



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Δ. Σταμούδης

**Ανάπτυξη Μοντέλου Ατμοποίησης
Βαρέος Ναυτιλιακού Καυσίμου Δύο Συστατικών
για Εφαρμογές Ναυτικών Κινητήρων Diesel**

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Α. Καϊκτής, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη: Ν. Κυρτάτος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χρ. Φραγκόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή και τους Επιστημονικούς Συνεργάτες του Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας Δρ. Χρ. Χρυσάκη, Δρ. Κ. Αϊβαλή και Δρ. Ειρ. Ευσταθίου για την καθοδήγηση και την υποστήριξή τους, που ήταν απαραίτητες για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Ν. Κυρτάτο και κ. Χρ. Φραγκόπουλο, ως διδάσκοντες και μέλη της εξεταστικής επιτροπής της Διπλωματικής μου Εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους φίλους και τους συμφοιτητές μου για τη βοήθεια και τη συνεργασία τους κατά τα χρόνια των σπουδών μου στο ΕΜΠ. Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου και τον αδελφό μου για την υποστήριξή τους.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΣΥΝΟΨΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 Οι κανονισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος.....	5
1.2 Σκοπός της παρούσας εργασίας.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΒΑΡΥ ΚΑΥΣΙΜΟ	8
2.1 Παραγωγή βαρέος καυσίμου.....	8
2.2 Θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου	10
2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση ροής και καύσης βαρέος καυσίμου.....	15
2.4 Πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΥΣΗΣ ΒΑΡΕΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	20
3.1 Ο κώδικας ΚΙΝΑ-3.....	20
3.2 Μοντελοποίηση ατμοποίησης και καύσης μονοσυστατικού καυσίμου.....	20
3.3 Μοντελοποίηση ατμοποίησης και καύσης βαρέος καυσίμου δύο συστατικών	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	28
4.1 Ρύθμιση παραμέτρων του νέου μοντέλου.....	28
4.3 Υπολογιστική μελέτη μη αντιδρώσας ροής	35
4.4 Υπολογιστική μελέτη αντιδρώσας ροής.....	39
4.5 Μοντελοποίηση της καύσης στον κινητήρα RT-flex58T-B	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	65

Σύνοψη

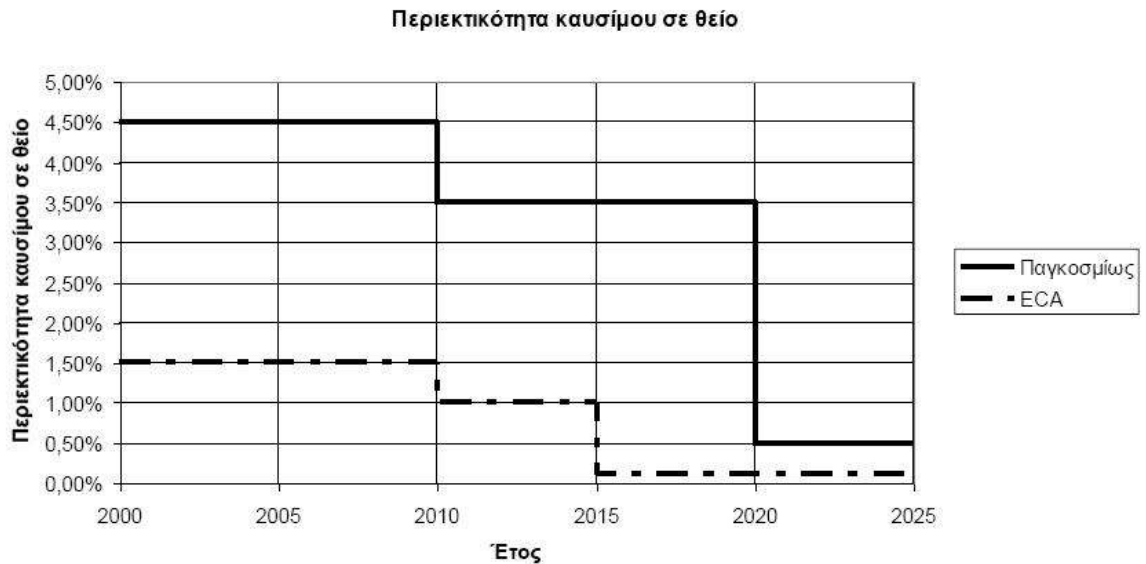
Σε ποσοστό μεγαλύτερο του 70% του παγκόσμιου στόλου, το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο (Heavy Fuel Oil - HFO) αποτελεί την κύρια επιλογή για τη λειτουργία των μεγάλων ναυτικών κινητήρων. Παρά την εν γένει χαμηλή του ποιότητα, λόγω της χαμηλής του τιμής, το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο επιλέγεται έναντι των υπολοίπων καυσίμων. Η λειτουργία κινητήρων με καύσιμα χαμηλής ποιότητας οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές ρύπων. Για την προστασία του περιβάλλοντος, οι Διεθνείς Οργανισμοί θέτουν ολοένα αυστηρότερα όρια για τις εκπομπές ρύπων από ναυτικούς κινητήρες. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των σύγχρονων κινητήρων κάνει χρήση τόσο πειραματικών όσο και υπολογιστικών μεθόδων. Η πειραματική μελέτη των φαινομένων ροής και καύσης σε ναυτικούς κινητήρες Diesel είναι εξαιρετικά δυσχερές, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους των κινητήρων και του υψηλού κόστους των πειραμάτων. Η μοντελοποίηση της θερμορευστομηχανικής με χρήση εργαλείων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD) συνιστά μια ελκυστική εναλλακτική προσέγγιση.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, παρουσιάζεται ένα νέο μοντέλο ατμοποίησης βαρέος καυσίμου, για εφαρμογές ναυτικών κινητήρων Diesel. Συγκεκριμένα, το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο θεωρείται ως μίγμα δύο κλασμάτων, ενός βαρέος και ενός ελαφρού, με διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες. Για το ελαφρύ συστατικό, χρησιμοποιούνται οι θερμοφυσικές ιδιότητες του δεκατετρανίου ($C_{14}H_{30}$), ενώ για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος κλάσματος χρησιμοποιείται το πρόσφατα αναπτυχθέν μοντέλο των Kyriakides et al. (2009). Στο παρόν μοντέλο, προτείνεται η χρήση μιας ακριβέστερης, σε σχέση με τις συνήθως χρησιμοποιούμενες, σχέσης για τη μεταφορά θερμότητας λόγω εξαναγκασμένης συναγωγής προς τις εξατμιζόμενες σταγόνες του spray καυσίμου. Η μοντελοποίηση της καύσης γίνεται με χρήση ενός τροποποιημένου μοντέλου χαρακτηριστικού χρόνου. Τα παραπάνω μοντέλα εισήχθησαν στον κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την προσομοίωση της ροής και καύσης του spray βαρέος καυσίμου σε δύο θαλάμους καύσης σταθερού όγκου. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με πειραματικά της βιβλιογραφίας. Τέλος, έγινε προσομοίωση της ροής και καύσης βαρέος καυσίμου σε μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel, και τα υπολογιστικά αποτελέσματα προέκυψαν σε καλή συμφωνία με αντίστοιχα πειράματα. Η παρούσα εργασία μπορεί να θεωρηθεί ως βάση περαιτέρω ανάπτυξης φυσικών μοντέλων, με στόχο την ακριβή προσομοίωση της καύσης βαρέος καυσίμου σε ναυτικούς κινητήρες Diesel.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Οι κανονισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος

Το 2005 εισήχθη από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας (International Maritime Organization - IMO) το κεφάλαιο VI του κανονισμού MARPOL (MARine POLLution) για την προστασία του περιβάλλοντος από τους αέριους ρύπους των πλοίων (“Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships”, 2004). Συγκεκριμένα, τέθηκαν όρια για την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο αλλά και για την περιεκτικότητα των παραγόμενων καυσαερίων σε οξείδια του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x). Ειδικότερα, για προστατευόμενες παράκτιες περιοχές (Emission Control Areas – ECAs), οι εν λόγω κανόνες είναι περισσότερο αυστηροί. Αναφορικά με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο, θεσπίστηκαν δύο όρια, ανάλογα με την περιοχή στην οποία καταναλώνεται το καύσιμο, βλ. Σχήμα 1 (Κυριακίδης, 2009).



Εικόνα 1 Επί τοις εκατό επιτρεπόμενη περιεκτικότητα βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου σε θείο συναρτήσει του ημερολογιακού έτους κατασκευής του κινητήρα, σε προστατευόμενες (Emission Control Areas – ECAs) και μη προστατευόμενες περιοχές, σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO. Πηγή: Κυριακίδης Ν., 2009.

Οι κύριοι ρύποι από κινητήρες Diesel είναι τα οξείδια το αζώτου και τα σωματίδια της αιθάλης. Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) είναι το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου (NO, NO₂). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα επιτρεπτά όρια εκπομπών οξειδίων NO_x (Tier I, II, III) για ναυτικούς κινητήρες Diesel ως συνάρτηση του ημερολογιακού έτους κατασκευής τους και του αριθμού στροφών λειτουργίας τους στο μέγιστο φορτίο (Πανταζής, 2010). Για τα σωματίδια της αιθάλης δεν έχουν θεσπιστεί ακόμη κανονισμοί.

Tier	Έτος κατασκευής κινητήρα	Όρια NO _x [g/kWh]		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
I	2000	17	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
III (ECAs)	2016	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

Πίνακας 1 Όρια εκπομπών NO_x, στο μέγιστο φορτίο, σε g/kWh, συναρτήσει του ημερολογιακού έτους κατασκευής του κινητήρα και του αριθμού στροφών λειτουργίας του, σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO. Πηγή: Κ. Πανταζής, 2009.

Άλλοι ρύποι που παράγονται κατά τη λειτουργία των ναυτικών κινητήρων Diesel είναι το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO₂ και CO, αντίστοιχα), τα οξείδια του θείου (SO_x) και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC). Από αυτούς, το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα παράγονται αναπόφευκτα λόγω της οξείδωσης του καυσίμου, με τα επίπεδα παραγωγής τους να διατηρούνται σχετικά χαμηλά λόγω του υψηλού θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης. Ωστόσο, κατά τη λειτουργία των ναυτικών κινητήρων, δεν διασφαλίζεται η περιορισμένη παραγωγή των υπολοίπων ρύπων. Συγκεκριμένα, το 15% των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου (NO_x) από τις διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, οφείλεται στη Ναυτιλία (Lloyds Register, 1992). Η ανάγκη συμμόρφωσης στους νέους κανονισμούς για την προστασία του περιβάλλοντος, αποτελεί μοχλό πίεσης προς τους κατασκευαστές και την επιστημονική κοινότητα για την εις βάθος μελέτη των φαινομένων ροής και καύσης που διέπουν τη λειτουργία των ναυτικών κινητήρων Diesel. Για την ελαχιστοποίηση των χρονοβόρων και μεγάλου κόστους πειραμάτων σε ναυτικούς κινητήρες, η χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής κερδίζει ολοένα έδαφος.

1.2 Σκοπός της παρούσας εργασίας

Το βαρύ καύσιμο είναι μίγμα υδρογονανθράκων, εξαιρετικά πλούσιο σε κατάλοιπα της κλασματικής απόσταξης. Παρά την ευρεία χρήση του, τόσο η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς του όσο και η προσομοίωση της καύσης του βαρέος καυσίμου είναι μέχρι σήμερα περιορισμένη. Στην παρούσα εργασία, συνεχίζεται η ανάπτυξη των μοντέλων που ξεκίνησε στο πλαίσιο των Διπλωματικών Εργασιών των Ν. Κυριακίδη (2009) (θερμοφυσικές ιδιότητες) και του Κ. Πανταζή (2010) (μοντέλο καύσης), με την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου ατμοποίησης βαρέος καυσίμου, για εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής σε ναυτικούς κινητήρες Diesel. Εδώ, το βαρύ καύσιμο μοντελοποιείται ως μίγμα δύο συστατικών: του ελαφρού τμήματος (cutter) και του βαρέος (HFO-residual). Γίνεται χρήση μιας ακριβούς σχέσης για την περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής σε εξαμιζόμενη σταγόνα βαρέος καυσίμου. Επίσης, αναπτύσσεται περαιτέρω το μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου δύο συστατικών της Διπλωματικής Εργασίας του Κ. Πανταζή (2010). Τα νέα μοντέλα εισάγονται στον κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3, και γίνεται προσομοίωση της ροής του spray βαρέος καυσίμου και της καύσης αυτού σε δύο θαλάμους καύσης σταθερού όγκου, καθώς και σε μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel. Για τον χαρακτηρισμό των φαινομένων, χρησιμοποιούνται η χρονική μεταβολή της πίεσης, του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, καθώς και οπτικοποίηση των υπολογιζόμενων πεδίων ροής. Τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι σε καλή συμφωνία με πειραματικές μετρήσεις.

Η δομή του κειμένου είναι η ακόλουθη: Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στο βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο: παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής του, οι θερμοφυσικές του ιδιότητες, καθώς και μια βιβλιογραφική επισκόπηση προγενέστερης έρευνας σε εφαρμογές ροής και καύσης, η οποία περιλαμβάνει και πρότυπα πειράματα. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αρχικά αναφορά στον κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3 και στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε αυτόν. Ακολούθως, περιγράφονται τα μοντέλα ατμοποίησης και καύσης βαρέος καυσίμου δύο συστατικών της παρούσας εργασίας. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα, που αφορούν σε μη αντιδρώσα και αντιδρώσα ροή spray βαρέος καυσίμου σε δύο θαλάμους καύσης σταθερού όγκου, καθώς και στην καύση σε μεγάλο δίχρονο κινητήρα Diesel. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, και προτείνονται κατευθύνσεις για τη συνέχισή της.

Κεφάλαιο 2: Το βαρύ καύσιμο

2.1 Παραγωγή βαρέος καυσίμου

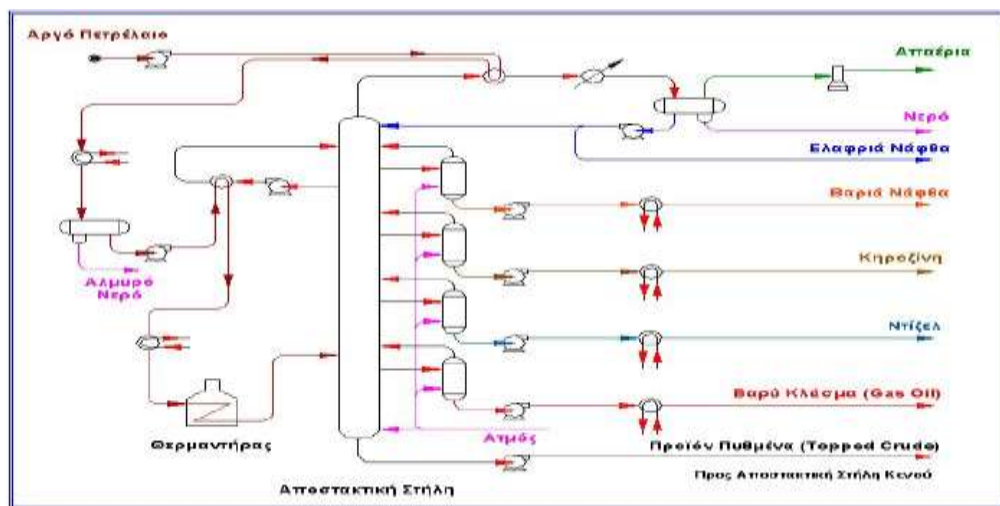
Χαρακτηριστικό των μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων είναι η ικανότητα λειτουργίας με καύσιμα διαφορετικής σύστασης όπως βαρύτερα αποστάγματα (residual fuel) αλλά και ελαφρύτερα (marine diesel oil). Το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο προκύπτει ύστερα από αναμίξεις τέτοιων κλασμάτων. Η χρήση του βαρέος καυσίμου χρονολογείται από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ως εναλλακτικό καύσιμο για το κάρβουνο των καυστήρων λεβήτων (Steernberg et al., 2007). Ως παράγωγο της διαδικασίας κλασματικής απόσταξης, το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο αποτελεί ένα μίγμα διαφόρων συστατικών, οργανικών και μη. Συγκεκριμένα, υδρογονάνθρακες ευθείας ή διακλαδισμένης αλυσίδας, κυκλικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες, μαζί με άλλες μεταλλικές ή μη ενώσεις συνδυάζονται σε ένα μίγμα που, σε συνθήκες περιβάλλοντος, χαρακτηρίζεται από μαύρο χρώμα, κολλώδη υφή και υψηλό ιξώδες, που συνήθως αναφέρεται και ως «μαζούτ». Ωστόσο, η ανάγκη περαιτέρω τυποποίησης των χαρακτηριστικών του βαρέος καυσίμου οδήγησε στην κατηγοριοποίησή του σε κλάσεις διαφορετικής ποιότητας. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται τα τυπικά χαρακτηριστικά δέκα διαφορετικών τύπων βαρέος καυσίμου (πηγή: ISO, 2010) που κυρίως χρησιμοποιούνται σήμερα στη ναυτιλία. Οι ιδιότητες του βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου βρίσκονται σε άμεση εξάρτηση με τα είδη των κλασμάτων του πετρελαίου που αναμίχθηκαν για την παρασκευή του, τον τρόπο αλλά και τη θερμοκρασία αποθήκευσής του.

Marine Residual Fuels												
Parameter	Unit	Limit	RMA 30	RMB 30	RMD 80	RME 180	RMF 180	RMG 380	RMH 380	RMK 380	RMH 700	RMK 700
Density at 15°C	kg/m ³	Max	960.0	975.0	980.0	991.0	991.0	991.0	991.0	1010.0	991.0	1010.0
Viscosity at 50°C	mm ² /s	Max	30.0	30.0	80.0	180.0	180.0	380.0	380.0	380.0	700.0	700.0
Water	% V/V	Max	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	% (m/m)	Max	3.5	3.5	4.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Aluminium + Silicon	mg/kg	Max	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Flash point	°C	Min	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Pour point, Summer	°C	Max	6	24	30	30	30	30	30	30	30	30
Pour point, Winter	°C	Max	0	24	30	30	30	30	30	30	30	30

Εικόνα 2 Φυσικές ιδιότητες δέκα διαφορετικών τύπων βαρέος καυσίμου που χρησιμοποιούνται σήμερα στη ναυτιλία, με βάση τον Παγκόσμιο Οργανισμό Πιστοποίησης (ISO, 2010).

Το βαρύ καύσιμο προέρχεται από επεξεργασία του αργού πετρελαίου. Το αργό πετρέλαιο, στην αρχική του μορφή, δεν εμφανίζει μεγάλη χρησιμότητα για τις ανθρώπινες

δραστηριότητες. Σπάνια εξαίρεση αποτελεί το «γλυκό» πετρέλαιο, που χαρακτηρίζεται από μικρή συγκέντρωση θείου και χαμηλή τιμή του ιξώδους, χαρακτηριστικά που το κάνουν άμεσα χρησιμοποιήσιμο. Το βαρύ καύσιμο είναι το τελευταίο προϊόν της κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου στα διυλιστήρια. Η διαδικασία της κλασματικής απόσταξης έχει ως στόχο την παραγωγή ενός μεγάλου αριθμού επιμέρους καυσίμων, λαμβάνει δε χώρα στις αποστακτικές στήλες, βασισμένη στο διαφορετικό σημείο βρασμού των παραγώγων του πετρελαίου. Αρχικά, η απόσταξη γίνεται υπό ατμοσφαιρική πίεση, και στη συνέχεια το παράγωγο πυθμένος (υπόλειμμα) οδηγείται στην αποστακτική στήλη χαμηλής πίεσης (υψηλού κενού). Εκεί, υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης, τα κλάσματα του πετρελαίου οδηγούνται στο σημείο βρασμού τους (σε χαμηλά επίπεδα θερμοκρασίας), αποφεύγοντας τη διάσπαση των μακρών αλυσίδων άνθρακα των υδρογονανθράκων. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται σχηματικά οι διεργασίες σε ένα σύγχρονο διυλιστήριο κατά τη φάση της κλασματικής απόσταξης υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Στην Εικόνα 3 σημειώνονται διάφορα παράγωγα της διεργασίας – όπως νάφθα, κηροζίνη και καύσιμο diesel – καθώς επίσης και η μεταφορά του προϊόντος πυθμένα προς περαιτέρω επεξεργασία στη στήλη «κενού»: Αρχικά, το αργό πετρέλαιο διέρχεται από σειρά εναλλακτών θερμότητας στους οποίους θερμαίνεται από προϊόντα της αποστακτικής στήλης έως τους 290 °C. Το τελικό στάδιο της θέρμανσης του αργού πετρελαίου πραγματοποιείται σε κλίβανο (θερμαντήρα), με τελικές θερμοκρασίες της τάξης των 400 °C. Ακολούθως, αυτό οδηγείται στην αποστακτική στήλη. Κατά τη διεργασία της κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου, λαμβάνονται διαδοχικά ολοένα βαρύτερα κλάσματα, ενώ το κάθε παραγόμενο προϊόν είναι πιθανό να υφίσταται και περαιτέρω επεξεργασία για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του.



Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας παραγωγής κλασμάτων πετρελαίου σε ένα σύγχρονο διυλιστήριο. Δύλιση σε ατμοσφαιρική πίεση. Πηγή: Κυριακίδης Ν., 2009.

2.2 Θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου

Όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη Ενότητα, η παραγωγή κλασμάτων πετρελαίου βασίζεται στο διαφορετικό σημείο βρασμού αυτών. Άμεσο αποτέλεσμα της κλασματικής απόσταξης είναι η δημιουργία προϊόντων με θερμοφυσικές ιδιότητες που διαφέρουν αισθητά από αυτές του αργού πετρελαίου. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες ενός καυσίμου επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της διεργασίας καύσης, και λαμβάνονται υπόψη για τη μοντελοποίησή της. Έτσι, στην παρούσα Ενότητα, γίνεται αναφορά σε σημαντικές θερμοφυσικές ιδιότητες για (α) καύσιμο diesel και (β) βαρύ κλάσμα πετρελαίου (HFO-residual): ιξώδες, πυκνότητα, επιφανειακή τάση, ενθαλπία, ενθαλπία εξάτμισης, θερμογόνος δύναμη, τάση ατμών και σημείο ανάφλεξης.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος κλάσματος (HFO-residual) εξαρτώνται άμεσα τόσο από τη διαδικασία κλασματικής απόσταξης όσο και από το μοριακό βάρος και την κρίσιμη θερμοκρασία του. Η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης (Wauquier, 1995):

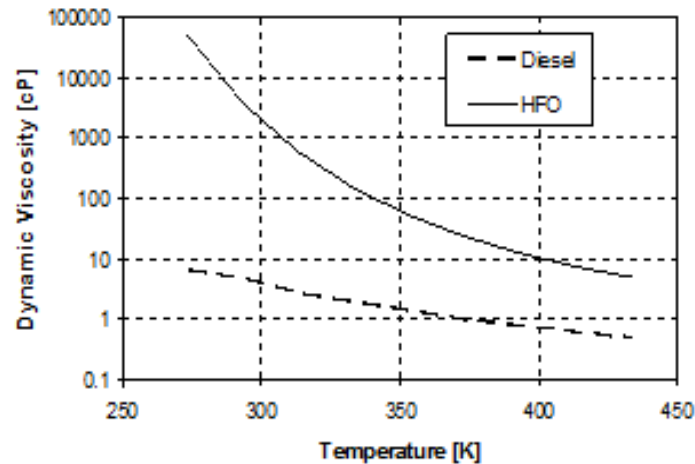
$$T_c = 189.8 + 450.6 * S + T_B * (0.4244 + 0.1174 * S) + \frac{14410 - 100688 * S}{T_B} \quad (1)$$

όπου S είναι η ειδική πυκνότητα (λόγος πυκνότητας προς την πυκνότητα του νερού σε θερμοκρασία 16 °C – αντιπροσωπευτική τιμή: 0.9537) και T_B το κανονικό (πίεση 1 atm) σημείο βρασμού του βαρέος κλάσματος (στην παρούσα Εργασία: 771.8 K). Από τη σχέση (1) υπολογίζεται η ακόλουθη τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας του HFO-residual: $T_c=928$ K. Για το καύσιμο diesel, χρησιμοποιείται για την κρίσιμη θερμοκρασία η τιμή $T_c=692$ K (Amsden, 1993).

Το ιξώδες ενός ρευστού είναι ένα μέτρο της αντίστασής του σε διάτμηση και ροή, διακρίνεται δε σε κινηματικό ιξώδες και δυναμικό ιξώδες. Το κινηματικό ιξώδες, με διαστάσεις [$L \cdot T^{-2}$], εκφράζεται συχνά σε cSt ($1 \text{ cSt} = 10^{-2} \frac{cm^2}{s}$). Ροή ενός καυσίμου επιτυγχάνεται για ιξώδες μικρότερο της τάξεως των 10^3 cSt, ενώ για τον ψεκασμό η ενδεικνύμενη τιμή είναι της τάξης των 20 cSt (Πανταζής, 2010). Το κινηματικό ιξώδες ενός υγρού είναι έντονα φθίνουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το καύσιμο HFO-residual εμφανίζεται ως μια κολλώδης και σχεδόν στερεή μάζα, ενώ το καύσιμο diesel είναι υγρό. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η εξάρτηση του δυναμικού ιξώδους των δύο καυσίμων από τη θερμοκρασία. Παρατηρείται ότι, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (περί τους 300 K), το καύσιμο HFO-residual έχει τιμή κινηματικού ιξώδους κατά δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του καυσίμου diesel. Η

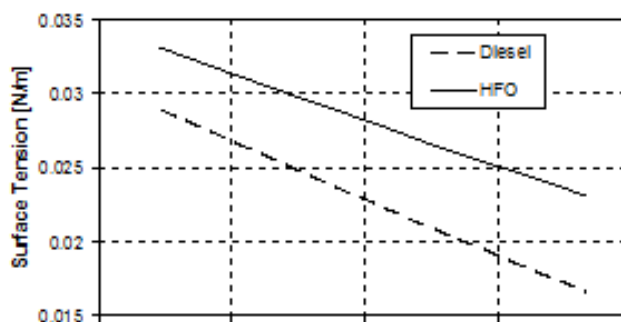
συγκεκριμένη διαφορά μικραίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο παραμένει άνω της μίας τάξης μεγέθους για θερμοκρασίες τάξης 400 K.



Εικόνα 4 Κινηματικό ιξώδες ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και για καύσιμο HFO-residual (πηγή: Κυριακίδης, 2009).

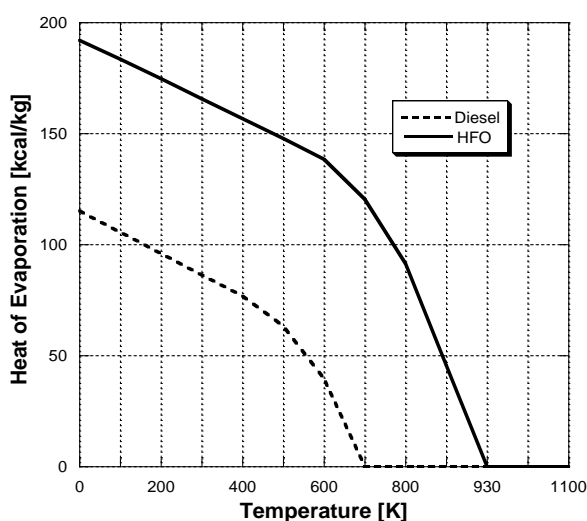
Η πυκνότητα εκφράζει τη μάζα της μονάδας του όγκου (kg/m^3 στο σύστημα SI). Η πυκνότητα επιδρά στη διάσπαση, ατμοποίηση και καύση του καυσίμου εντός του θαλάμου καύσης. Με την αύξηση της πυκνότητας ενός καυσίμου, απαιτείται περισσότερος χρόνος για να ολοκληρωθούν οι ανωτέρω διεργασίες. Συχνά γίνεται χρήση της ειδικής πυκνότητας (Specific Gravity – SG: λόγος της πυκνότητας του υγρού προς την πυκνότητα του νερού σε θερμοκρασία $16\text{ }^\circ\text{C}$) ή της πυκνότητας κατά API όπως προτάθηκε από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου ($^\circ\text{API} = (141.5 / \text{SG}_{15.6\text{ }^\circ\text{C}}) - 131.5$). Ενδεικτικές τιμές της πυκνότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι για το καύσιμο diesel: 900 kg/m^3 και για βαρύ καύσιμο: 990 kg/m^3 .

Ακολουθως, γίνεται αναφορά στην ιδιότητα της επιφανειακής τάσης ενός υγρού. Γενικά, με τον όρο επιφανειακή τάση περιγράφεται η τάση μιας επιφάνειας υγρού να αντιστέκεται σε εξωτερικά επιβάλλομενη δύναμη. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η εξάρτηση της επιφανειακής τάσης από τη θερμοκρασία για καύσιμο diesel και καύσιμο HFO-residual. Η αισθητά υψηλότερη τιμή της επιφανειακής τάσης του βαρέος κλάσματος (HFO-residual) από την αντίστοιχη του καυσίμου diesel, σε όλο το εξεταζόμενο εύρος θερμοκρασίας, οδηγεί στη δυσχερέστερη διάσπαση των spray καυσίμου HFO-residual, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα spray καυσίμου diesel.



Εικόνα 5 Επιφανειακή τάση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και για καύσιμο HFO-residual (Πηγή: Κυριακίδης, 2009).

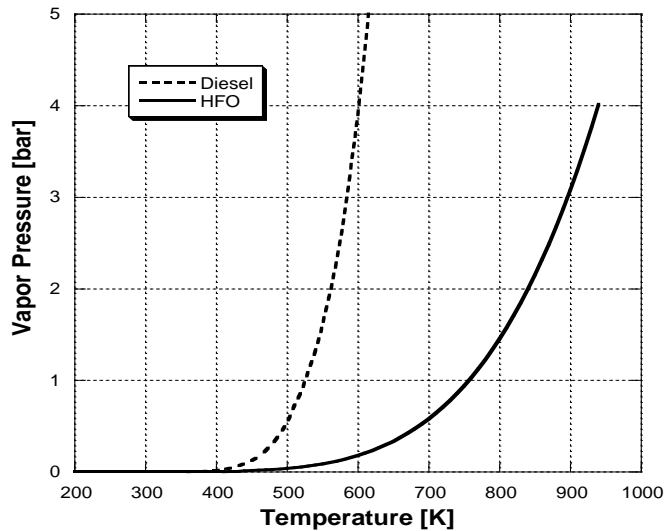
Για την πλήρη μελέτη του φαινομένου της ατμοποίησης, ουσιώδους σημασίας είναι η διαπραγμάτευση δύο ακόμα θερμοφυσικών ιδιοτήτων, της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης και της τάσης ατμών. Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (ενθαλπία εξάτμισης) αναφέρεται στο ποσό της αναγκαίας προσδιδόμενης θερμότητας για την πλήρη ατμοποίηση μοναδιαίας μάζας υγρού. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η καμπύλη εξάρτησης της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης από τη θερμοκρασία για καύσιμο HFO-residual και καύσιμο diesel. Για το καύσιμο HFO-residual, οι τιμές της καμπύλης προέκυψαν με βάση την καμπύλη στην Εργασία του Ν. Κυριακίδη (2009), και προεκβολή για υψηλότερες θερμοκρασίες, η οποία λαμβάνει υπόψη τη μορφή της αντίστοιχης καμπύλης του καυσίμου diesel. Οι καμπύλες της Εικόνας 6 δεικνύουν την αναγκαιότητα πρόσδοσης υψηλότερης ενέργειας για την εξάτμιση του βαρέος καυσίμου.



Εικόνα 6 Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και καύσιμο HFO-residual.

Η τάση ατμών ενός καυσίμου αναφέρεται στην πίεση που ασκεί η εξατμισμένη φάση ενός ρευστού στην υπάρχουσα υγρή φάση, όταν οι δύο φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία. Στην

Εικόνα 7 παρουσιάζεται η τάση ατμών (σε bar) για καύσιμο diesel και καύσιμο HFO-residual. Οι τιμές της τάσης ατμών του καυσίμου HFO-residual προέκυψαν εδώ ύστερα από κατάλληλη προσαρμογή της εξίσωσης Antoine (Σωτηρόπουλος, 1985) μέχρι το κανονικό σημείο βρασμού στα δεδομένα της Εργασίας του Ν. Κυριακίδη (2009), και προεκβολή της παραγόμενης καμπύλης έως το κρίσιμο σημείο. Καί στην Εικόνα 7 είναι εμφανής η χαρακτηριστική διαφορά των δύο καυσίμων, με το καύσιμο HFO-residual να απαιτεί για την ατμοποίησή του περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας έως και 350 K σε σχέση με τη θερμοκρασία ατμοποίησης του καυσίμου diesel, για την ίδια πίεση.



Εικόνα 7 Τάση ατμών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και καύσιμο HFO-residual.

Τέλος, δύο ακόμα σημαντικές θερμοφυσικές ιδιότητες είναι η θερμογόνος δύναμη και το σημείο ανάφλεξης του καυσίμου. Η θερμογόνος δύναμη εκφράζει την ενέργεια που εκλύεται από την πλήρη καύση συγκεκριμένης ποσότητας καυσίμου, και εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μάζα (στο σύστημα S.I.: J/kg). Ειδική προσοχή δίδεται στη διάκριση ανάμεσα στην ανώτερη και στην κατώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου. Ως ανώτερη θερμογόνος δύναμη ορίζεται η ενέργεια που αποδίδεται κατά την επαναφορά όλων των προϊόντων της καύσης στη θερμοκρασία των αντιδρώντων. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη ορίζεται ως η ανώτερη θερμογόνος δύναμη ελαττωμένη κατά την ενθαλπία εξάτμισης του νερού. Τυπικές τιμές της κατώτερης θερμογόνου δύναμης είναι για το καύσιμο diesel: 43400 kJ/kg και για το βαρύ καύσιμο: 41200 kJ/kg.

Τέλος, ως σημείο ανάφλεξης ορίζεται η ελάχιστη θερμοκρασία κατά την οποία το μίγμα ατμών εξατμισθέντος καυσίμου και οξειδωτικού μέσου οδηγείται σε ταχεία αντίδραση (καύση). Το σημείο ανάφλεξης παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο ασφαλούς αποθήκευσης ενός καυσίμου

αλλά και στη μελέτη της καύσης αυτού. Ο προσδιορισμός του σημείου ανάφλεξης ενός καυσίμου γίνεται βάσει του προτύπου ISO 2719.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού κλάσματος του καυσίμου μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας αυτές του δεκατετρανίου ($C_{14}H_{30}$) αφού προσεγγίζουν με αρκετά καλή ακρίβεια τις αντίστοιχες ιδιότητες του καυσίμου diesel. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος κλάσματος (HFO-residual) υπολογίζονται με βάση το μοντέλο θερμοφυσικών ιδιοτήτων της Διπλωματικής Εργασίας του Ν. Κυριακίδη (2009). Για καύσιμο δύο συστατικών, η τιμή της πυκνότητας, του κινηματικού ιξώδους και της επιφανειακής τάσης των σταγόνων του καυσίμου προκύπτει ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών του ελαφρού και του βαρέος κλάσματος. Η στάθμιση γίνεται βάσει του στιγμιαίου κλάσματος μάζας του ελαφρού συστατικού στο μίγμα (ξ), και η τιμή κάθε θερμοφυσικής ιδιότητας (F) προκύπτει άμεσα από τη σχέση (2):

$$[F]_{HFO} = \xi \cdot [F]_{C_{14}H_{30}} + (1 - \xi) \cdot [F]_{RES} \quad (2)$$

Η τιμή του μοριακού βάρους του μίγματος βαρέος καυσίμου (MW) προκύπτει με αντίστοιχο τρόπο. Εδώ, η στάθμιση γίνεται μέσω του μοριακού κλάσματος του κάθε συστατικού (x) στο μίγμα του καυσίμου, όπως παρουσιάζεται και στη σχέση 3:

$$[MW]_{HFO} = x \cdot [MW]_{C_{14}H_{30}} + (1 - x) \cdot [MW]_{RES} \quad (3)$$

2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση ροής και καύσης βαρέος καυσίμου

Ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένα βήματα για την αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου της ατμοποίησης ήταν η Διδακτορική Διατριβή του C.A. Varnavas (1994), που πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός μοντέλου ατμοποίησης σταγόνων spray καυσίμου σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα μοντέλο ατμοποίησης μηδενικής διάστασης (zero-dimensional model) σταγόνων καυσίμου, σε περιβάλλον με συνθήκες αντίστοιχες αυτών του κινητήρα diesel. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες της υγρής και της αέριας φάσης του καυσίμου υπολογίζονται ως συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και του είδους του καυσίμου. Για τον υπολογισμό της τάσης ατμών του καυσίμου γίνεται χρήση της μεθόδου Lee-Kesler (μέθοδος υπολογισμού της τάσης ατμών μέσω της ανηγμένης πίεσης και θερμοκρασίας (δηλαδή, των αδιαστατοποιημένων μεγεθών ως προς τα αντίστοιχα στο κρίσιμο σημείο) και του παράγοντα εκκεντρότητας (ποσοτικοποιεί την απόκλιση του σχήματος του μορίου από το σφαιρικό σχήμα)). Παράλληλα, μοντελοποιείται η επιβράδυνση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας λόγω ροής Stefan (επαγόμενη ροή ενός αερίου λόγω του ρυθμού εξάτμισης από τη διεπιφάνεια της σταγόνας και του αερίου), ενώ, για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας συνυπολογίζεται η ανακυκλοφορία και η αγωγιμότητα εντός της σταγόνας. Στην εργασία του Varnavas (1994), το αναπτυχθέν μοντέλο ατμοποίησης εισήχθη στον κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA, και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις ατμοποίησης μεμονωμένων σταγόνων και spray καυσίμου. Το χρησιμοποιηθέν εύρος θερμοκρασίας και πίεσης ήταν για τις μεμονωμένες σταγόνες 373-773 K και 0.1-10.3 MPa, ενώ για τα spray καυσίμου 573-773 K και 2.2-2.9 MPa. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, και διαπιστώθηκε καλή συμφωνία.

Αναφορικά με την έρευνα της έγχυσης και καύσης spray καυσίμου υψηλής πίεσης σε περιβάλλον θαλάμου σταθερού όγκου για συνθήκες αντιπροσωπευτικές ναυτικού κινητήρα Diesel, χαρακτηριστική είναι η εργασία των Goldsworthy et al. (2006). Στη συγκεκριμένη εργασία, αναπτύσσεται ένα απλοποιημένο μοντέλο ατμοποίησης και καύσης βαρέος ναυτικού καυσίμου για εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, και εισάγεται στον κώδικα Star-CD. Το καύσιμο θεωρείται ως μίγμα ενός βαρέος και ενός ελαφρού συστατικού. Για καθένα από τα δύο συστατικά ορίζεται διαφορετική τιμή του συντελεστή μεταφοράς μάζας (διάχυσης) στο οξειδωτικό μέσο. Το μοντέλο συνυπολογίζει τη θερμική αποσύνθεση των βαρύτερων μορίων του καυσίμου. Επιπλέον, η καμπύλη της τάσης ατμών για το κάθε συστατικό επιμερίζεται σε υποπεριοχές χαρακτηριζόμενες από γραμμική εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Η έναυση του

μίγματος βασίζεται στον υπολογισμό ενός χαρακτηριστικού χρόνου έναυσης, ο οποίος εξαρτάται από τρεις επιμέρους εκφράσεις χαρακτηριστικού χρόνου, οι οποίες είναι συναρτήσεις της τοπικής πίεσης και θερμοκρασίας. Το μοντέλο καύσης βασίζεται σε έναν χαρακτηριστικό χρόνο καύσης, ο οποίος προκύπτει ως άθροισμα του χαρακτηριστικού χρόνου χημείας (kinetic timescale) και του χαρακτηριστικού χρόνου τυρβώδους ανάμιξης καυσίμου - οξειδωτικού μέσου (turbulent mixing timescale). Οι προσομοιώσεις αφορούν στη ροή και καύση ναυτιλιακού καυσίμου καλής («good») και κακής («poor») ποιότητας, σε δύο θαλάμους καύσης σταθερού όγκου. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικά της βιβλιογραφίας, και εμφανίζουν ικανοποιητική ακρίβεια αναφορικά με την καθυστέρηση έναυσης, τον ρυθμό κατανάλωσης του καυσίμου και τη χωρική κατανομή του spray καυσίμου και της φλόγας.

Μια πιο λεπτομερής μοντελοποίηση των φαινομένων ροής και καύσης βαρέος καυσίμου παρουσιάζεται στις μελέτες των Struckmeier et al. (2009, 2010). Εκεί, εξετάζεται η χρήση του κλάσματος Light Cycle Oil (LCO) στο βαρύ καύσιμο, για χρήση εντός των περιοχών ECA, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς του σε θείο, ενώ μελετώνται οι επιπτώσεις της υψηλής περιεκτικότητάς του σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες στην καύση. Στις ανωτέρω δύο εργασίες παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα ροής και καύσης spray βαρέων ναυτιλιακών καυσίμων διαφορετικών ποιοτήτων σε δύο θαλάμους καύσης σταθερού όγκου αλλά και σε πρότυπο κινητήρα Diesel. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν το μήκος διεύθυνσης υγρής δέσμης καυσίμου στον θάλαμο καύσης σε μη αντιδρώσα ροή, καθώς και μελέτη της αντιδρώσας ροής. Επίσης, αναπτύσσονται περαιτέρω μοντέλα διάσπασης του spray, ατμοποίησης και καύσης του βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου. Καί σε αυτές τις εργασίες το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο μοντελοποιείται ως μίγμα ενός ελαφρού και ενός βαρέος συστατικού. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εμφανίζουν μεγάλη ακρίβεια με τα πειραματικά αποτελέσματα των ιδίων εργασιών (Struckmeier et al., 2009, 2010).

Για τη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών των βαρύτερων συστατικών (HFO-residual) του βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου και την επίδρασή τους στη ροή της δέσμης καυσίμου σε συνθήκες αντιπροσωπευτικές κινητήρα Diesel, ενδεικτική είναι η Διπλωματική Εργασία του Ν. Κυριακίδη (2009). Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε εκεί, υπολογίζονται λεπτομερώς οι θερμοφυσικές ιδιότητες ενός βαρέος κλάσματος καυσίμου. Το μοντέλο εισήχθη στον κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3, και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ροής του βαρέος κλάσματος, καθώς επίσης και καυσίμου diesel, σε θαλάμους σταθερού όγκου. Εν προκειμένω, χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της διάσπασης του spray τα μοντέλα E-TAB (Tanner et al., 1997) και USB (Chryssakis et al., 2008). Στα αποτελέσματα

περιλαμβάνονται το μήκος διείδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, καθώς και η χαρακτηριστική διάμετρος Sauter (Sauter Mean Diameter - SMD) για τα δύο καύσιμα.

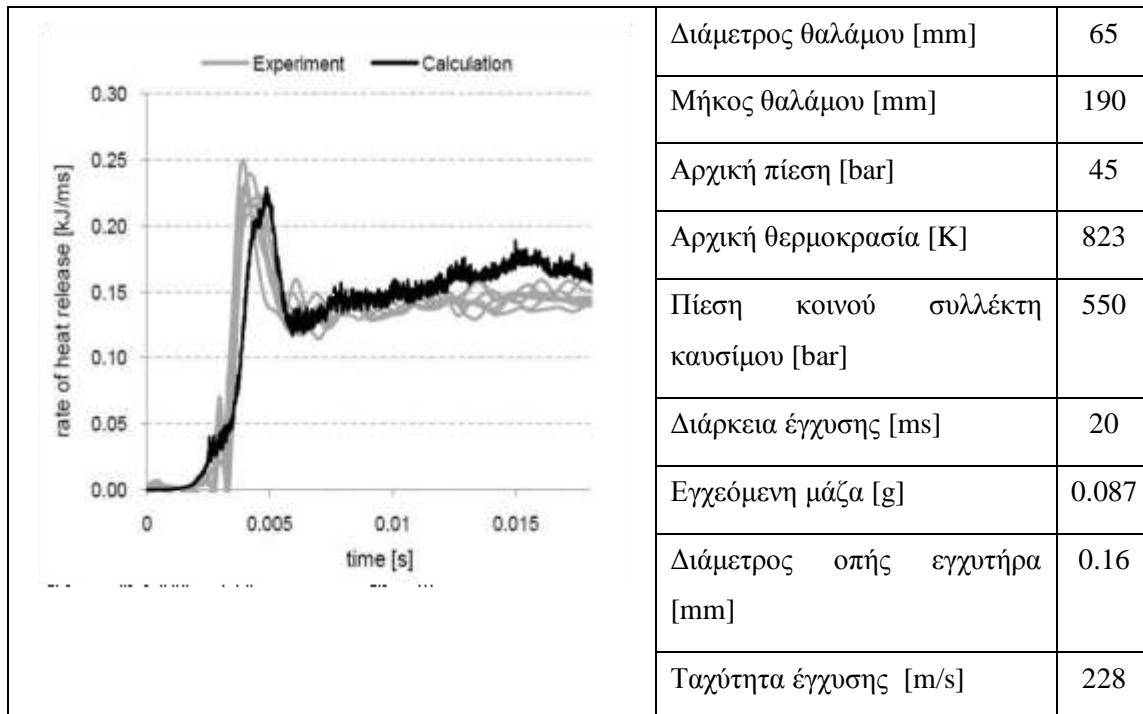
Στη συνέχεια, στη Διπλωματική εργασία του Κ. Πανταζή (2010), το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Ν. Κυριακίδη (2009) επεκτείνεται με την εισαγωγή ενός μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου δύο συστατικών. Εδώ, θεωρούνται διαφορετικές τιμές του προεκθετικού παράγοντα και της ενέργειας ενεργοποίησης της συνολικής αντίδρασης, για τα δύο συστατικά. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά των Struckmeier et al. (2009) αναφορικά με την καύση σε θαλάμους σταθερού όγκου.

Πειραματικές μελέτες αναφορικά με την επίδραση του τύπου του καυσίμου στα χαρακτηριστικά του spray παρουσιάζονται στην εργασία των Fink et al. (2008). Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται μετρήσεις σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου για δύο διαφορετικούς εγχυτήρες, για διάφορους συνδυασμούς πίεσης έγχυσης και πίεσης θαλάμου. Οι εγχυτήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν βαρέος τύπου, δηλαδή με διαστάσεις αντιπροσωπευτικές εγχυτήρων μεσόστροφων ναυτικών κινητήρων. Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: καύσιμο diesel (ως βάση σύγκρισης), βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο, καθώς και γαλάκτωμα νερού/diesel με περιεκτικότητα σε νερό 18% κατά μάζα. Τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής του spray που ποσοτικοποιούνται στην εργασία είναι το μήκος διείδυσης συναρτήσει του χρόνου, ο όγκος του spray, καθώς και η γωνία του κώνου του spray. Επιπλέον, παρουσιάζονται τιμές διαμέτρου Sauter και μετρήσεις ταχύτητας σταγονιδίων.

Πειραματικές μετρήσεις σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου για συνθήκες αντιπροσωπευτικές μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων παρουσιάζονται στις εργασίες των Herrmann et al. (2009, 2010, 2011). Τα πειράματα γίνονται σε μεγάλο θάλαμο καύσης, διαμέτρου 50 cm. Με οπτικοποίηση του ροϊκού πεδίου, μελετάται η μορφολογία του spray και η καύση. Εδώ, γίνεται οπτικοποίηση της μη αντιδρώσας ροής εντός του θαλάμου, σε συνθήκες υψηλής (900 K) και χαμηλής (400 K) θερμοκρασίας. Επιπλέον, μελετάται η επίδραση της εγκάρσιας συστροφής του αέρα (swirl) και της ποιότητας του καυσίμου στη ροή του spray. Συνολικά, οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν στα πειράματα ήταν η ένταση της εγκάρσιας συστροφής του αέρα, οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας εντός του θαλάμου, τα χαρακτηριστικά του εγχυτήρα (αριθμός, προσανατολισμός και διαμέτροι των οπών) και η ποιότητα του καυσίμου.

2.4 Πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία

Στην εργασία των Struckmeier et al. (2009) περιλαμβάνονται διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Rate Of Heat Release – ROHR) συναρτήσεως του χρόνου, με βάση πειράματα στον θάλαμο καύσης σταθερού όγκου “FIA” (Fuel Ignition Analyzer). Η εν λόγω συσκευή χρησιμοποιείται για την εξέταση της επίδρασης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υπό μελέτη καυσίμου στην ατμοποίηση και στην καύση αυτού. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα στον θάλαμο FIA (καμπύλη ROHR), μπορεί αρχικά το καύσιμο να χαρακτηριστεί ως «καλό» («good») ή «κακό» («poor»). Τα «καλά» καύσιμα εμφανίζουν μικρή καθυστέρηση έναυσης και καμπύλη ROHR χωρίς έντονες διακυμάνσεις (υψηλή επαναληψιμότητα). Αντίθετα, τα «κακά» καύσιμα, εμφανίζουν μεγάλη καθυστέρηση έναυσης και έντονες διακυμάνσεις της καμπύλης ROHR, σε διαφορετικά πειράματα. Ο θάλαμος καύσης FIA έχει κυλινδρική γεωμετρία, με διάμετρο 65 mm και μήκος 190 mm. Στα πειράματα των Struckmeier et al. (2009) χρησιμοποιήθηκε εγχυτήρας διαμέτρου 0.16 mm, τοποθετημένος στον άξονα συμμετρίας, στο ανώτερο σημείο του θαλάμου. Από τη μετρηθείσα χρονική μεταβολή της πίεσης προέκυψε ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, ο οποίος βρέθηκε σε καλή συμφωνία με υπολογισμούς Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, που επίσης έγιναν (βλ. Πίνακα 2).

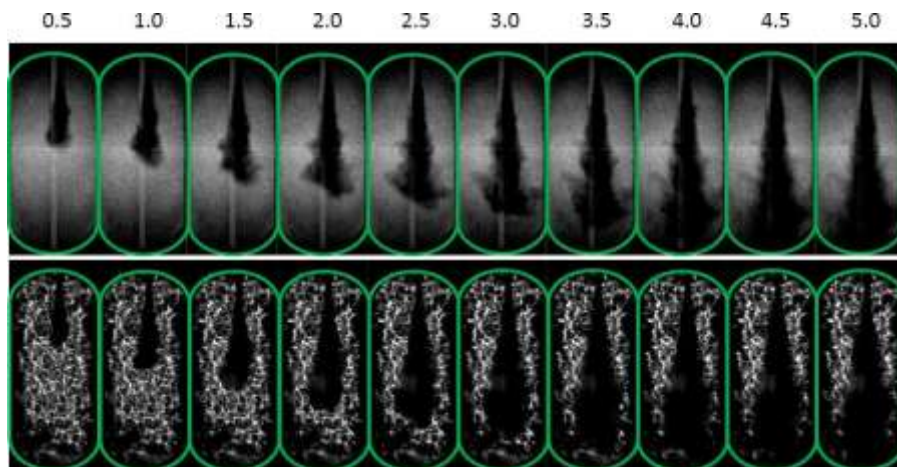


Πίνακας 2 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (ROHR) με βάση πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα της εργασίας των Struckmeier et al. (2009). Στον πίνακα παρουσιάζονται επίσης χαρακτηριστικά δεδομένα για τον θάλαμο καύσης FIA και το πείραμα.

Για την οπτικοποίηση φαινομένων ροής, ατμοποίησης και καύσης spray καυσίμου χρησιμοποιήθηκε στην εργασία των Struckmeier et al. (2009) η συσκευή “VCVCC” (Visual Constant Volume Combustion Chamber). Η συσκευή αποτελείται από έναν θάλαμο καύσης κυλινδρικής γεωμετρίας, διαμέτρου 150 mm και μήκους 350 mm (βλ. πίνακα 3 για περαιτέρω στοιχεία). Ο θάλαμος VCVCC φέρει δύο παράθυρα, επιτρέποντας την οπτικοποίηση των φαινομένων ροής και καύσης εντός αυτού. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της μη αντιδρώσας ροής του spray βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου στον θάλαμο VCVCC.

Διάμετρος θαλάμου [mm]	150
Μήκος θαλάμου [mm]	350
Αρχική πίεση [bar]	25
Αρχική θερμοκρασία [K]	873
Πίεση κοινού συλλέκτη καυσίμου [bar]	700
Διάρκεια έγχυσης [ms]	25
Εγγεόμενη μάζα [g]	0.124
Διάμετρος οπής εγχυτήρα [mm]	0.16
Ταχύτητα έγχυσης [m/s]	259

Πίνακας 3 Γεωμετρικά δεδομένα του θαλάμου VCVCC και και χαρακτηριστικά στοιχεία για τα πειράματα των Struckmeier et al. (2009).



Εικόνα 8 Οπτικοποίηση του spray βαρέος καυσίμου στον θάλαμο VCVCC (Struckmeier et al., 2009). Οι σημειούμενες τιμές χρόνου (σε ms) είναι σε σχέση με την αρχή της έγχυσης.

Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση εξάτμισης και καύσης βαρέος καυσίμου

3.1 Ο κώδικας KIVA-3

Η ανάγκη για αξιόπιστη προσομοίωση των φαινομένων ροής και καύσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης οδήγησε στην ανάπτυξη σχετικών κωδίκων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Διεθνώς, ο κώδικας KIVA έχει τύχει ευρείας αποδοχής και περαιτέρω εξέλιξης από την ερευνητική αλλά και τη βιομηχανική κοινότητα. Ο κώδικας έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Εργαστήριο «Los Alamos» των Ηνωμένων Πολιτειών, με την πρώτη του έκδοση να χρονολογείται στο 1985. Αρχικά, αναφέρθηκαν αδυναμίες αριθμητικής σύγκλισης σε προβλήματα ροής σε περίπλοκες γεωμετρίες όπως αυτές σε προθαλάμους των κινητήρων Diesel.

Η αντικατάσταση της πρώτης έκδοσης του υπολογιστικού πακέτου KIVA έγινε από τη βελτιωμένη έκδοσή του, τον κώδικα KIVA-2, το 1989. Η δεύτερη έκδοση του κώδικα συνοδεύεται από τη δυνατότητα βελτιωμένων υπολογισμών του spray καυσίμου, καθώς και από τη δυνατότητα υπολογισμών για ανοιχτούς όγκους ελέγχου (συνυπολογισμός της παροχής από/προς βαλβίδες και θυρίδες). Περαιτέρω βελτιώσεις εισήχθησαν στην τρίτη έκδοση (κώδικας KIVA-3, βλ. Amsden, 1993).

Μεγάλο πλεονέκτημα του κώδικα KIVA αποτελεί το γεγονός ότι είναι «ανοιχτός». Συγκεκριμένα, ο χρήστης μπορεί να επέμβει στον πηγαίο κώδικα, γεγονός που διευκολύνει την εισαγωγή νέων φυσικών μοντέλων (όπως στην παρούσα εργασία). Ο κώδικας συνοδεύεται από λογισμικό προ-επεξεργασίας (δημιουργία αριθμητικών πλεγμάτων) και μετ-επεξεργασίας (μερική ανάλυση των αποτελεσμάτων).

3.2 Μοντελοποίηση ατμοποίησης και καύσης μονοσυστατικού καυσίμου

Ο κώδικας KIVA-3 παρέχει τη δυνατότητα για την εισαγωγή θερμοφυσικών ιδιοτήτων του καυσίμου με τη μορφή πινάκων συναρτήσει της θερμοκρασίας. Έτσι, μπορεί να διορθωθεί η υπάρχουσα βάση δεδομένων, και να επεκταθεί για διαφορετικά καύσιμα. Για τη μοντελοποίηση της διάσπασης του spray καυσίμου, της εξάτμισης και της καύσης, χρησιμοποιούνται επιμέρους φυσικά μοντέλα, στα οποία υπεισέρχονται οι θερμοφυσικές ιδιότητες του καυσίμου: ενθαλπία, ενθαλπία εξάτμισης, πυκνότητα, τάση ατμών, επιφανειακή τάση και ιξώδες. Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας του Ν. Κυριακίδη (2009), αναπτύχθηκε μοντέλο θερμοφυσικών

ιδιοτήτων βαρέος κλάσματος πετρελαίου, και εισήχθησαν αντίστοιχοι πίνακες στη βάση δεδομένων του κώδικα KIVA-3.

Στην παρούσα εργασία, η μοντελοποίηση της διάσπασης του spray καυσίμου γίνεται με χρήση του μοντέλου E-TAB (Enhanced Taylor Analogy Breakup model), το οποίο αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου TAB (Taylor Analogy Breakup model). Το τελευταίο προτάθηκε από τους O'Rourke & Amsden (1987). Στο μοντέλο TAB, η δυναμική της σταγόνας καυσίμου αντιστοιχίζεται στη δυναμική ενός αρμονικού ταλαντωτή (μάζα-ελατήριο-αποσβεστήρας): η διέγερση αντιστοιχεί στις αεροδυναμικές δυνάμεις από την αέρια φάση, η δύναμη επαναφοράς στις δυνάμεις λόγω επιφανειακής τάσης, και η δύναμη απόσβεσης στις εσωτερικές δυνάμεις τριβής (ιξώδους). Το μοντέλο θεωρεί ότι μια σταγόνα διασπάται όταν η ανηγμένη παραμόρφωση υπερβεί μια οριακή τιμή. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε από τον Tanner (1997) μια βελτιωμένη εκδοχή του μοντέλου TAB (μοντέλο E-TAB). Στο μοντέλο E-TAB λαμβάνεται υπόψη (σε αντιστοιχία με πειραματικά δεδομένα) η δυνατότητα περίπλοκης διάσπασης μιας σταγόνας καυσίμου σε μεγάλες ταχύτητες: σακουλοειδής διάσπαση (bag breakup) και διάσπαση αποσύνθεσης (stripping breakup). Εν προκειμένω, το κριτήριο είναι η τιμή του λόγου των αεροδυναμικών δυνάμεων προς τις δυνάμεις λόγω της επιφανειακής τάσης, ο οποίος εκφράζεται από τον αδιάστατο αριθμό Weber ($We_D = \frac{\rho_g d_o u_0^2}{\sigma}$, όπου d_o και u_0 η αρχική διάμετρος και η ταχύτητα της σταγόνας, αντίστοιχα, σ η επιφανειακή τάση του υγρού, και ρ_g η πυκνότητα του περιβάλλοντος αερίου).

Η μοντελοποίηση της διεργασίας ατμοποίησης σταγόνας υγρού βασίζεται σε ισοζύγια θερμότητας και μάζας, βλ. Baumgarten (2006). Αμελώντας την ισχύ υπερθέρμανσης του προκύπτοντος ατμού μέχρι τη θερμοκρασία εκτός του θερμικού οριακού στρώματος, η προσδιδόμενη θερμική ισχύς στη σταγόνα είναι:

$$\dot{Q}_{drop} = \dot{Q}_{heating} + \dot{Q}_{evap} \quad (4)$$

όπου ο όρος $\dot{Q}_{heating}$ αντιστοιχεί στη θερμική ισχύ θέρμανσης της υγρής φάσης, ενώ ο όρος \dot{Q}_{evap} αντιστοιχεί στην ισχύ ατμοποίησης της εξατμιζόμενης παροχής μάζας του υγρού. Συγκεκριμένα:

$$\dot{Q}_{evap} = \Delta h_{evap} \frac{dm_{evap}}{dt} \quad (5a)$$

$$\dot{Q}_{heating} = m_{drop} c_p \frac{dT}{dt} \quad (5b)$$

όπου m_{drop} η μάζα, c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα, Δh_{evap} η ενθαλπία εξάτμισης και $\frac{dm_{evap}}{dt}$ η εξατμιζόμενη παροχή του υγρού. Η τελευταία υπολογίζεται από τη σχέση (Glassman (1996), Turns (1996)):

$$\frac{dm_{evap}}{dt} = 2\pi R Sh \rho D \ln(1+B) \quad (6)$$

στην οποία Sh είναι ο αδιάστατος αριθμός Sherwood (Sherwood number) της ροής γύρω από σφαιρική σταγόνα ($Sh = \frac{h_m L}{D}$), όπου h_m ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, ρ η πυκνότητα της υγρής σταγόνας, D ο συντελεστής διάχυσης μάζας, R η ακτίνα της σταγόνας και B ένας αδιάστατος «αριθμός μεταφοράς» (B transfer number):

$$B = \frac{Y_{F,R} - Y_{F,\infty}}{1 - Y_{F,R}} \quad (7)$$

όπου $Y_{F,R}$ και $Y_{F,\infty}$ το κλάσμα μάζας του καυσίμου στην επιφάνεια της σταγόνας και έξω από το οριακό στρώμα, αντίστοιχα. Η τιμή του αριθμού Sherwood υπολογίζεται με βάση πειραματικά δεδομένα, ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds και του αριθμού Schmidt του περιβάλλοντος αερίου (βλ. Amsden, 1993).

Συνυπολογίζοντας την υπερθέρμανση του εξατμιζόμενου καυσίμου, το συνολικό ποσό προσδιδόμενης θερμικής ισχύος στη σταγόνα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{drop} = \lambda_g \pi d_{drop} (T_\infty - T_R) \frac{\zeta}{e^{\zeta} - 1} \overline{Nu} \quad (8)$$

όπου λ_g η θερμική αγωγιμότητα του αέρα κοντά στην επιφάνεια της σταγόνας, d_{drop} η διάμετρος της σταγόνας, T_∞ η θερμοκρασία του αέρα έξω από το οριακό στρώμα, T_R η θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια της σταγόνας, και ζ ένας αδιάστατος διορθωτικός συντελεστής μέσω του οποίου συνυπολογίζεται η υπερθέρμανση του εξατμιζόμενου καυσίμου από τη θερμοκρασία T_R στη θερμοκρασία T_∞ :

$$\zeta = \frac{\dot{m}_{evap} c_{p,vap}}{\overline{Nu} \lambda_g \pi d_{drop}} \quad (9)$$

με $c_{p,var}$ την ειδική θερμοχωρητικότητα του περιβάλλοντος αερίου. Πρακτικά, ο παράγοντας ζ εκφράζει την υπερθέρμανση του παραγόμενου ατμού από τη θερμοκρασία T_R στη θερμοκρασία T_∞ . Για την ακριβή μοντελοποίηση της εξάτμισης, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί με ακρίβεια η τιμή του αριθμού Nusselt, \overline{Nu} :

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha d_{drop}}{\lambda_g} \quad (10)$$

όπου α ο συντελεστής συναγωγής. Κατά την εκτέλεση του κώδικα, σε κάθε χρονικό βήμα, προκύπτει από τα παραπάνω ισοζύγια ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας της υγρής φάσης, dT/dt , και με αριθμητική ολοκλήρωση η αντίστοιχη θερμοκρασία στο επόμενο χρονικό βήμα.

Στην παρούσα εργασία, η μοντελοποίηση της έναυσης γίνεται με χρήση μιας κατάλληλης μεταβλητής «προόδου της έναυσης» (“ignition progress variable”), που εκφράζει τον λόγο της στιγμιαίας συγκέντρωσης μιας επιλεγμένης ελεύθερης ρίζας προς την κρίσιμη συγκέντρωση αυτής (Weisser, 1998). Το κριτήριο της έναυσης είναι η επίτευξη τιμής μεγαλύτερης ή ίσης του 1.0 για τον παραπάνω λόγο. Η αδιάστατη μεταβλητή «προόδου της έναυσης» προκύπτει από την επίλυση μιας σχετικής διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς, στην οποία η κινητική των αρχικών αντιδράσεων (ignition chemistry) επηρεάζει τον όρο πηγής (Weisser, 1998). Έτσι, η ακρίβεια της μοντελοποίησης της εξάτμισης επιδρά έμμεσα στην καθυστέρηση έναυσης, επειδή επηρεάζει τις τοπικές τιμές του λογου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα.

Για τη μοντελοποίηση της καύσης, χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ένα τροποποιημένο μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου, βλ. Pantazis et al. (2010), το οποίο βασίζεται στο αρχικό μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου των Kong et al. (1995). Εδώ, υπολογίζονται αρχικά οι συγκεντρώσεις κάθε συστατικού (καύσιμο, O_2 , N_2 , CO_2 , H_2 , H_2O και CO) σε κατάσταση χημικής ισορροπίας. Ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης ενός συστατικού δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dY_m}{dt} = -\frac{Y_m - Y_m^{eq}}{\tau_{comb}} \quad (11)$$

όπου Y_m και Y_m^{eq} αντιπροσωπεύουν για ένα συστατικό m τη στιγμιαία συγκέντρωση και τη συγκέντρωση σε κατάσταση χημικής ισορροπίας, αντίστοιχα. Επίσης, τ_{comb} είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος καύσης, ο οποίος υπολογίζεται ως το άθροισμα των χαρακτηριστικών χρόνων τ_{lam} (επίδραση της χημείας) και τ_{urb} (επίδραση της τυρβώδους ανάμιξης καυσίμου - οξειδωτικού μέσου):

$$\tau_{comb} = \tau_{lam} + f \cdot \tau_{turb} \quad (12)$$

Στη σχέση (12), ο παράγοντας f λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$. Οι ακραίες τιμές του διαστήματος αντιστοιχούν σε καύση προανάμιξης και διάχυσης. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας f υπολογίζεται από τη σχέση (Kong et al., 1995):

$$f = \frac{1-e^{-r}}{0.632} \quad (13)$$

όπου ο παράγοντας r εκφράζει τον τοπικό λόγο της μάζας των προϊόντων προς τη μάζα των αντιδρώντων:

$$r = \frac{Y_{CO_2} + Y_{H_2O} + Y_{CO} + Y_{H_2}}{1 - Y_{N_2}} \quad (14)$$

Ο χαρακτηριστικός χρόνος τ_{lam} υπολογίζεται με βάση τη σχέση (15), η οποία έχει προκύψει από πειραματικά δεδομένα των Bergeron et al. (1989):

$$\tau_{lam} = A^{-1} [C_n H_{2n+2}]^{0.75} [O_2]^{-1.5} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (15)$$

Αντίστοιχα, ο ρυθμός της συνολικής αντίδρασης θα είναι:

$$RATE = A [C_n H_{2n+2}]^{0.25} [O_2]^{1.5} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (16)$$

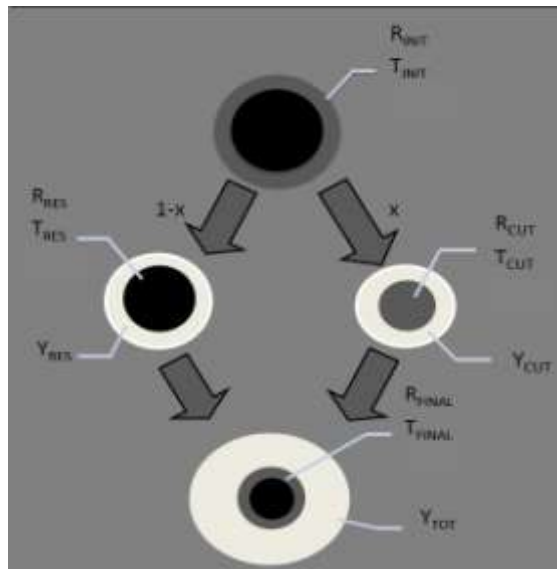
Ο χαρακτηριστικός χρόνος τ_{turb} υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tau_{turb} = C_{m2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (17)$$

Στις σχέσεις (15)-(17), E είναι η ενέργεια ενεργοποίησης (activation energy), R η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T η απόλυτη θερμοκρασία, A ο προεκθετικός παράγοντας (pre-exponential factor), k η κινητική ενέργεια της τύρβης (ανά μονάδα μάζας), ε ο ρυθμός σκέδασής της, και C_{m2} μια σταθερά του μοντέλου τύρβης k - ε .

3.3 Μοντελοποίηση ατμοποίησης και καύσης βαρέος καυσίμου δύο συστατικών

Στην παρούσα εργασία, το βαρύ καύσιμο θεωρείται ως μίγμα δύο συστατικών, ενός ελαφρού και ενός βαρέος. Τα δύο συστατικά του μίγματος θεωρούνται ομοιόμορφα κατανεμημένα στον όγκο μιας σταγόνας του καυσίμου. Στο παρόν μοντέλο, υπολογίζονται αρχικά οι αδιάστατοι αριθμοί Re_D και Sh . Στη συνέχεια, θεωρούνται δύο εικονικές μονοσυστατικές σταγόνες. Για την περιγραφή της εξάτμισης, η θεωρούμενη επιφάνεια καθεμίας εκ των δύο ισούται με την επιφάνεια της αρχικής σταγόνας πολλαπλασιασμένη με το αντίστοιχο κλάσμα μάζας. Για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης από καθεμία εκ των δύο σταγόνων, υπολογίζεται αρχικά η μεταφερόμενη θερμική ισχύς για την αρχική (δύο συστατικών) σταγόνα, και διορθώνεται για τις επιμέρους σταγόνες πολλαπλασιάζοντας με το αντίστοιχο κλάσμα μάζας. Κατά τη διάρκεια ενός αριθμητικού χρονικού βήματος, κάθε μονοσυστατική σταγόνα χάνει ένα τμήμα της μάζας της, το οποίο λογίζεται πλέον ως αύξηση της μάζας του ατμοποιηθέντος καυσίμου. Η εναπομένουσα υγρή φάση των δύο μονοσυστατικών σταγόνων επανασυντίθεται σε μία νέα σταγόνα. Όπως γίνεται αντιληπτό, η διαδικασία αυτή οδηγεί σε ταχεία μείωση του ποσοστού του ελαφρού συστατικού στο μίγμα της σταγόνας βαρέος καυσίμου. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση του παρόντος μοντέλου εξάτμισης:



Εικόνα 9 Σχηματική αναπαράσταση του παρόντος μοντέλου εξάτμισης σταγόνας βαρέος καυσίμου δύο συστατικών.

Όπως προαναφέρθηκε, η ακρίβεια της μοντελοποίησης της εξάτμισης σταγόνας καυσίμου εξαρτάται σημαντικά από την ακρίβεια στον υπολογισμό του αριθμού Nusselt (ροή

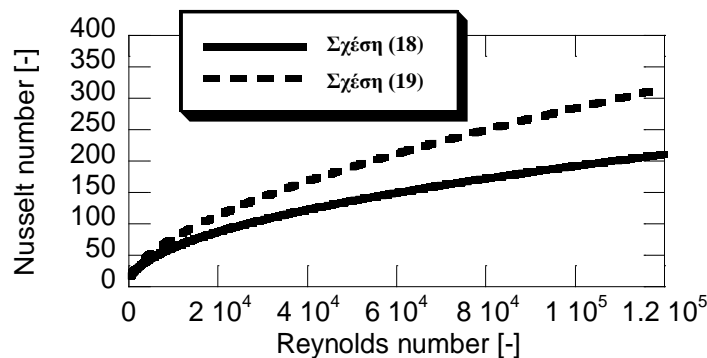
γύρω από σφαίρα). Μέχρι σήμερα, ήταν σύνηθες να γίνεται ο υπολογισμός της τιμής του αριθμού Nusselt, για εφαρμογές κινητήρων Diesel, με χρήση της σχέσης των Ranz & Marshall (1952):

$$\overline{Nu} = 2 + 0.6Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \quad (18)$$

όπου Pr ο αριθμός Prandtl της αέριας φάσης. Η σχέση (18) έχει προκύψει από την ανάλυση πειραματικών δεδομένων για σταγόνες που βρίσκονται σε ελεύθερη πτώση σε αέριο μέσο που ηρεμεί (χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds). Σε εφαρμογές έγχυσης καυσίμου, οι αντίστοιχες τιμές του αριθμού Reynolds (Re_D) είναι υψηλές. Για την αντίστοιχη περιοχή τιμών, ενδείκνυται η χρήση της σχέσης του Whitaker (1972):

$$\overline{Nu} = 2 + \left(0.4Re_D^{1/2} + 0.06Re_D^{2/3}\right) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{1/4}, \text{ για } 3.5 < Re_D < 7.6 \cdot 10^4 \quad (19)$$

Στη Σχέση (19), μ , μ_s είναι το δυναμικό ιξώδες του αέρα στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και στη θερμοκρασία της επιφάνειας της σταγόνας, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζονται οι τιμές \overline{Nu} συναρτήσει των τιμών Re_D , βάσει των σχέσεων (18) και (19). Εδώ, οι τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα διατηρούνται σταθερές, και αντιστοιχούν σε τυπικές συνθήκες ναυτικών κινητήρων Diesel στην περιοχή του Άνω Νεκρού Σημείου. Οι διαφορές στις τιμές \overline{Nu} είναι μη αμελητέες για τιμές Re_D μεγαλύτερες από περίπου 10^4 . Επειδή σε εφαρμογές ναυτικών κινητήρων οι τιμές Re_D κυμαίνονται από 20,000 έως 120,000 (Chryssakis & Kaiktsis, 2008), είναι ορθό να γίνεται χρήση της σχέσης (19).



Εικόνα 10 Αριθμός Nusselt στη ροή αέρα γύρω από σφαιρικό σταγονίδιο συναρτήσει του αριθμού Reynolds, όπως υπολογίζεται από τη χρήση των σχέσεων (18) και (19).

Για την ακριβέστερη μοντελοποίηση της ανάμιξης καυσίμου και οξειδωτικού μέσου, στην παρούσα εργασία το μοντέλο καύσης δύο συστατικών (Πανταζής, 2010) επεκτείνεται, τροποποιώντας τον τρόπο υπολογισμού της σταθεράς C_{m22} , που επιδρά στον χαρακτηριστικό χρόνο τυρβώδους ανάμιξης (βλ. σχέση 17). Επειδή το μοντέλο ατμοποίησης καυσίμου δύο συστατικών προβλέπει την ταυτόχρονη παρουσία ατμών ελαφρού και βαρέος συστατικού, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ενδεχόμενη διαφορετικότητα στον ρυθμό ανάμιξης καθενός εξ' αυτών με τον αέρα. Έτσι, η σταθερά C_{m22} υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα επιμέρους σταθερών που εδώ εισάγονται. Η στάθμιση γίνεται με το κλάσμα μάζας καθενός συστατικού στο αέριο μίγμα καυσίμου:

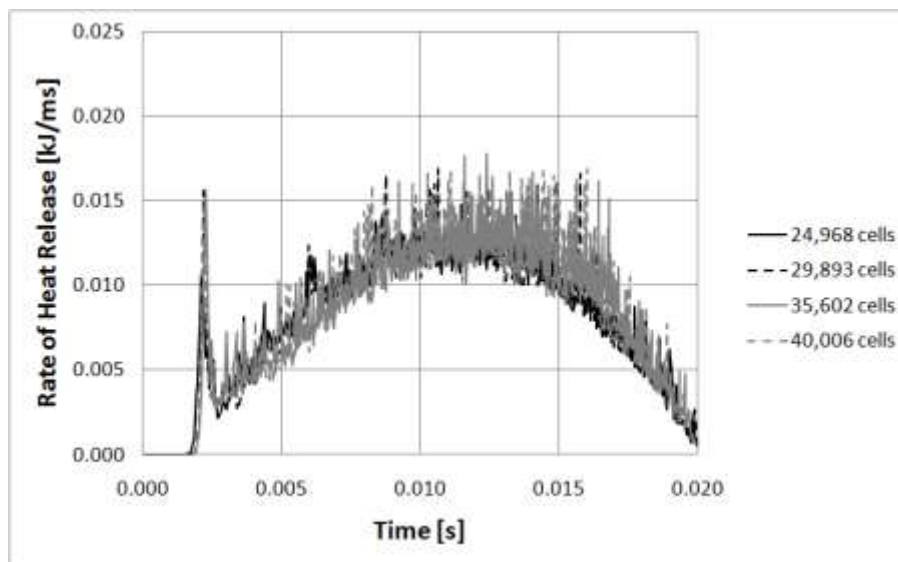
$$C_{m2} = \xi_{comb} C_{m21} + (1 - \xi_{comb}) C_{m22} \quad (20)$$

όπου C_{m21} και C_{m22} είναι οι νέες σταθερές του μοντέλου, και ξ_{comb} το κλάσμα μάζας του ελαφρού συστατικού στο αέριο μίγμα καυσίμου.

Κεφάλαιο 4: Υπολογιστικά αποτελέσματα

4.1 Ρύθμιση παραμέτρων του νέου μοντέλου

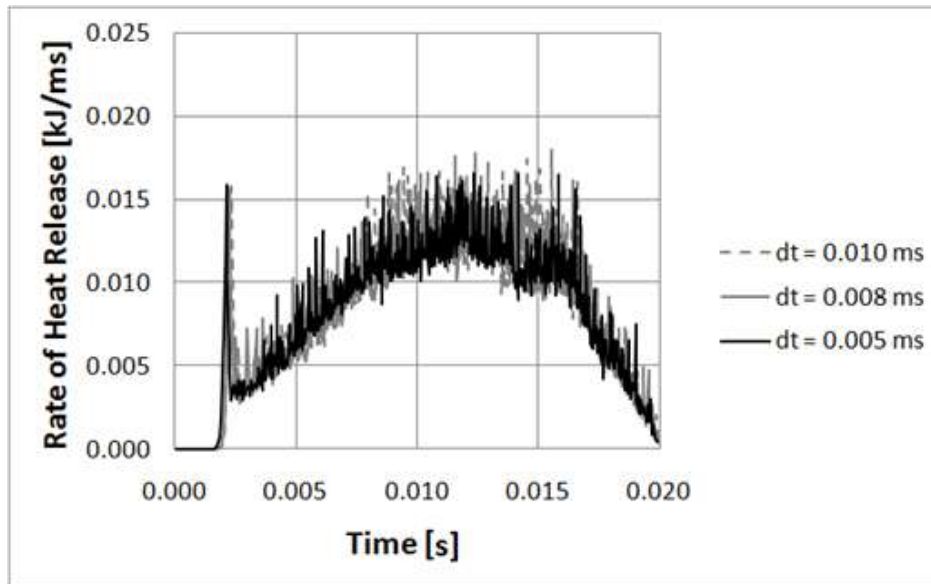
Σε κάθε μελέτη με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής πρέπει να γίνεται κατάλληλος έλεγχος, ώστε τα τελικά αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα από: (α) την πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος, και (β) την αριθμητική τιμή του χρονικού βήματος. Για τη γεωμετρία θαλάμου FIA η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό πλέγμα έγινε μέσω προσομοιώσεων σε ολοένα πυκνότερα πλέγματα, με τον αριθμό των κελιών να κυμαίνεται από 24968 σε 40006. Στις προσομοιώσεις, χρησιμοποιήθηκε βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο περιεκτικότητας 20% σε ελαφρύ συστατικό. Οι τιμές των σταθερών του μοντέλου καύσης ρυθμίστηκαν ως εξής: για το ελαφρύ συστατικό, $A=2.0 \cdot 10^9$, $E=95.7$ kJ/mol, για το βαρύ συστατικό $A=3.0 \cdot 10^{10}$, $E=129.0$ kJ/mol (Pantazis et al., 2010), ενώ οι τιμές των σταθερών της σχέσης (20) ήταν $C_{m21} = 0.2$ και $C_{m22} = 0.2$. Η προβλεπόμενη χρονική ιστορία του Ρυθμού Έκλυσης Θερμότητας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 11, καταδεικνύει την ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το υπολογιστικό πλέγμα για τα πλέον πυκνά πλέγματα.



Εικόνα 11 Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος: Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$.

Αντίστοιχα, για τον έλεγχο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο χρονικό βήμα (time step) δοκιμάστηκαν 3 διαφορετικές τιμές: 0.010 ms, 0.008 ms και 0.005 ms σε πλέγμα 29893 κελιών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν (βλ. Εικόνα 12 για τη χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας) πρακτικά συμπίπτουν για τις τρεις τιμές

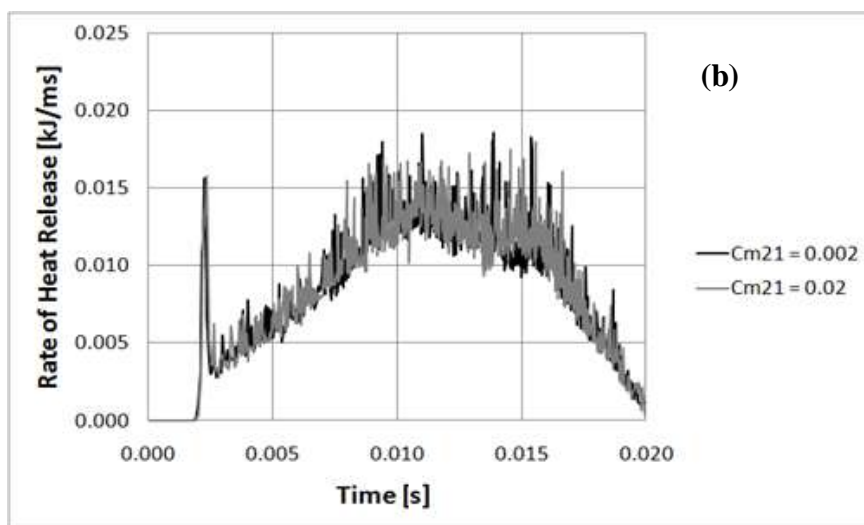
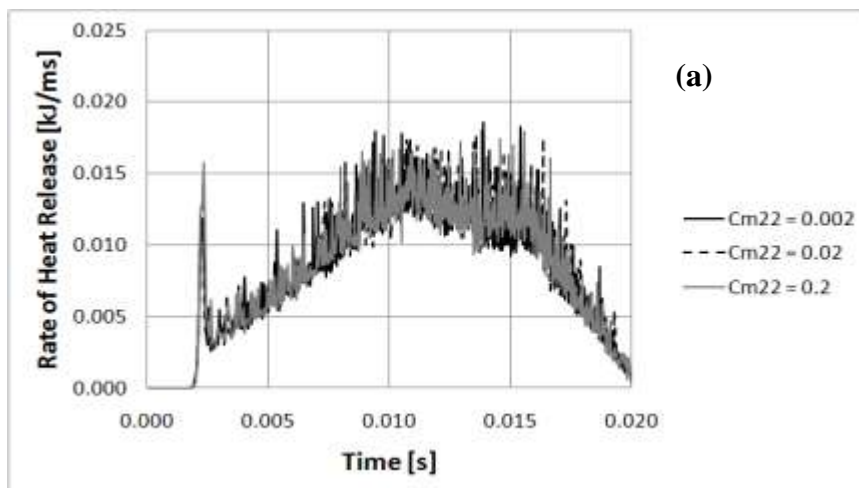
χρονικού βήματος που εδώ χρησιμοποιήθηκαν. Η μορφή της καμπύλης ROHR του σχήματος 12 είναι ποιοτικά όμοια με αυτή των πειραματικών αποτελεσμάτων των Struckmeier et al. (2009) (βλ. πίνακα 2).



Εικόνα 12 Μελέτη ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων από το χρησιμοποιούμενο χρονικό βήμα (time step): Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$.

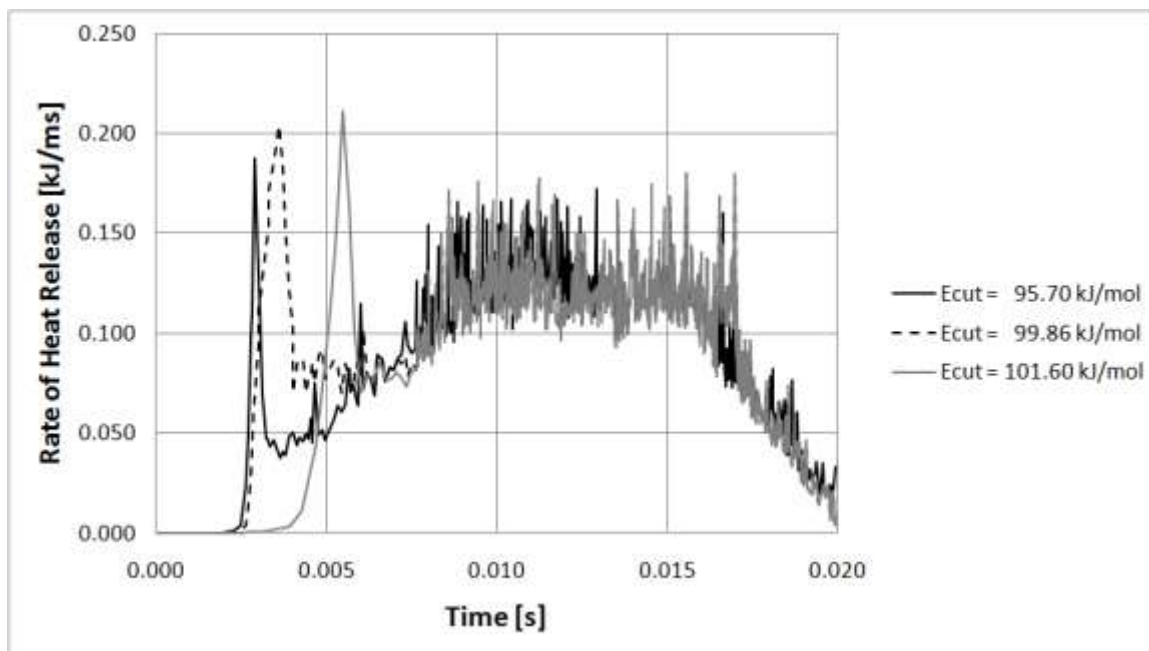
Στο πλαίσιο της παρούσας μοντελοποίησης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός κατάλληλων τιμών για τις έξι σταθερές του τροποποιημένου μοντέλου καύσης: σταθερές C_{m21} και C_{m22} , ενέργειες ενεργοποίησης (E_{CUT} και E_{RES}) προεκθετικοί παράγοντες (A_{CUT} και A_{RES}), του ελαφρού και του βαρέος συστατικού, αντίστοιχα. Ο εν λόγω προσδιορισμός γίνεται εδώ με βάση τα πειραματικά δεδομένα των Struckmeier et al. (2009) για τον θάλαμο καύσης FIA. Οι προσομοιώσεις που έγιναν αντιστοιχούν σε βαρύ καύσιμο περιεκτικότητας 20% σε ελαφρύ συστατικό, με χρήση του πλέγματος των 29893 κελιών και χρονικού βήματος 0.008 ms.

Στην Εικόνα 13(a) παρουσιάζεται η επίδραση των διαφορετικών τιμών της σταθεράς C_{m22} επί της χρονικής ιστορίας του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, για σταθερή τιμή $C_{m21}=0.2$. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 13(b) παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή για μεταβλητό C_{m21} , για σταθερή τιμή $C_{m22}=0.2$. Παρατηρείται ότι, καί στις δύο περιπτώσεις, η επίδραση της μεταβολής των σταθερών C_{m21} και C_{m22} στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας είναι περιορισμένη. Τελικά, επιλέγονται για όλες τις επόμενες προσομοιώσεις οι τιμές $C_{m21}=0.2$, $C_{m22}=0.2$.



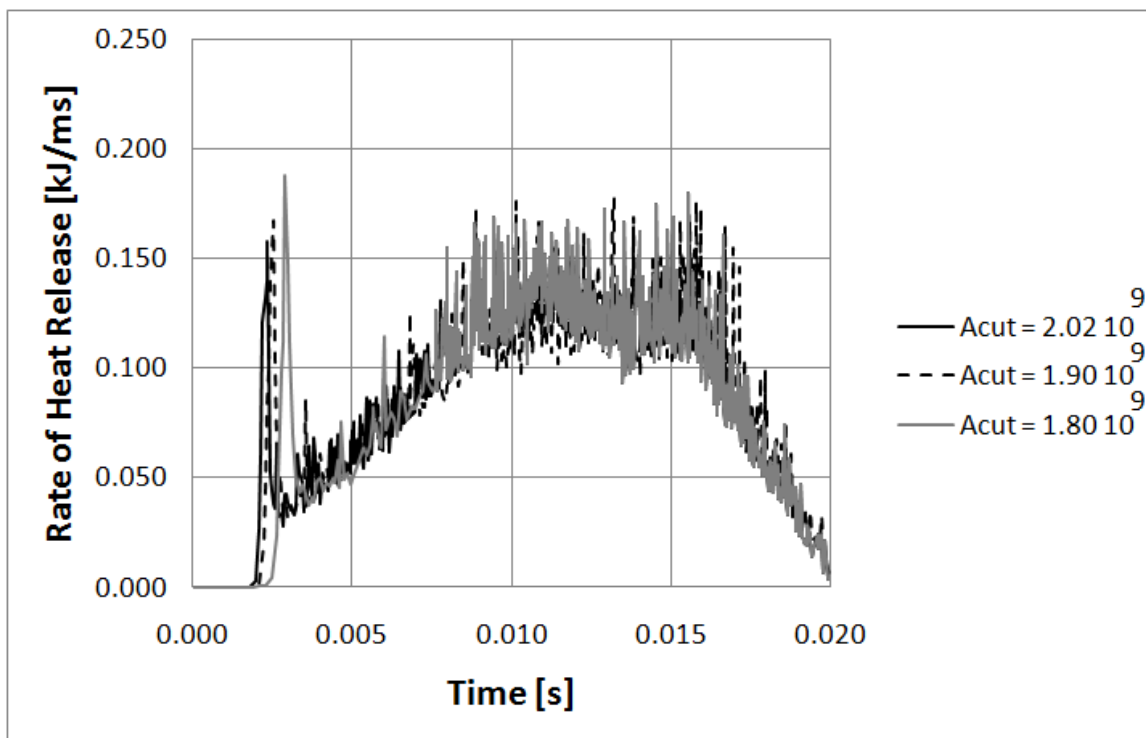
Εικόνα 13 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$. (a) Μεταβολή της σταθεράς C_{m22} , για $C_{m21}=0.2$. (b) Μεταβολή της σταθεράς C_{m21} , για $C_{m22}=0.2$.

Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των μεταβλητών: $C_{m21}=0.2$ και $C_{m22}=0.2$, $A_{CUT}=2.0 \cdot 10^9$ και $A_{RES}=3.0 \cdot 10^{10}$, $E_{RES}=129.0$ kJ/mol, δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές τιμές της ενέργειας ενεργοποίησης του ελαφρού συστατικού ($E_{CUT}=95.70$ kJ/mol, $E_{CUT}=99.86$ kJ/mol και $E_{CUT}=101.60$ kJ/mol). Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται διαγράμματα του ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, για τις τρεις τιμές της ενέργειας ενεργοποίησης του ελαφρού συστατικού. Παρατηρείται ότι αύξηση της τιμής της μεταβλητής E_{CUT} οδηγεί σε μεγαλύτερη ενεργή καθυστέρηση έναυσης.



Εικόνα 14 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά της ενέργειας ενεργοποίησης του ελαφρού συστατικού, E_{CUT} .

Αντίστοιχα, για τον προσδιορισμό της τιμής του προεκθετικού παράγοντα του ελαφρού συστατικού (A_{CUT}), δοκιμάστηκαν τρεις τιμές, ίσες με $1.80 \cdot 10^9$, $1.90 \cdot 10^9$ και $2.02 \cdot 10^9$, με την ενέργεια ενεργοποίησης να είναι σταθερή, και ίση με 95.70 kJ/mol . Εν προκειμένω, οι τιμές του προεκθετικού παράγοντα και της ενέργειας ενεργοποίησης του βαρέος συστατικού διατηρήθηκαν σταθερές, ίσες με $A_{RES}=3.0 \cdot 10^{10}$ και $E_{RES}=129.0 \text{ kJ/mol}$, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται διαγράμματα του ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, για τις τρεις τιμές της παραμέτρου A_{CUT} . Από τα παρουσιαζόμενα στην Εικόνα 15 αποτελέσματα καθίστανται σαφή τα ακόλουθα: (α) η σχετικά περιορισμένη επίδραση της τιμής της παραμέτρου A_{CUT} στην ενεργή καθυστέρηση έναυσης, και (β) η ισχυρότερη επίδραση αυτής στο μέγιστο της καμπύλης ROHR.. Τελικά, επιλέγεται η τιμή $A_{CUT}=2.02 \cdot 10^9$.

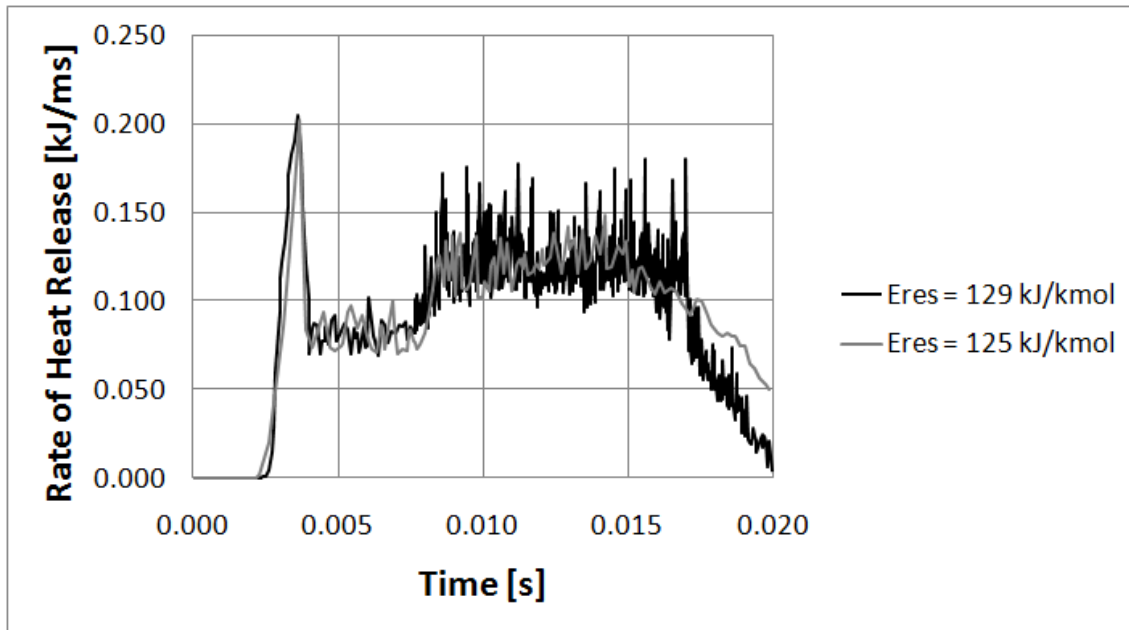


Εικόνα 15 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά του προεκθετικού παράγοντα του ελαφρού συστατικού, A_{cut} .

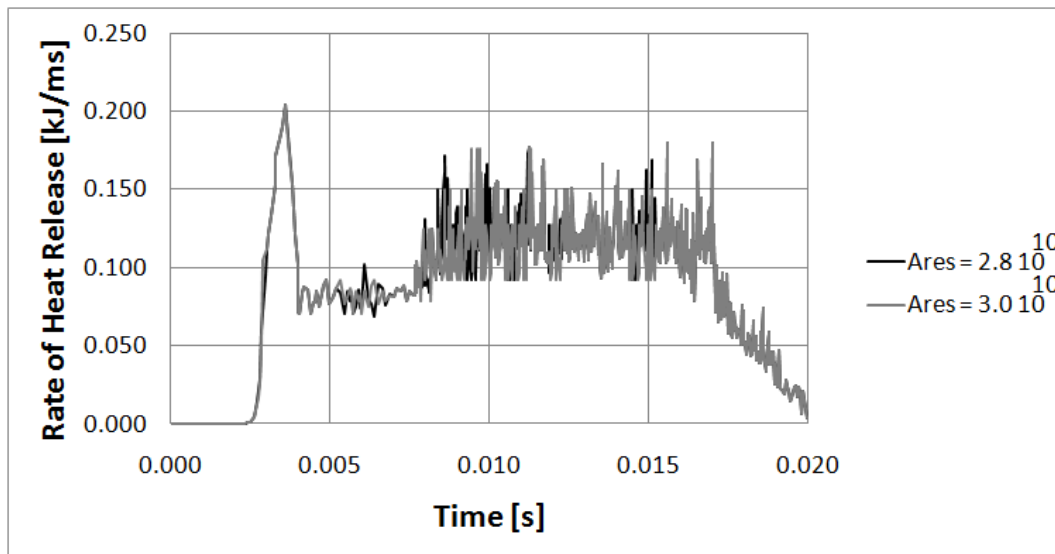
Ανάλογες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για τους συντελεστές τους βαρέος συστατικού (residual). Αρχικά, θεωρήθηκαν δύο διαφορετικές τιμές της ενέργειας ενεργοποίησης (E_{RES}), ίσες με 125.0, και 129.0 kJ/mol, διατηρώντας σταθερή την τιμή του προεκθετικού παράγοντα (A_{RES}) ίση με $3.0 \cdot 10^{10}$. Εδώ, η τιμή του προεκθετικού παράγοντα και της ενέργειας ενεργοποίησης του ελαφρού συστατικού ήταν $A_{cut} = 2.02 \cdot 10^9$ και $E_{cut} = 99.86$ kJ/mol, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 16, δεικνύουν ότι, για το εύρος τιμών που μελετήθηκε, η μεταβολή της ενέργειας ενεργοποίησης του βαρέος συστατικού δεν επιδρά σημαντικά στην υπολογιζόμενη καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Τελικά, επιλέγεται η τιμή $E_{RES} = 125$ kJ/kmol.

Τέλος, για τον προσδιορισμό της τιμής της παραμέτρου A_{RES} έγιναν δοκιμές στο πλαίσιο προσομοιώσεων στον θάλαμο FIA, για τιμές του A_{RES} ίσες με $2.80 \cdot 10^{10}$ και $3.00 \cdot 10^{10}$. Εδώ, χρησιμοποιήθηκαν για τις υπόλοιπες παραμέτρους της χημικής κινητικής οι τιμές: $E_{RES} = 129$ kJ/mol, $A_{cut} = 2.02 \cdot 10^9$, $E_{cut} = 99.86$ kJ/mol. Οι υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας παρουσιάζονται στην Εικόνα 17, από την οποία καθίσταται σαφές ότι, στο εύρος των

τιμών E_{RES} που δοκιμάστηκαν, η καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστη. Εδώ, επιλέγεται η τιμή $A_{RES}=3.00 \cdot 10^{10}$.



Εικόνα 16 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά της ενέργειας ενεργοποίησης του βαρέος συστατικού, E_{RES} .



Εικόνα 17 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά του προεκθετικού παράγοντα του βαρέος συστατικού, A_{RES} .

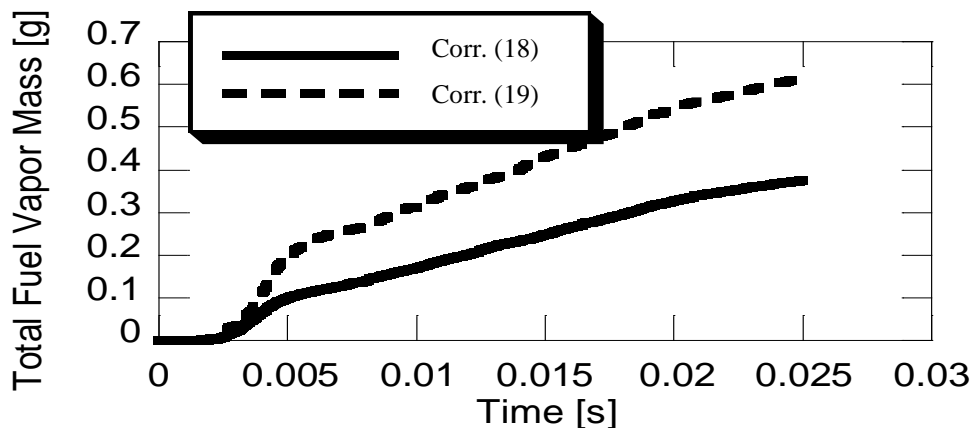
Οι τιμές των τεσσάρων παραμέτρων της χημικής κινητικής που τελικά επιλέχθηκαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4. Οι τιμές που παρατίθενται είναι οι βέλτιστες που προέκυψαν από τις παραπάνω δοκιμές, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα των Struckmeier et al. (2009) (βλ. Πίνακα 2). Με μεταβολή των παραπάνω παραμέτρων, καθώς και του κλάσματος μάζας σε ελαφρύ συστατικό, ζ , είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη με το παρόν απλό μοντέλο η ποιότητα του βαρέος καυσίμου. Έτσι, ένα «καλό» καύσιμο χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές της παραμέτρου ζ , υψηλές τιμές του προεκθετικού παράγοντα του βαρέος συστατικού (A_{RES}) και χαμηλές τιμές της αντίστοιχης ενέργειας ενεργοποίησης (E_{RES}). Η αντίθετη τάση ισχύει στην περίπτωση βαρέος καυσίμου «κακής» ποιότητας.

Μεταβλητή	Τιμή	
A_{CUT}	$2.02 \cdot 10^9$	[-]
E_{CUT}	99.86	[kJ/kmol]
A_{RES}	$3.00 \cdot 10^{10}$	[-]
E_{RES}	125.00	[kJ/kmol]
C_{m21}	0.2	[-]
C_{m22}	0.2	[-]

Πίνακας 4 Πίνακας βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του τροποποιημένου μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου.

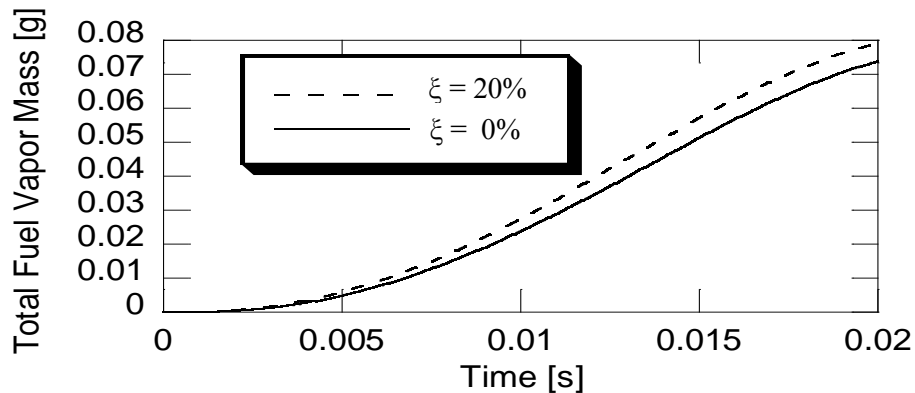
4.3 Υπολογιστική μελέτη μη αντιδρώσας ροής

Για την ακριβή μοντελοποίηση της διεργασίας εξάτμισης του καυσίμου, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί με ακρίβεια η τιμή του αριθμού Nusselt (\overline{Nu}) της ροής του αέριου μίγματος γύρω από σφαιρικό σταγονίδιο. Έτσι, θεωρούμε αρχικά την απλούστερη περίπτωση της μη αντιδρώσας ροής σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου, ώστε να εξεταστεί αποκλειστικά η ακρίβεια στον υπολογισμό της εξάτμισης, αμελώντας την επίδραση της καύσης. Για τον σκοπό αυτόν, θεωρούμε αρχικά την περίπτωση έγχυσης καυσίμου σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου που περιέχει άζωτο (αδρανές) (βλ. Κυριακίδης., 2009, Chryssakis & Kaiktsis, 2008). Εδώ, θεωρείται έγχυση μάζας 4 g βαρέος καυσίμου αποτελούμενου αποκλειστικά από βαρύ συστατικό ($\xi=0\%$). Το υπολογιστικό πλέγμα των παρόντων προσομοιώσεων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής συμπίπτει με αυτό των Chryssakis & Kaiktsis (2008). Εδώ, η αρχική θερμοκρασία και η πίεση εντός του θαλάμου είναι 900 K και 100 bar, αντίστοιχα, τιμές αντιπροσωπευτικές μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων στην περιοχή του Άνω Νεκρού Σημείου, για λειτουργία σε πλήρες φορτίο. Η πίεση έγχυσης του καυσίμου ορίστηκε ίση με 1000 bar. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της προκύπτουσας συνολικά εξατμισμένης μάζας καυσίμου, με χρήση των σχέσεων (18) και (19) για τον υπολογισμό του αριθμού \overline{Nu} . Όπως είναι εμφανές, χρήση της σχέσης (19) οδηγεί σε μεγαλύτερους ρυθμούς ατμοποίησης από τα πρώτα κίολας στάδια της ατμοποίησης



Εικόνα 18 Εξάτμιση καυσίμου αποτελούμενου αποκλειστικά από βαρύ συστατικό ($\xi=0\%$) σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου: χρονική μεταβολή της συνολικά εξατμισμένης μάζας καυσίμου, όπως προβλέπεται από τη χρήση των σχέσεων (18) και (19).

Η καλή λειτουργία του παρόντος μοντέλου ατμοποίησης βαρέος καυσίμου ελέγχθηκε αρχικά μέσω προσομοίωσης της ατμοποίησης βαρέος καυσίμου (HFO), για διαφορετικές τιμές της περιεκτικότητας σε ελαφρύ συστατικό. Εν προκειμένω, έγινε χρήση του θαλάμου FIA, για μη αντιδρώσα ροή ($p=45$ bar, $T=823$ K, περιβάλλον N_2), και βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα κατά μάζα σε ελαφρύ συστατικό: (α) 0%, (β) 20%. Η συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου είναι 0.087 g. Η χρονική μεταβολή της συνολικά εξατμισμένης μάζας καυσίμου παρουσιάζεται στην Εικόνα 19, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να επιβεβαιώνουν την ταχύτερη ατμοποίηση του καυσίμου με μη μηδενική περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό.

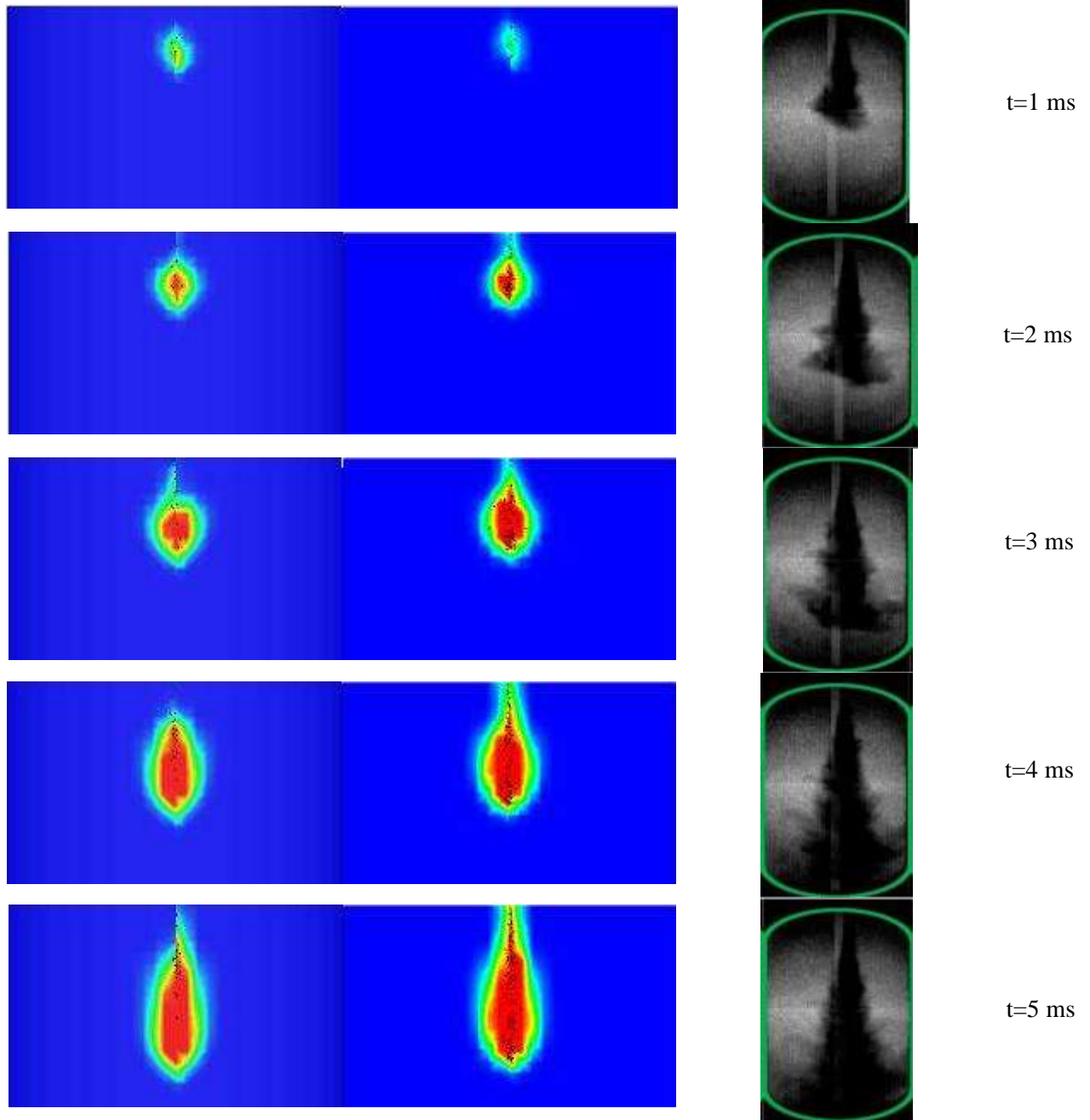


Εικόνα 19 Ατμοποίηση καυσίμου στον θάλαμο σταθερού όγκου FIA (πλήρωση με άζωτο αρχικών συνθηκών $p=45$ bar, $T=823$ K): χρονική μεταβολή της συνολικά εξατμισθείσας μάζας βαρέος καυσίμου περιεκτικότητας 0% και 20% κατά μάζα σε ελαφρύ συστατικό.

Ακολούθως, συγκρίνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα με χρήση του νέου μοντέλου ατμοποίησης (δύο συστατικών) με αυτά του μοντέλου ενός συστατικού, για την περίπτωση μη αντιδρώσας ροής. Εδώ, μελετάται η μη αντιδρώσα ροή στον θάλαμο VCVCC: πλήρωση με άζωτο, αρχικής πίεσης $p=25$ bar και θερμοκρασίας $T=873$ K, και έγχυση συνολικής μάζας βαρέος καυσίμου 0.124 g. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν πλήρως σε αυτά των πειραμάτων των Struckmeier et al. (2009). Στην περίπτωση του νέου μοντέλου, η περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό αντιστοιχεί σε $\zeta=30\%$, σε αντιστοιχία προς το πείραμα. Στην Εικόνα 20, παρουσιάζεται οπτικοποίηση της υπολογισθείσας συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, για το μονοσυστατικό και το παρόν (δύο συστατικών) μοντέλο εξάτμισης. Εδώ, θεωρούμε επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας της συσκευής. Με μαύρο χρώμα διακρίνονται τα σταγονίδια της υγρής φάσης του καυσίμου. Επιπλέον, παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα (οπτικοποίηση του spray) των Struckmeier et al. (2009). Από την Εικόνα 20 προκύπτει ότι το νέο μοντέλο ατμοποίησης (δύο συστατικών) προβλέπει μεγαλύτερα επίπεδα συγκέντρωσης εξατμισμένου καυσίμου κοντά στην υγρή φάση, ενώ προβλέπει ρεαλιστικότερα την ατμοποίηση στην περιοχή εγγύς του εγχυτήρα.

Μονοσυστατικό
μοντέλο ατμοποίησης

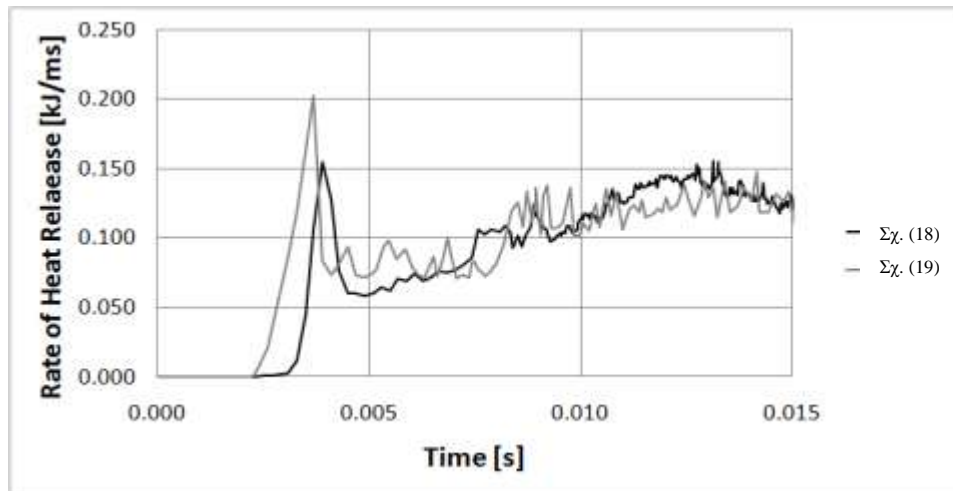
Μοντέλο ατμοποίησης
δύο συστατικών



Εικόνα 20 Σύγκριση μονοσυστατικού και νέου (δύο συστατικών) μοντέλου ατμοποίησης βαρέος καυσίμου: ισοϋψείς καμπύλες συγκέντρωσης εξατμισμένου καυσίμου σε επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας της συσκευής VCVCC, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από την έναρξη της έγχυσης. Με μαύρο χρώμα διακρίνονται τα σταγονίδια της υγρής φάσης του καυσίμου. Στη δεξιά στήλη παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης του spray (Struckmeier et al., 2009).

4.4 Υπολογιστική μελέτη αντιδρώσας ροής

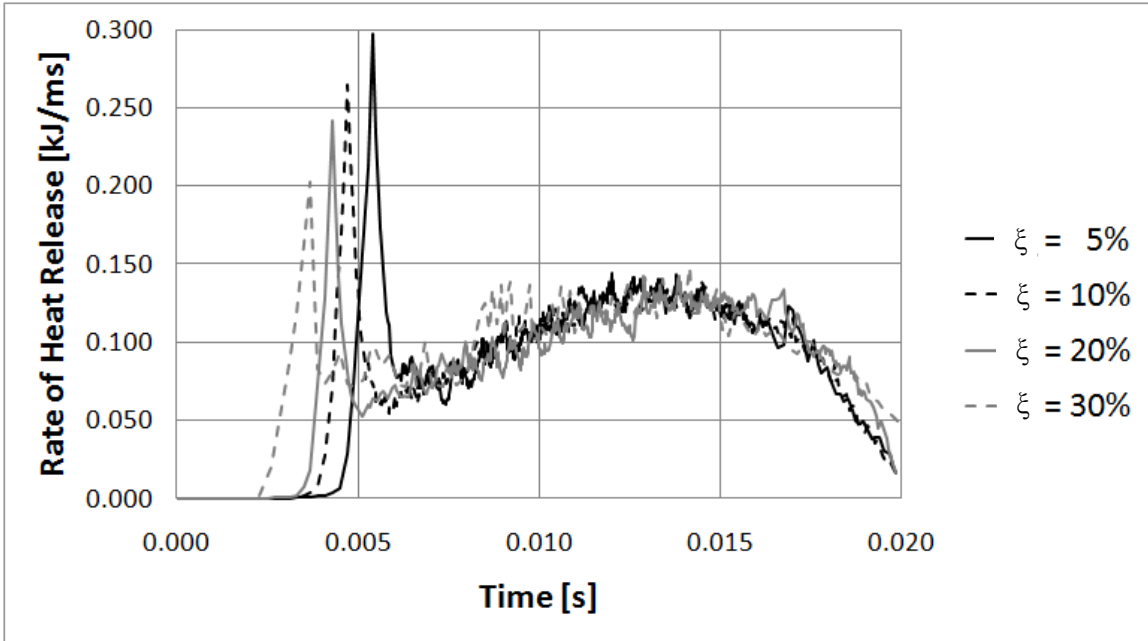
Στο πλαίσιο της μελέτης της αντιδρώσας ροής, μελετάται αρχικά η επίδραση της σχέσης υπολογισμού του αριθμού \overline{Nu} επί των μεγεθών αυτής. Εδώ, γίνεται προσομοίωση της ροής και καύσης spray βαρέος καυσίμου περιεκτικότητας 20% σε ελαφρύ συστατικό, στον θάλαμο FIA. Τα δεδομένα για τους παρόντες υπολογισμούς παρατίθενται στον πίνακα 2. Στην Εικόνα 21 παρουσιάζεται η υπολογισθείσα χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, με χρήση των σχέσεων (18) και (19) για τον υπολογισμό του αριθμού \overline{Nu} . Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αναμενόμενη ταχύτερη καύση στην περίπτωση της χρήσης της σχέσης (19). Αυτό προφανώς οφείλεται στην αντίστοιχη ταχύτερη ατμοποίηση του καυσίμου, όπως κατεδείχτηκε και για τις περιπτώσεις μη αντιδρώσας ροής που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.3.



Εικόνα 21 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$. Ο υπολογισμός του αριθμού \overline{Nu} στη ροή γύρω από σταγόνα καυσίμου βασίζεται στις σχέσεις (18) και (19).

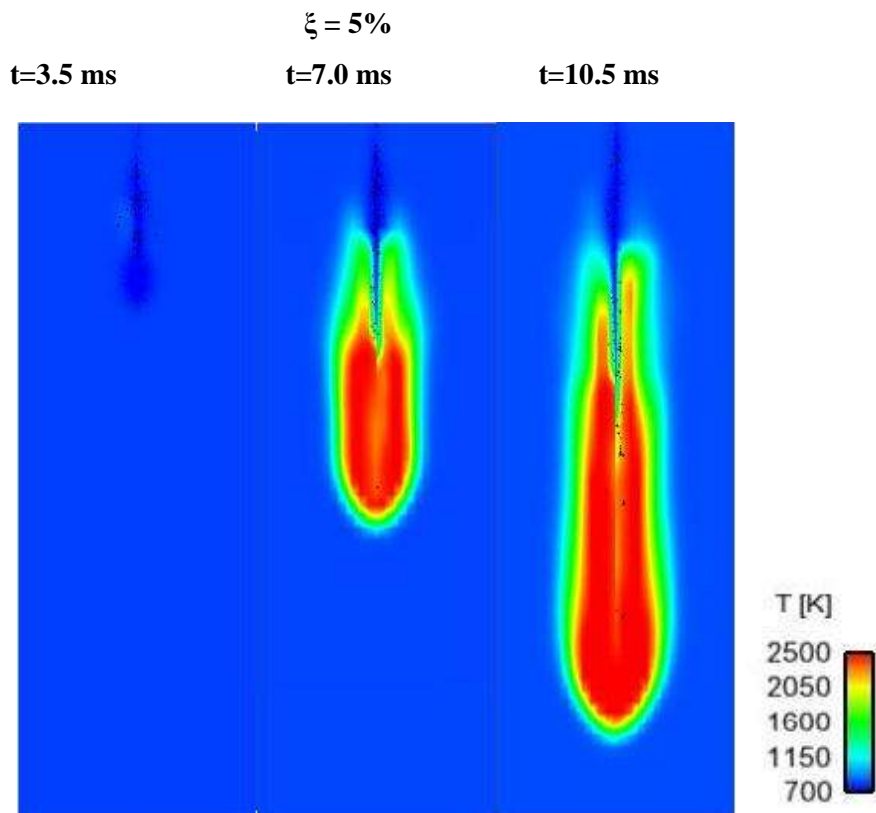
Η επίδραση της εξάρτησης της περιεκτικότητας του καυσίμου σε ελαφρύ συστατικό παρουσιάζεται στην Εικόνα 22: καύση στον θάλαμο FIA για τις συνθήκες του Πίνακα 2. Εδώ, η περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό μεταβάλλεται από 5% έως 30%. Οι καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας της Εικόνας 22 πιστοποιούν ότι, με αύξηση της περιεκτικότητας σε ελαφρύ συστατικό, μειώνεται η ενεργή καθυστέρηση έναυσης, ενώ, για σχετικά μεγάλους χρόνους, η ένταση της καύσης δεν επηρεάζεται αισθητά.

Στην Εκόνα 22 παρατηρούνται οι χαρακτηριστικές περιοχές καύσης: (α) της καύσης προανάμιξης, από τα 3 ms έως τα 6 ms (ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό), και (β) της καύσης διάχυσης, από τα 5-7 ms έως το πέρας της καύσης. Κατά την καύση διάχυσης, αντιπροσωπευτικές τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι περί την τιμή 0.14 kJ/ms.

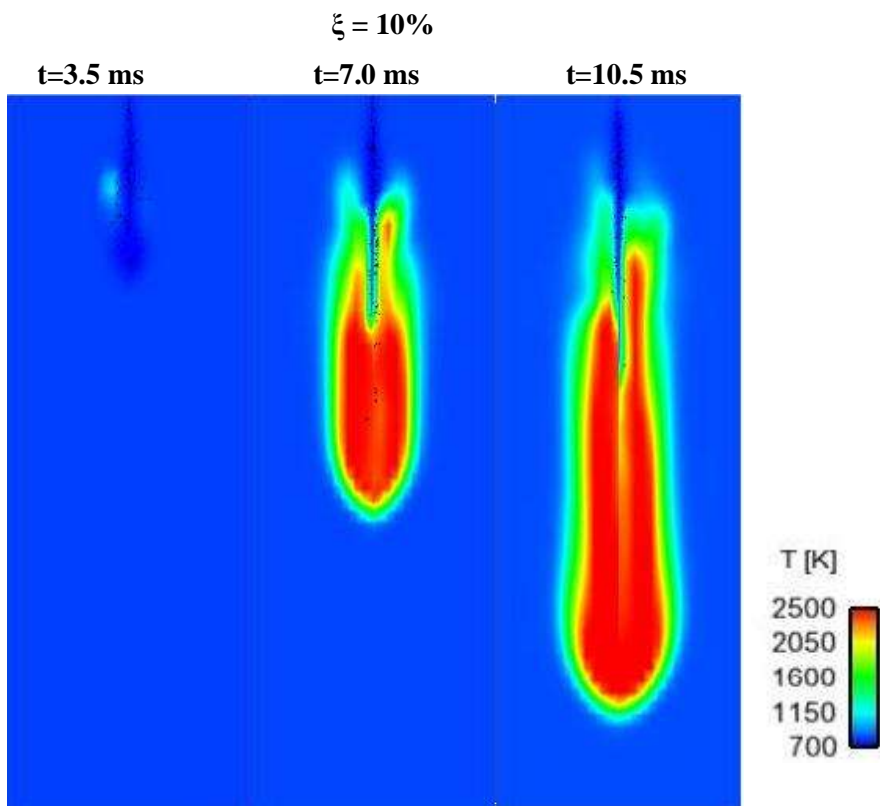


Εικόνα 22 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, για διαφορετικές τιμές της περιεκτικότητας του βαρέος καυσίμου σε ελαφρύ συστατικό.

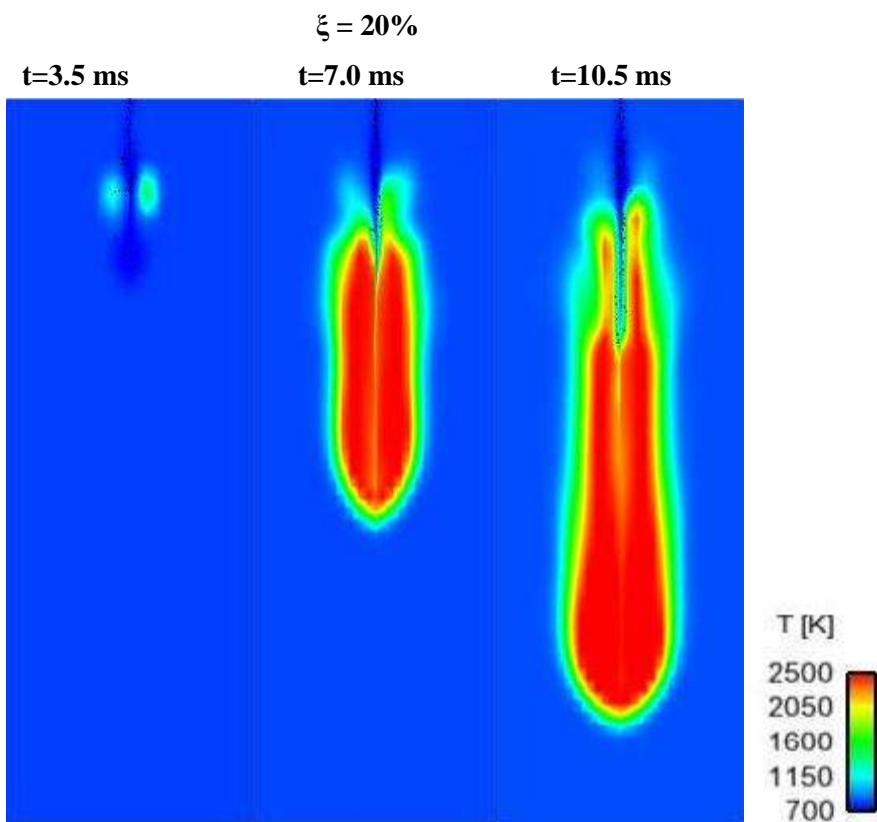
Στις Εικόνες 23 έως 26 παρουσιάζεται οπτικοποίηση του ροϊκού πεδίου, σε επιλεγμένα χαρακτηριστικά χρονικά σημεία, για τις τιμές της περιεκτικότητας σε ελαφρύ συστατικό της Εικόνας 22. Εδώ, απεικονίζεται επίπεδο διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας του θαλάμου FIA. Με μαύρο χρώμα παρίστανται τα σταγονίδια της υγρής φάσης του καυσίμου. Τα αποτελέσματα απεικονίζουν την εξέλιξη του φαινομένου της καύσης. Στις εικόνες είναι σαφής η μετατόπιση της φλόγας σε σχέση με τον εγχυτήρα (flame lift-off).



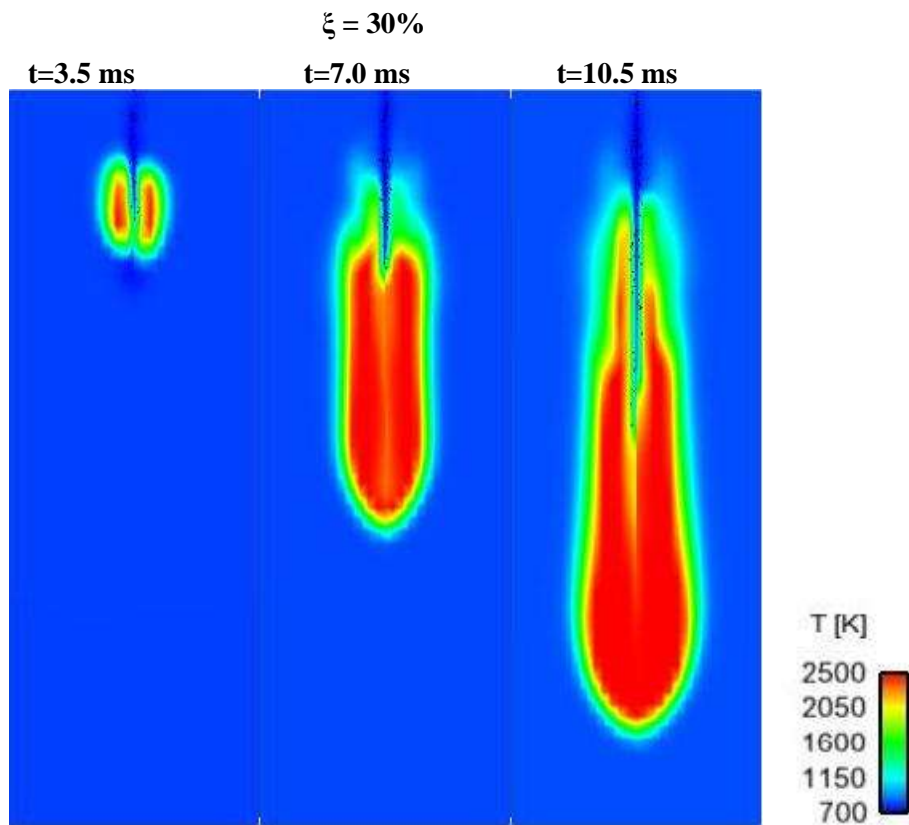
Εικόνα 23 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 5% σε ελαφρύ συστατικό.



Εικόνα 24 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 10% σε ελαφρύ συστατικό.

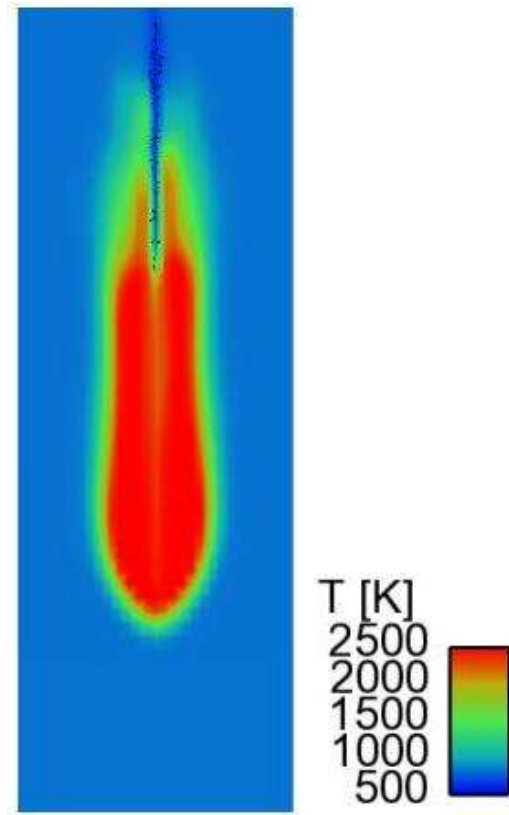


Εικόνα 25 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 20% σε ελαφρύ συστατικό.



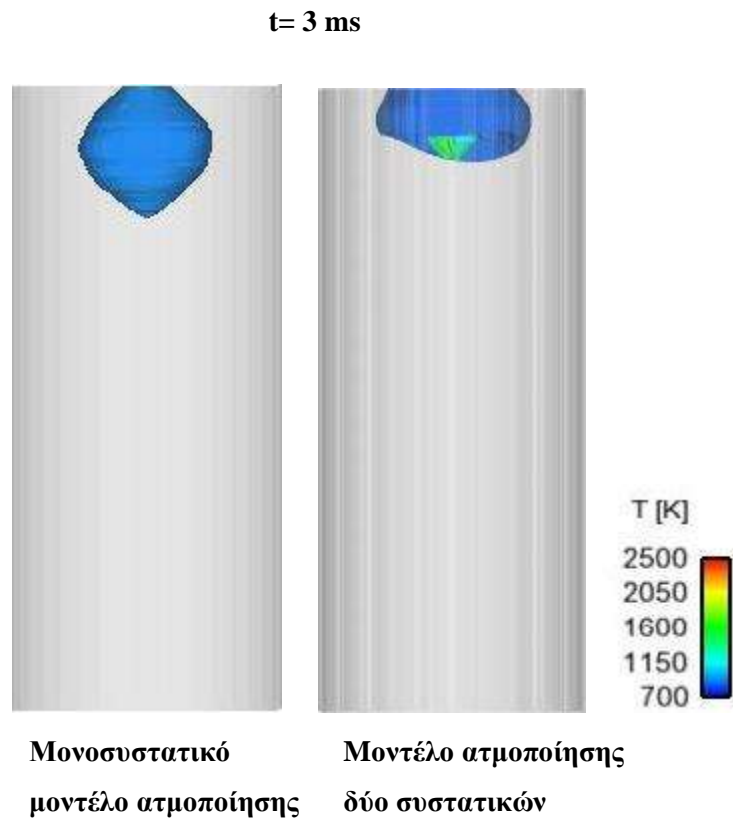
Εικόνα 26 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό.

Στην περίπτωση καυσίμου υψηλής περιεκτικότητας σε ελαφρύ συστατικό (Εικόνα 26), παρατηρείται σχετικά υψηλή συγκέντρωση υγρού καυσίμου σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας (άνω των 1300 K). Εν προκειμένω, η υψηλή συγκέντρωση εξατμισθέντος ελαφρού συστατικού φαίνεται να δημιουργεί ένα «προστατευτικό κέλυφος» γύρω από την υγρή φάση. Η καύση της αντίστοιχης μάζας θερμαίνει την εναπομένουσα υγρή φάση, πλούσια σε βαρύ συστατικό, η οποία εν τέλει εξατμίζεται και καίγεται. Η ύπαρξη του ανωτέρου «προστατευτικού κελύφους» έχει ως απόρροια την αύξηση του μήκους διείδυσης της υγρής φάσης, με την αύξηση της περιεκτικότητας του καυσίμου σε ελαφρύ συστατικό. Η ανωτέρω διείδυση της υγρής φάσης είναι ιδιαίτερα εμφανής στην Εικόνα 27 ($\zeta=30\%$, $t=9$ ms).



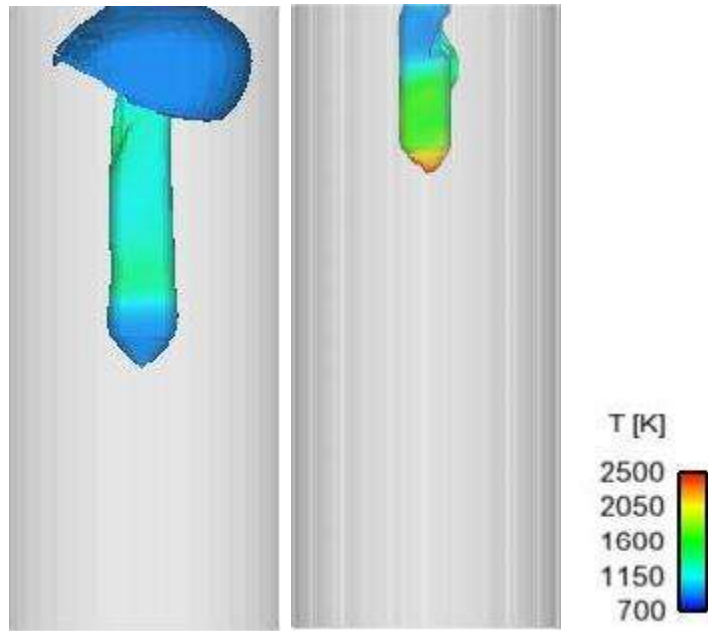
Εικόνα 27 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας του θαλάμου FIA. Εδώ, $\zeta=30\%$, $t=9$ ms.

Για την περαιτέρω μελέτη της επίδρασης του παρόντος μοντέλου ατμοποίησης επί της καύσης αλλά και για τη λεπτομερή σύγκριση των υπολογιστικών μας αποτελεσμάτων με πειραματικά της βιβλιογραφίας (Struckmeier et al., 2009), προσομοιώνεται η καύση βαρέος καυσίμου στον θάλαμο VCVCC, για τα δεδομένα του Πίνακα 3. Εδώ, γίνεται χρήση τόσο του μονοσυστατικού μοντέλου ατμοποίησης όσο και του παρόντος μοντέλου δύο συστατικών, για περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό. Στις Εικόνες 28 έως 31 παρουσιάζονται επιλεγμένα στιγμιότυπα της προσομοίωσης για τα δύο μοντέλα (επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισμένου καυσίμου, χρωματισμένη με ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας). Η απεικόνιση παρέχει μια σαφή αίσθηση για το εύρος της περιοχής του εξατμισμένου καυσίμου, καθώς και για τη χρονική εξέλιξη της καύσης.



Εικόνα 28 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=3 \text{ ms}$.

t= 9 ms



Μονοσυστατικό

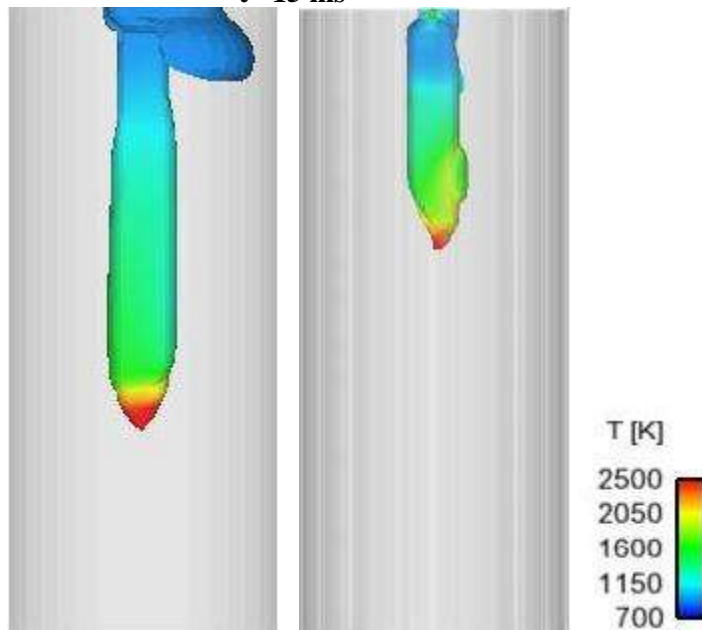
Μοντέλο ατμοποίησης

μοντέλο ατμοποίησης

δύο συστατικών

Εικόνα 29 Ισοψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=9 \text{ ms}$.

t= 15 ms



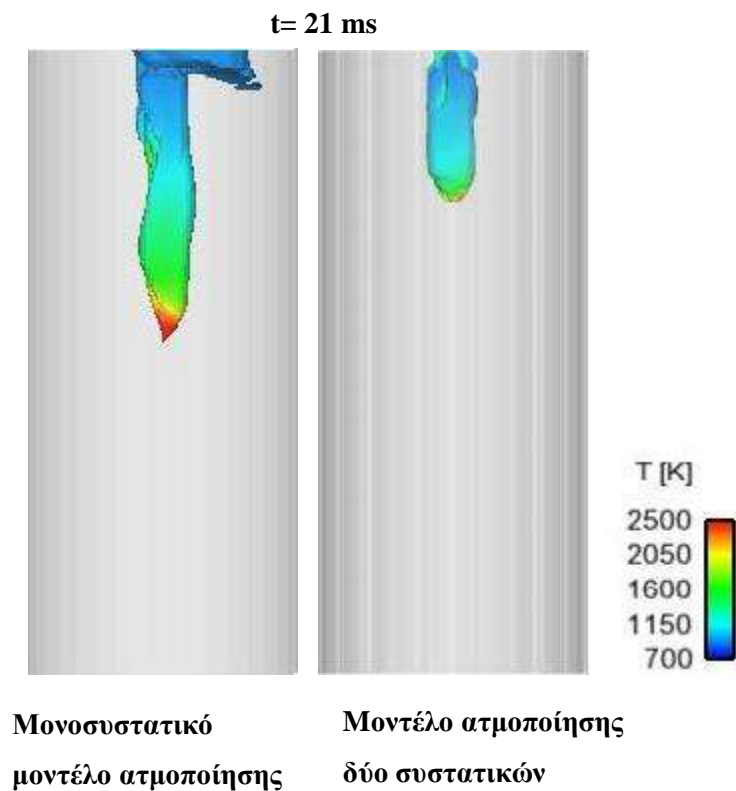
Μονοσυστατικό

Μοντέλο ατμοποίησης

μοντέλο ατμοποίησης

δύο συστατικών

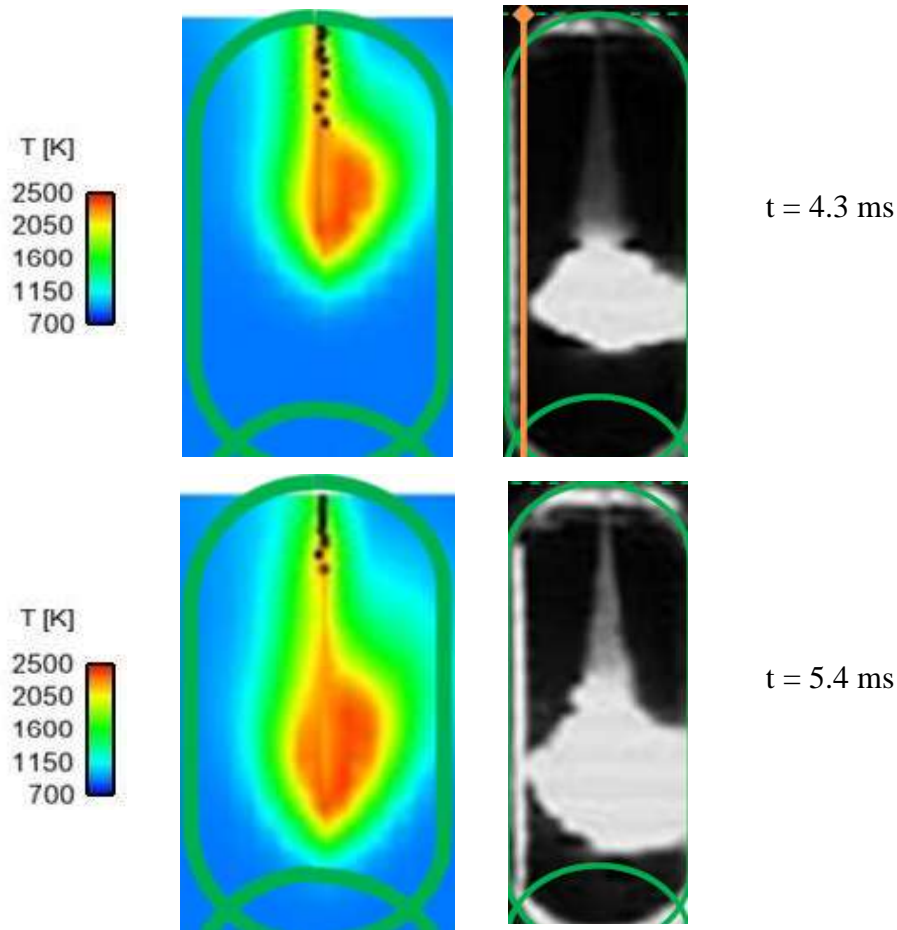
Εικόνα 30 Ισοψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=15 \text{ ms}$.

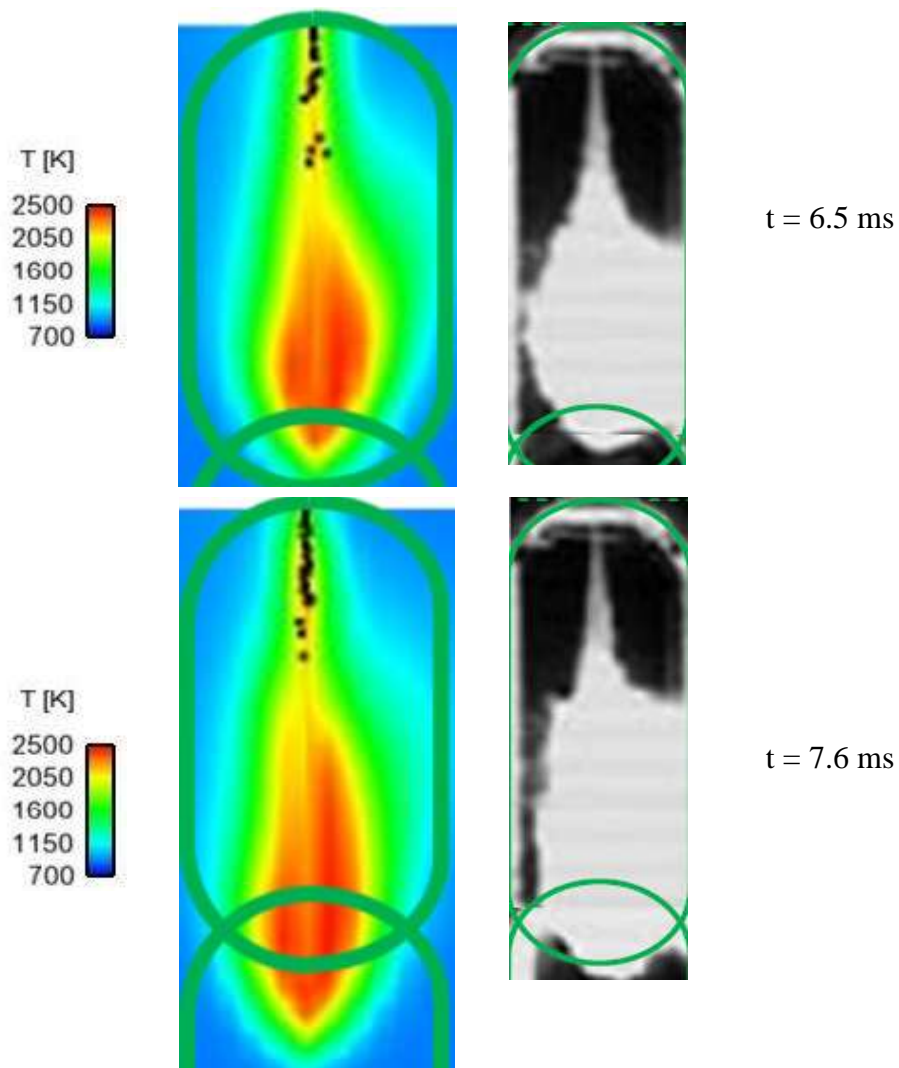


Εικόνα 31 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=21 \text{ ms}$.

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 28-31, η διαφοροποίηση στο μοντέλο ατμοποίησης επιδρά καταλυτικά στην εξάτμιση και την καύση. Όπως προκύπτει από την Εικόνα 28, σε χρόνο 3 ms από την έναρξη της έγχυσης του καυσίμου, η χρήση του μονοσυστατικού μοντέλου ατμοποίησης αντιστοιχεί σε περίπου ομοιόμορφη (και χαμηλή) θερμοκρασία στην εξεταζόμενη επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισμένου καυσίμου. Αντίθετα, στην περίπτωση του μοντέλου ατμοποίησης δύο συστατικών, υπάρχουν πρώτες ενδείξεις ύπαρξης υψηλών θερμοκρασιών (κατανάλωση του καυσίμου). Στην Εικόνα 29 (9 ms από την αρχή της έγχυσης) είναι εμφανής η καθυστέρηση της ατμοποίησης στην περίπτωση του μονοσυστατικού μοντέλου. Αυτό έχει ως απόρροια το μεγαλύτερο μήκος διεύθυνσης του ατμού, σε σχέση με το μοντέλο δύο συστατικών. Η οπτικοποίηση σε χρονικές στιγμές περί το πέρας της καύσης (Εικόνες 30, 31, που αντιστοιχούν σε χρονικές στιγμές 15 και 21 ms, αντίστοιχα, από την αρχή της έγχυσης) δείχνουν επίσης την προβλεπόμενη ταχύτερη κατανάλωση του καυσίμου στην περίπτωση της χρήσης του μοντέλου ατμοποίησης δύο συστατικών.

Στην Εικόνα 32 συγκρίνονται τα αποτελέσματα από τη χρήση του παρόντος μοντέλου ατμοποίησης δύο συστατικών για τον θάλαμο VCVCC με οπτικοποιήσεις που παρουσιάζονται στην εργασία των Struckmeier et al. (2009). Εδώ, οι υπολογισμοί γίνονται για περιεκτικότητα του βαρέος καυσίμου σε ελαφρύ συστατικό 30%, σε αντιστοιχία με το πείραμα. Στα παρουσιαζόμενα στην Εικόνα 32 χρονικά στιγμιότυπα φαίνεται η καλή συμφωνία αναφορικά με τη χρονική εξέλιξη της καύσης ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα των Struckmeier et al. (2009) και τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα. Η απόκλιση ανάμεσα στα πειράματα και τους υπολογισμούς είναι μεγαλύτερη σε μικρούς χρόνους, και μειώνεται ακολούθως.





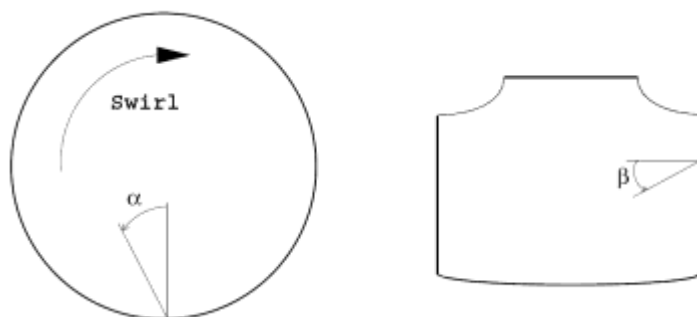
Εικόνα 32 Αριστερή στήλη (υπολογιστικά αποτελέσματα): ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης VCVC, σε επίπεδο διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό. Δεξιά στήλη (πειραματικά αποτελέσματα): οπτικοποίηση της αντιδρώσας ροής (Struckmeier et al., 2009).

4.5 Μοντελοποίηση της καύσης στον κινητήρα RT-flex58T-B

Η συνολική συμπεριφορά του παρόντος μοντέλου ατμοποίησης δύο συστατικών σε συνδυασμό με το τροποποιημένο μοντέλο καύσης χαρακτηριστικού χρόνου ελέγχθηκε σε περιβάλλον μεγάλου δίχρονου ναυτικού κινητήρα, συγκεκριμένα του κινητήρα RT-flex58T-B της κατασκευάστριας εταιρίας Wärtsilä Switzerland (βλ. Andreadis et al., 2011, και τις εκεί αναφορές). Τα κύρια χαρακτηριστικά του κινητήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Κάθε κύλινδρος του κινητήρα φέρει τρεις εγχυτήρες, περιφερειακά στην περιοχή της κυλινδροκεφαλής, ανά 120°. Κάθε εγχυτήρας έχει 5 οπές, για την καλύτερη ανάμιξη καυσίμου – αέρα (Εικόνα 33). Η κατεύθυνση της έγχυσης από κάθε οπή καθορίζεται από τις τιμές των γωνιών α και β (βλ. Εικόνα 33. Θετικές τιμές της γωνίας α αντιστοιχούν σε έγχυση κατά τη φορά της εγκάρσιας συστροφής του αέρα. Στον παρόντα εγχυτήρα, η έγχυση γίνεται εν γένει κατά τη φορά της εγκάρσιας συστροφής του αέρα (θετικές τιμές της γωνίας α για τις περισσότερες οπές, βλ. Πίνακα 6).

Διάμετρος κυλίνδρου [m]	0.58
Διαδρομή εμβόλου [m]	2.416
Σύστημα έγχυσης	Common Rail
Κλείσιμο βαλβίδας εξαγωγής [° aTDC]	-96
Άνοιγμα βαλβίδας εξαγωγής [° aTDC]	120

Πίνακας 5 Κατασκευαστικά στοιχεία του κινητήρα RT-flex58T-B.



Εικόνα 33 Ορισμός γωνιών έγχυσης α και β , οι οποίες καθορίζουν την κατεύθυνση της έγχυσης από μία οπή του εγχυτήρα.

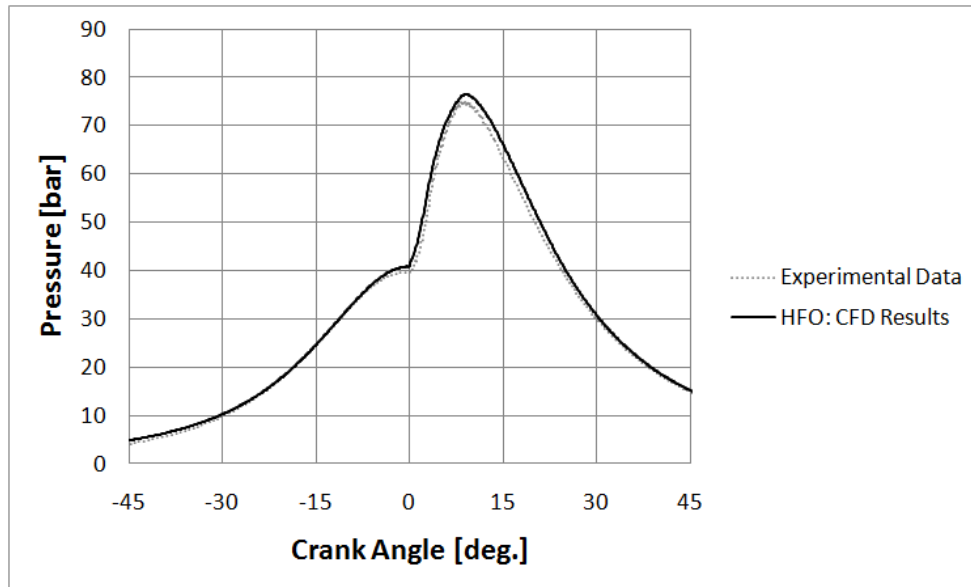
Αριθμός Οπής	1	2	3	4	5
Γωνία α	-	+	+	+	+
Γωνία β	+	+	+	+	+

Πίνακας 6 Πρόσημα τιμών των γωνιών έγχυσης α και β , όπως αυτές ορίζονται στην Εικόνα 33. Θετική τιμή της γωνίας α αντιστοιχεί σε έγχυση κατά τη φορά της εγκάρσιας συστροφής του αέρα εντός του κυλίνδρου.

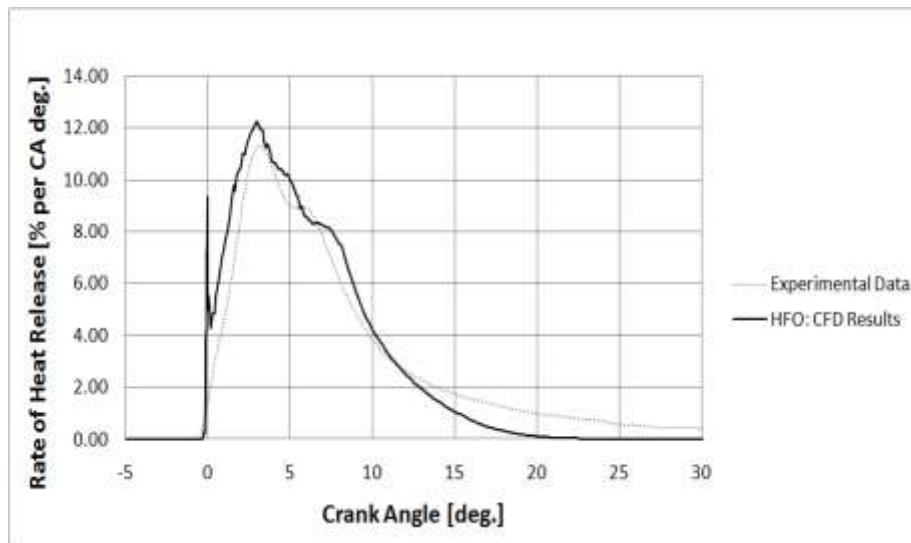
Η προσομοίωση της ροής και καύσης στον κινητήρα γίνεται εδώ για λειτουργία σε μερικό φορτίο (25%), που αντιστοιχεί σε ταχύτητα περιστροφής 66.1 RPM. Στο φορτίο αυτό, η έγχυση του καυσίμου ξεκινά σε γωνία στροφάλου -0.8° , διαρκεί δε 7.8° . Στις συγκεκριμένες συνθήκες, οι ταχύτητες έγχυσης είναι στο εύρος των ταχυτήτων έγχυσης στους θαλάμους FIA και VCVCC, που μελετήθηκαν παραπάνω. Για την αριθμητική προσομοίωση, θεωρήθηκε βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi=20\%$. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν το ίδιο υπολογιστικό πλέγμα και η τιμή του χρονικού βήματος της εργασίας των Andreadis et al. (2009).

Στις Εικόνες 34 και 35 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν, αναφορικά με τη χρονική μεταβολή της πίεσης εντός του κυλίνδρου, καθώς και τη χρονική μεταβολή του αδιαστατοποιημένου ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Στις ίδιες Εικόνες παρουσιάζονται επίσης πειραματικά αποτελέσματα για καύση καυσίμου diesel, τα οποία μάς παρασχέθηκαν από την εταιρία Wärtsilä Switzerland. Διαπιστώνεται η καλή ποιοτική συμφωνία ανάμεσα στα πειραματικά και τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα. Τέλος, στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της καύσης, με τη βοήθεια ισοϋψών καμπυλών θερμοκρασίας

επί επιφάνειας σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου. Εδώ, η επιφάνεια αντιστοιχεί στη στιγμιαία μέση τιμή της κατανομής της εν λόγω συγκέντρωσης, συνεπώς χρησιμοποιείται ως προσέγγιση της περιβάλλουσας του εξατμισμένου καυσίμου επιφάνειας.



Εικόνα 34 Πειραματική και υπολογισθείσα μεταβολή της πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, στον κινητήρα RT-flex58T-B, για λειτουργία σε μερικό φορτίο, 25%. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λειτουργία με καύσιμο diesel, ενώ τα υπολογιστικά σε βαρύ καύσιμο με $\xi=20\%$.



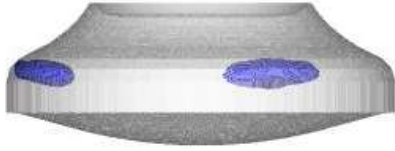
Εικόνα 35 Πειραματική και υπολογισθείσα μεταβολή του αδιαστατοποιημένου ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, στον κινητήρα RT-flex58T-B, για λειτουργία σε μερικό φορτίο, 25%. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λειτουργία με καύσιμο diesel, ενώ τα υπολογιστικά σε βαρύ καύσιμο με $\xi=20\%$.

°C.A.

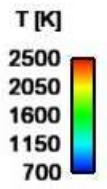
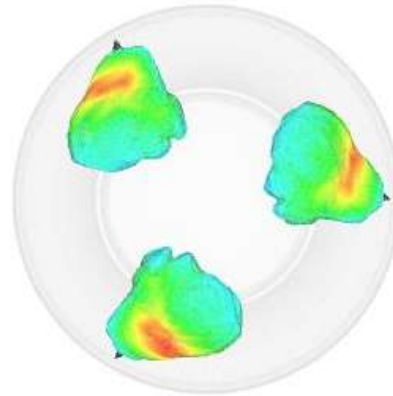
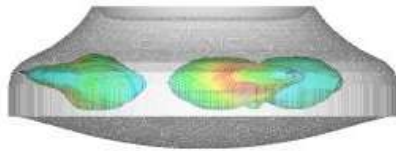
VIEW 1

VIEW 2

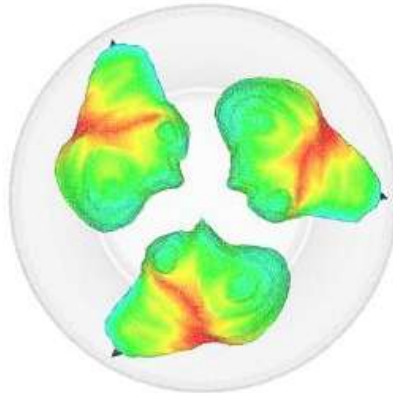
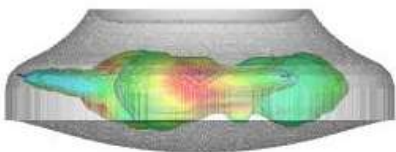
0°



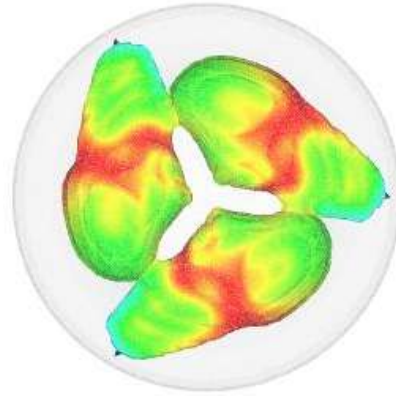
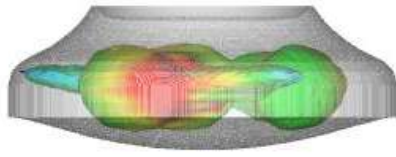
1°



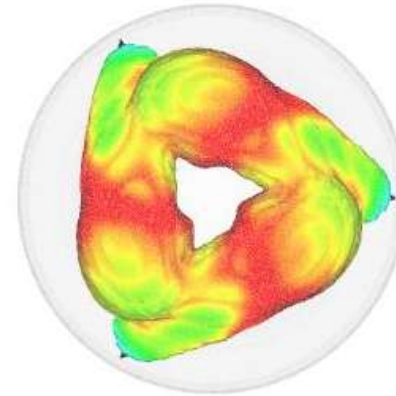
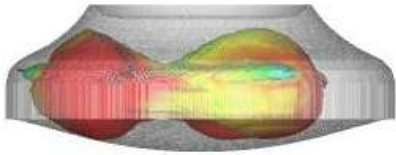
2°



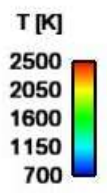
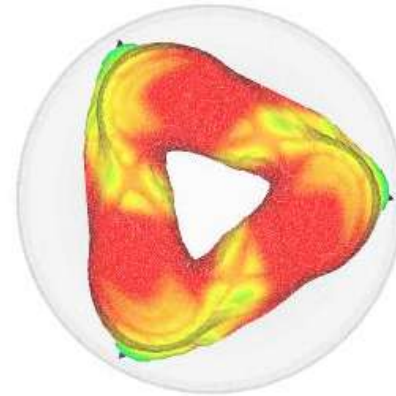
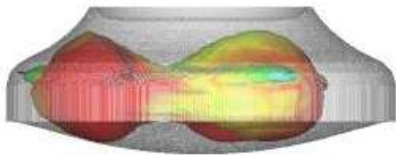
3°



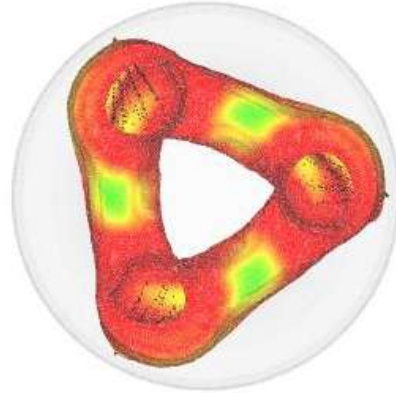
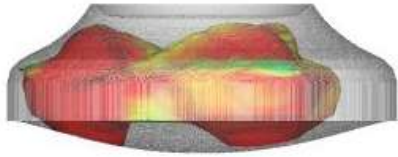
4°



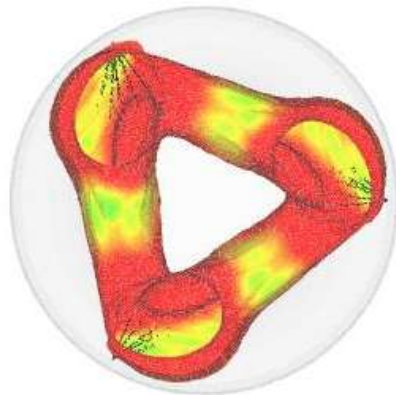
5°



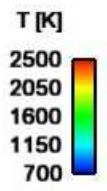
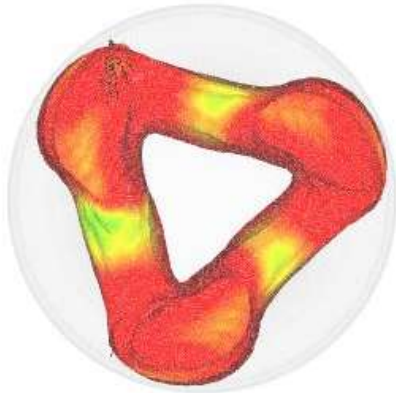
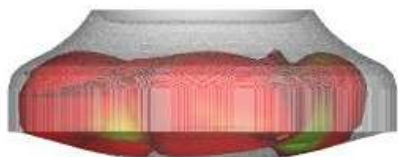
6°



7°



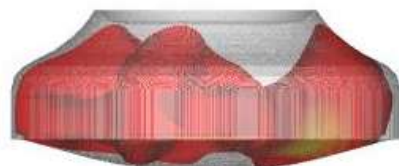
8°



9°



10°



Εικόνα 36 Εξέλιξη της καύσης στον κινητήρα RT-flex58T-B, για λειτουργία σε μερικό φορτίο, 25%: ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, σε διαφορετικές τιμές της γωνίας στρόφαλου. Η επιφάνεια αντιστοιχεί στη στιγμιαία μέση τιμή της κατανομής της εν λόγω συγκέντρωσης.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία εισήχθη ένα νέο μοντέλο ατμοποίησης βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου, με στόχο τη χρήση του σε υπολογισμούς Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής σε ναυτικούς κινητήρες Diesel. Στο μοντέλο, το βαρύ καύσιμο θεωρείται ως μίγμα ενός βαρέος και ενός ελαφρού συστατικού. Για τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του τελευταίου, γίνεται χρήση του πρόσφατα αναπτυχθέντος μοντέλου των Kyriakides et al. (2009). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, γίνεται ακριβής μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας προς τις εξαμιζόμενες σταγόνες βαρέος καυσίμου. Η καύση μοντελοποιείται με χρήση ενός κατάλληλα τροποποιημένου μοντέλου χαρακτηριστικού χρόνου. Με χρήση του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3, έγινε προσομοίωση της ροής και καύσης spray καυσίμου σε θαλάμους καύσης σταθερού όγκου, με τα αποτελέσματα να προκύπτουν σε αρκετά καλή συμφωνία με πειραματικά της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε καλή συμφωνία αναφορικά με το μήκος διείδυσης της αέριας φάσης εντός των θαλάμων καύσης, καθώς και αναφορικά με τη γεωμετρία της φλόγας. Τέλος, προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα από τη χρήση των παρόντων μοντέλων στην προσομοίωση της ροής και καύσης σε μεγάλο δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel.

Η παρούσα εργασία μπορεί να θεωρηθεί ως βάση περαιτέρω ανάπτυξης φυσικών μοντέλων, με στόχο την ακριβή προσομοίωση της καύσης βαρέος καυσίμου σε ναυτικούς κινητήρες Diesel. Ένα από τα σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι η παρατηρηθείσα σημαντική μείωση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας περί το πέρας της καύσης προανάμιξης στους θαλάμους σταθερού όγκου, πριν την εκ νέου αύξησή του κατά την καύση διάχυσης (βλ. π.χ. Εικόνες 16, 17). Η συμπεριφορά αυτή πρέπει κυρίως να αποδοθεί στην ύπαρξη δύο μόνο συστατικών, με αισθητά διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες, στο παρόν μοντέλο. Κατά συνέπεια, η επέκταση του παρόντος μοντέλου στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός πολυσυστατικού μοντέλου, με ομαδοποίηση επιμέρους κατηγοριών υδρογονανθράκων, προτείνεται εδώ ως το επόμενο βήμα, σε συνέχεια της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία

Amsden, A.A. KIVA-3: A KIVA program with block-structured mesh for complex geometries, Los Alamos National Laboratory LA-12503-MS, 1993

Andreadis , P., Zompanakis, A., Chryssakis, C., Kaiktsis, L., Effects of fuel injection parameters on the performance and emissions in a large-bore marine diesel engine, Int J Engine Research 2011; 12(1):14-29

Baumgarten, C. Mixture formation in internal combustion engines, Springer Verlag, 2006

Bergeron, C.A., Hallett, W.L.H. Ignition characteristics of liquid hydrocarbon fuels as single droplets, Canadian J Chem Eng 1989; 67:142-149

Chryssakis, C., Kaiktsis, L. Evaluation of fuel spray atomization models for conditions applicable to large marine Diesel engines, ILASS-Europe 2008, Lake Como, Italy, September 2008

Fink, C., Buchholz, B., Niendorf, M., Harndorf, H. Injection spray analyses from medium speed engines using marine fuels, ILASS-Europe 2008, Lake Como, Italy, September 2008

Glassman, I. Combustion, San Diego: Academic Press, 3rd ed., 1996

Goldsworthy, L. Computational Fluid Dynamics modelling of residual fuel oil combustion in the context of marine diesel engines, Int J Engine Research, 7:181-199, 2006

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, Vail, Colorado, July 2009

Herrmann, K., Rotz, v.B., Schulz, R., Weisser, G., Boulouchos, K., Schneider, B. Reference data generation of spray characteristics in relation to large 2-stroke marine Diesel engines using a novel spray combustion chamber concept, ILASS-Europe 2010, Brno, Czech Republic, Sept. 2010

Herrmann, K., Rotz, v.B., Schulz, R., Weisser, G., Schneider, B., Boulouchos, K. A “spray combustion chamber” facility for investigations in relation to large 2-stroke marine Diesel engine combustion optimization, International Symposium on Marine Engineering, Kobe, Japan, Oct. 2011

International Maritime Organization, MARPOL 73/78 Annex VI: Prevention of air pollution from ships, August 2004

ISO 8217 Fourth Edition 2010-06-15 Petroleum products - Fuels (class F) - Specifications of marine fuels, 2010

Kong, S.-C., Han, Z., Reitz, R.D. The development and application of a diesel ignition and combustion model for multidimensional engine simulation, SAE Technical Paper Series 950278, SAE World Congress, Detroit, MI, February 1995

Kyriakides, N., Chryssakis, C., Kaiktsis, L. Influence of Heavy Fuel properties on spray atomization for marine Diesel engine applications, SAE Technical Paper Series 2009-01-1858, SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, Florence, Italy, June 2009

Lloyds Register, marine exhaust emission research programme, Phase II summary report, 1992

Pantazis, K., Chryssakis, C., Kaiktsis, L. Combustion modeling with Heavy Fuel Oil for large marine Diesel engine applications, Paper No. 236, CIMAC 2010, Bergen, Norway, June 2010

Ranz, W., Marshall, W. Evaporation from drops, Chem Eng Prog, 48:141-146,1952

Steenberg K., Forget S., The effects of a changing oil industry on marine fuel quality and how new and old analytical techniques can be used to ensure predictable performance in marine diesel engines, CIMAC Technical Paper No 198, Vienna 2007

Struckmeier D., Tajima H., Tsuru D. New application and modeling of low ignitability fuel for marine engines, Paper No. 117, CIMAC 2010, Bergen, Norway, June 2010

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, SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, San Antonio, Texas, November 2009

Tanner, F.X. Liquid jet atomization and droplet breakup modeling of non-evaporating diesel fuel sprays, SAE Technical Paper Series 970050, SAE World Congress, Detroit, MI, 1997

Tanner, F.X., Weisser, G. Simulation of liquid jet atomization for fuel sprays by means of a cascade drop breakup model, SAE Technical Paper Series 980808, SAE World Congress, Detroit, MI, 1998

Turns S.-R., An introduction to combustion: concepts and applications, McGraw-Hill Inc.; 1996

Varnavas C. A., A droplet evaporation model for high temperature and pressure spray applications, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994

Wauquier, J.-P., Crude oil petroleum products process flowsheets, p. 97, Editions Technip, IFP Publications; 1995

Weisser, G., Tanner, F., Boulouchos, K. Modeling of ignition and early flame development with respect to large diesel engine simulation, SAE technical paper 981451, 1998

Whitaker, S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles, AIChE Journal 1972;18(2): 361-371

Κυριακίδης Ν. Σ., Ανάπτυξη Μοντέλου Βαρέος Καυσίμου για Εφαρμογές Ναυτικών Κινητήρων Diesel, Διπλωματική Διατριβή, 2009

Πανταζής Κ., Ανάπτυξη Μοντέλου Καύσης Βαρέος Καυσίμου για Εφαρμογές Ναυτικών Κινητήρων Diesel, Διπλωματική Διατριβή, 2010

Σωτηρόπουλος, Β., Θερμοδυναμική των Μιγμάτων, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 1985.

Παράρτημα I: Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Όρια εκπομπών NO_x , στο μέγιστο φορτίο, σε g/kWh , συναρτήσει του ημερολογιακού έτους κατασκευής του κινητήρα και του αριθμού στροφών λειτουργίας του, σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO. Πηγή: Κ. Πανταζής, 2009.

Πίνακας 2 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (ROHR) με βάση πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα της εργασίας των Struckmeier et al. (2009). Στον πίνακα παρουσιάζονται επίσης χαρακτηριστικά δεδομένα για τον θάλαμο καύσης FIA και το πείραμα.

Πίνακας 3 Γεωμετρικά δεδομένα του θαλάμου VCVCC και και χαρακτηριστικά στοιχεία για τα πειράματα των Struckmeier et al. (2009).

Πίνακας 4 Πίνακας βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του τροποποιημένου μοντέλου καύσης χαρακτηριστικού χρόνου.

Πίνακας 5 Κατασκευαστικά στοιχεία του κινητήρα RT-flex58T-B.

Πίνακας 6 Πρόσημα τιμών των γωνιών έγχυσης α και β , όπως αυτές ορίζονται στην Εικόνα 33. Θετική τιμή της γωνίας α αντιστοιχεί σε έγχυση κατά τη φορά της εγκάρσιας συστροφής του αέρα εντός του κυλίνδρου.

Παράρτημα II: Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 Επί τοις εκατό επιτρεπόμενη περιεκτικότητα βαρέος ναυτιλιακού καυσίμου σε θείο συναρτήσει του ημερολογιακού έτους κατασκευής του κινητήρα, σε προστατευόμενες (Emission Control Areas – ECAs) και μη προστατευόμενες περιοχές, σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO. Πηγή: Κυριακίδης Ν., 2009.

Εικόνα 2 Φυσικές ιδιότητες δέκα διαφορετικών τύπων βαρέος καυσίμου που χρησιμοποιούνται σήμερα στη ναυτιλία, με βάση τον Παγκόσμιο Οργανισμό Πιστοποίησης (ISO, 2010).

Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας παραγωγής κλασμάτων πετρελαίου σε ένα σύγχρονο διυλιστήριο. Δύλιση σε ατμοσφαιρική πίεση. Πηγή: Κυριακίδης Ν., 2009.

Εικόνα 4 Κινηματικό ιξώδες ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και για καύσιμο HFO-residual (πηγή: Κυριακίδης, 2009).

Εικόνα 5 Επιφανειακή τάση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και για καύσιμο HFO-residual (Πηγή: Κυριακίδης, 2009).

Εικόνα 6 Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και καύσιμο HFO-residual.

Εικόνα 7 Τάση ατμών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για καύσιμο diesel και καύσιμο HFO-residual.

Εικόνα 8 Οπτικοποίηση του spray βαρέος καυσίμου στον θάλαμο VCVCC (Struckmeier et al., 2009). Οι σημειούμενες τιμές χρόνου (σε ms) είναι σε σχέση με την αρχή της έγχυσης.

Εικόνα 9 Σχηματική αναπαράσταση του παρόντος μοντέλου εξάτμισης σταγόνας βαρέος καυσίμου δύο συστατικών.

Εικόνα 10 Αριθμός Nusselt στη ροή αέρα γύρω από σφαιρικό σταγονίδιο συναρτήσει του αριθμού Reynolds όπως υπολογίζεται από τη χρήση των σχέσεων (18) και (19).

Εικόνα 11 Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος: Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$.

Εικόνα 12 Μελέτη ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων από το χρησιμοποιούμενο χρονικό βήμα (time step): Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$.

Εικόνα 13 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$. (a) Μεταβολή της σταθεράς C_{m22} , για $C_{m21}=0.2$. (b) Μεταβολή της σταθεράς C_{m21} , για $C_{m22}=0.2$.

Εικόνα 14 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά της ενέργειας ενεργοποίησης του ελαφρού συστατικού, E_{CUT} .

Εικόνα 15 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά του προεκθετικού παράγοντα του ελαφρού συστατικού, A_{CUT} .

Εικόνα 16 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά της ενέργειας ενεργοποίησης του βαρέος συστατικού, E_{RES} .

Εικόνα 17 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$: διαφοροποίηση αποκλειστικά του προεκθετικού παράγοντα του βαρέος συστατικού, A_{RES} .

Εικόνα 18 Εξάτμιση καυσίμου αποτελούμενου αποκλειστικά από βαρύ συστατικό ($\xi=0\%$) σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου: χρονική μεταβολή της συνολικά εξατμισμένης μάζας καυσίμου, όπως προβλέπεται από τη χρήση των σχέσεων (18) και (19) αντίστοιχα.

Εικόνα 19 Ατμοποίηση καυσίμου στον θάλαμο σταθερού όγκου FIA (πλήρωση με άζωτο αρχικών συνθηκών $p=45$ bar, $T=823$ K): χρονική μεταβολή της συνολικά εξατμισθείσας μάζας βαρέος καυσίμου περιεκτικότητας 0% και 20% κατά μάζα σε ελαφρύ συστατικό.

Εικόνα 20 Σύγκριση μονοσυστατικού και νέου (δύο συστατικών) μοντέλου ατμοποίησης βαρέος καυσίμου: ισοϋψείς καμπύλες συγκέντρωσης εξατμισμένου καυσίμου σε επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας της συσκευής VCVCC, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από την έναρξη της έγχυσης. Με μαύρο χρώμα διακρίνονται τα σταγονίδια της υγρής φάσης του καυσίμου. Στη δεξιά στήλη παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα οπτικοποίησης του spray (Struckmeier et al., 2009).

Εικόνα 21 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, και περιεκτικότητα σε ελαφρύ συστατικό $\xi = 20\%$. Ο υπολογισμός του αριθμού Nu στη ροή γύρω από σταγόνα καυσίμου βασίζεται στις σχέσεις (18) και (19).

Εικόνα 22 Χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR), για τον θάλαμο καύσης FIA, για διαφορετικές τιμές της περιεκτικότητας του βαρέος καυσίμου σε ελαφρύ συστατικό.

Εικόνα 23 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 5% σε ελαφρύ συστατικό.

Εικόνα 24 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 10% σε ελαφρύ συστατικό.

Εικόνα 25 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 20% σε ελαφρύ συστατικό.

Εικόνα 26 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης FIA, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης. Βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό.

Εικόνα 27 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα συμμετρίας του θαλάμου FIA. Εδώ, $\xi=30\%$, $t=9$ ms.

Εικόνα 28 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=3$ ms.

Εικόνα 29 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=9$ ms.

Εικόνα 30 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=15 \text{ ms}$.

Εικόνα 31 Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, ίσης με 0.002 gr/cm^3 , στον θάλαμο καύσης VCVCC, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό, για $t=21 \text{ ms}$.

Εικόνα 32 Αριστερή στήλη (υπολογιστικά αποτελέσματα): ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης VCVCC, σε επίπεδο διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε σχέση με την αρχή της έγχυσης, για βαρύ καύσιμο με περιεκτικότητα 30% σε ελαφρύ συστατικό. Δεξιά στήλη (πειραματικά αποτελέσματα): οπτικοποίηση της αντιδρώσας ροής (Struckmeier et al., 2009).

Εικόνα 33 Ορισμός γωνιών έγχυσης α και β , οι οποίες καθορίζουν την κατεύθυνση της έγχυσης από μία οπή του εγχυτήρα.

Εικόνα 34 Πειραματική και υπολογισθείσα μεταβολή της πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, στον κινητήρα RT-flex58T-B, για λειτουργία σε μερικό φορτίο, 25%. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λειτουργία με καύσιμο diesel, ενώ τα υπολογιστικά σε βαρύ καύσιμο με $\xi=20\%$.

Εικόνα 35 Πειραματική και υπολογισθείσα μεταβολή του αδιαστατοποιημένου ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, στον κινητήρα RT-flex58T-B, για λειτουργία σε μερικό φορτίο, 25%. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντιστοιχούν σε λειτουργία με καύσιμο diesel, ενώ τα υπολογιστικά σε βαρύ καύσιμο με $\xi=20\%$.

Εικόνα 36 Εξέλιξη της καύσης στον κινητήρα RT-flex58T-B, για λειτουργία σε μερικό φορτίο, 25%: ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας σε επιφάνεια σταθερής συγκέντρωσης εξατμισθέντος καυσίμου, σε διαφορετικές τιμές της γωνίας στροφάλου. Η επιφάνεια αντιστοιχεί στη στιγμιαία μέση τιμή της κατανομής της εν λόγω συγκέντρωσης.

Παράρτημα III: Ευρετήριο Μεταβλητών

A	προεκθετικός παράγοντας
C_{m2}	σταθερά του μοντέλου k-ε
$c_{p,vap}$	θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του εξάτμισθέντος καυσίμου (kJ/kg)
d_{drop}	διάμετρος σταγόνας (m)
$\frac{dm_{evap}}{dt}$	ρυθμός εξάτμισης μάζας από υγρή σταγόνα (kg/s)
E	ενέργεια ενεργοποίησης (kJ/mol)
f	συντελεστής βαρύτητας (-)
k	κινητική ενέργεια της τύρβης (m ² /s ²)
\overline{Nu}	αριθμός Nusselt για ροή αερίου γύρω από σφαιρική σταγόνα (-)
Pr	αριθμός Prandtl αέριας φάσης (-)
\dot{Q}_{drop}	θερμική ισχύς που προσδίδεται σε σταγόνα (W)
\dot{Q}_{evap}	θερμική ισχύς εξάτμισης (W)
$\dot{Q}_{heating}$	θερμική ισχύς θέρμανσης της υγρής φάσης σταγόνας (W)
r	τοπικός λόγο της μάζας των προϊόντων προς τη μάζα των αντιδρώντων (-)
R	παγκόσμια σταθερά αερίων (kJ/mol·K)
Re_D	αριθμός Reynolds για ροή αερίου γύρω από σφαιρική σταγόνα (-)
S	ειδική πυκνότητα (-)
t	χρόνος (s)
T_B	κανονικό σημείο βρασμού (K)
T_c	θερμοκρασία κρίσιμου σημείου (K)
T_R	θερμοκρασία στην επιφάνεια της σταγόνας (K)
T_∞	θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)
Y_m	κλάσμα μάζας στοιχείου m (-)
α	συντελεστής συναγωγής για ροή αερίου γύρω από σφαιρική σταγόνα (W/m ² ·K)
Δh_{evap}	λανθάνουσας θερμότητα ατμοποίησης (kJ/kg)
ε	ρυθμός σκέδασης της κινητικής ενέργειας της τύρβης (m ² /s ³)
λ_g	συντελεστής αγωγιμότητας αέριας φάσης (W/m·K)
μ	κινηματικό ιξώδες αέρα (kg/m·s)
ζ	κλάσμα μάζας ελαφρού συστατικού στο βαρύ καύσιμο (-)

ς	συντελεστής διόρθωσης για συνυπολογισμό της υπερθέρμανσης (-)
τ_{comb}	χαρακτηριστικός χρόνος καύσης (s)
τ_{lam}	χαρακτηριστικός χρόνος χημείας (s)
τ_{turb}	χαρακτηριστικός χρόνος τυρβώδους ανάμιξης (s)
χ	μοριακό κλάσμα ελαφρού συστατικού στο βαρύ καύσιμο (-)