrmann, K., Schulz, R., Weisser, G. *Development of a Reference Experiment for Large Diesel Engine Combustion System Optimization*. CIMAC Congress 2007, Paper No. 98, Vienna, 2007
- Herrmann, K., Kyrtatos, A., Schulz, R., Weisser, G. *Validation and Initial Application of a Novel Spray Combustion Chamber Representative of Large Two-Stroke Diesel Engine Combustion Systems*. ICLASS 2009, 11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Colorado, USA, 2009.
- Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill international editions, 1988.
- IMO. *MARPOL 73/78 Annex VI: Prevention of Air Pollution from Ships*, 2004.
- Kaiktsis, L. *Numerical Simulation of Flow and Combustion in the RTA58T Engine of Wärtsilä NSD*. Technical Report, 2001.
- Kampolis, I.C., Giannakoglou, K.C. *A Multilevel Approach to Single- and Multi-Objective Aerodynamic Optimization*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197, pp. 2963-2975, 2008.
- Karakasis, M., Giannakoglou, K.C. *On the Use of Metamodel-Assisted Multi-Objective Evolutionary Algorithms*. *Engineering Optimization*, Vol. 38(8), pp. 941-957, 2006.

Kitamura, T., Ito, T., Senda, J., Fujimoto, H. *Mechanism of Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels Based on the Dependency of the Equivalence Ratio and Temperature on Soot Particles Information*. Int. J. of Engine Research, Vol. 3, No 4, pp. 223-247, 2002.

Kong, S., Han, Z. and Reitz, R. *The development and application of a diesel ignition and combustion model for multidimensional engine simulations*. SAE Technical Paper Series 950278, 1995.

Kontoulis, P., Chryssakis, C., Kaiktsis, L. *Analysis of Combustion and Emissions in a Large Two-Stroke Marine Diesel Engine, Using CFD and T- ϕ Mapping*. 18th Int. Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress, Detroit, MI, 2008.

Kontoulis, P., Chryssakis, C., Kaiktsis, L. *Evaluation of Pilot Injections in a Large Two-Stroke Marine Diesel Engine, Using CFD and T- ϕ Mapping*. COMODIA 2008, Sapporo, Japan, July 2008.

Kyriakides, N., Chryssakis, C., Kaiktsis, L. *Development of a Computational Model for Heavy Fuel Oil for Marine Diesel Engine Applications*. SAE Technical Paper Series 2009-01-1858, 2009.

Lloyds, R. *Marine Exhaust Emission Research Programme, Phase II Summary Report*. 1992.

Pundir, B.P. *Engine Emissions*. Alpha Science, 2007.

Schenk C., Stassen W. J. M., Lewis C., P., G. *Ignition Quality of Residual Fuel Oils*. CIMAC Congress 1998, Vol. 2, Copenhagen, Denmark, 1998.

Shell, Marine Products. «Ignition Quality of Residual Fuel Oils», CIMAC Congress 1998, Copenhagen, Denmark, 1998

SNAME. *Marine engineering*. Jersey City, N.J. 1992.

Struckmeier, D., Tsuru, D., Kawauchi, S., Tajima, H. *Multi-Component Modeling of evaporation, ignition and combustion processes of heavy residual fuel oil*. SAE Technical Paper Series 2009-01-2677, 2009.

Takasaki, k., Tajima, H., Nakashima, M., Ishida, H., Osafune, S. *Combustion Characteristics of Trouble-Making Bunker Fuel Oil*. CIMAC Congress 2001, pp. 620-629, Hamburg, 2001.

Takasaki, Hirata, J., Sugiura, K., Kurosawa, T., Hashimoto, T., Miyano, H., Takeda, A., Suzuki, D., Hayashi, T., Tajima, T. *Problem in the near future – Low sulfur and low grade bunker fuel*. CIMAC Congress 2007, Paper No. 74, Vienna, 2007.

Tan, K.C., Khor, E.F., Lee, T.H. *Multiobjective Evolutionary Algorithms and Applications*. Springer Verlag, London, 2005.

Thevenin, D., Janiga, G. *Optimization and Computational Fluid Dynamics*. Springer Verlag, Berlin, 2008.

Wärtsilä Switzerland Ltd. *The Sulzer RT-flex Common Rail System Described*. Wärtsilä paper, 2004.

Wärtsilä Switzerland Ltd. *Ship Power Product Catalogue*. www.wärtsilä.com, 2010.

www.dieselnet.com.

Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L. *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multi-objective Optimization*. Evolutionary Methods for Design, Optimization, and Control, Barcelona, Spain, 2002.

Ανδρεάδης, Π. *Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Έγχυσης σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel*. Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2008.

Γιαννόπουλος, Π.Α. *Μηχαναί*. Πειραιεύς, 1981.

Κοντούλης, Ι.Π. *Υπολογιστική Μελέτη Εναλλακτικών Στρατηγικών Έγχυσης σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel*. Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2008.

Κυριακίδης, Ν. *Ανάπτυξη Μοντέλου Βαρέος Καυσίμου για Εφαρμογές Ναυτικών Κινητήρων Diesel*. Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2009.

Κυρτάτος, Ν.Π. *Ναυτικοί Κινητήρες Diesel - Θέματα Σχεδίασης και Λειτουργίας*. Συμμετρία, 1993.

Χατζηλάου, Κ.Α. Μοστράτος, Ι.Κ. *Η έγχυση του καυσίμου στις ναυτικές μηχανές Diesel*. Εκδόσεις Σταυριδάκη, 1978.