



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος-Σάββας Κυριακίδης

Ανάπτυξη Μοντέλου Βαρέος Καυσίμου για Εφαρμογές Ναυτικών Κινητήρων Diesel

Εξεταστική επιτροπή:

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

Μέλη: Ν. Κυρτάτος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χρ. Παπαδόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση των σπουδών μου με την παρούσα διπλωματική εργασία στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων του Ε.Μ.Π., μού δίνεται η ευκαιρία να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν πρακτικά και πνευματικά.

Μεταξύ αυτών, ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή και τον Επιστημονικό Συνεργάτη κ. Χρ. Χρυσάκη, αφού χωρίς την καθοδήγηση και τη βοήθειά τους η ολοκλήρωση της παρούσας ερευνητικής δουλειάς θα ήταν αδύνατη. Επίσης, ευχαριστώ τον Διδάκτορα κ. Γ. Μπέλλο για τις πολύτιμες πληροφορίες αναφορικά με τις ιδιότητες του βαρέος καυσίμου, τις οποίες μού διέθεσε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ν. Κυρτάτο και τον Λέκτορα κ. Χρ. Παπαδόπουλο, ως διδάσκοντες και μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, και όλους τους φίλους και συναδέλφους μου για την άψογη συνεργασία και την ψυχική βοήθεια την οποία μού προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	2
Σύνοψη	5
Περιεχόμενα Κεφαλαίων.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....	7
1.1 Η ναυτιλία και οι νέοι κανονισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος.....	7
1.2 Σκοπός της παρούσας εργασίας.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βαρύ καύσιμο και διάσπαση δέσμης καυσίμου	10
2.1 Βαρύ καύσιμο	10
2.1.1 Γενικά στοιχεία για το βαρύ καύσιμο.....	10
2.1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή	10
2.1.3 Η απόσταξη του αργού πετρελαίου.....	12
2.2 Βασικές έννοιες spray καυσίμου.....	14
2.2.2 Στάδια διάσπασης.....	17
2.2.2.1 Πρωτογενής διάσπαση.....	18
2.2.2.2 Παραμόρφωση και αεροδυναμική αντίσταση σταγόνων	20
2.2.2.3 Δευτερογενής διάσπαση	23
2.2.3 Χρόνος διάσπασης.....	25
2.3 Βιβλιογραφική Επισκόπηση Μοντελοποίησης Βαρέος Καυσίμου	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ο κώδικας KIVA και τα μοντέλα καυσίμου	29
3.1 Ο κώδικας KIVA	29
3.2 Υπολογιστικό πλέγμα.....	30
3.3 Μοντέλα διάσπασης του spray	31
3.3.1 Το μοντέλο TAB (Taylor Analogy Breakup model).....	31
3.3.2 Το Μοντέλο E-TAB (Enhanced TAB model)	36
3.3.3 Το μοντέλο USB (Unified Spray Breakup model).....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ιδιότητες βαρέος καυσίμου και εισαγωγή τους στον κώδικα KIVA	40
4.1 Ιδιότητες του βαρέος καυσίμου	40
4.2 Υπολογισμός κρίσιμης θερμοκρασίας βαρέος καυσίμου.....	47
4.3 Στάδια δημιουργίας του νέου μοντέλου καυσίμου	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	52
5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	52

5.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση του μοντέλου E-TAB	53
5.1.1.1 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου για πίεση θαλάμου καύσης 30 bar	54
5.1.1.2 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου με πίεση θαλάμου καύσης 100 bar	56
5.1.1.3 Έλεγχος επίδρασης του χρονικού βήματος (timestep)	57
5.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο USB	59
5.1.2.1 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου για πίεση θαλάμου καύσης 30 bar	59
5.1.2.2 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου για πίεση θαλάμου καύσης 100 bar	61
5.1.2.3 Ταξινόμηση σταγόνων καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου σε περιοχές διάσπασης	62
5.1.2.4 Ταξινόμηση μεγέθους σταγόνων Diesel και βαρέος καυσίμου ..	65
5.1.2.5 Επίδραση της θερμοκρασίας έγχυσης του βαρέος καυσίμου στα χαρακτηριστικά του spray.....	67
5.1.3 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης για spray καυσίμου Diesel.....	69
5.1.3.1 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης με πίεση θαλάμου καύσης 30 bar	69
5.1.3.2 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης με πίεση θαλάμου καύσης 100 bar	71
5.1.4 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης για spray βαρέος καυσίμου.....	72
5.1.4.1 Σύγκριση μοντέλων για πίεση θαλάμου καύσης 30 bar	72
5.1.4.2 Σύγκριση μοντέλων για πίεση θαλάμου καύσης 100 bar	74
5.2 Έλεγχος της επίδρασης των παραμέτρων του μοντέλου E-TAB στη διάσπαση του spray	76
5.2.1.Επίδραση της επιφανειακής τάσης στην παραμόρφωση των σταγόνων.....	76
5.2.2.Επίδραση του δυναμικού ιξώδους στην παραμόρφωση των σταγόνων.....	77
5.3 Παραμετρική Ανάλυση	80
5.4 Σύγκριση μεγέθους σταγονιδίων των μοντέλων E-TAB και USB	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	92
6.1. Συμπεράσματα	92
6.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94
Παράρτημα 1: Τροποποιήσεις στον κώδικα KIVA για την εισαγωγή των ιδιοτήτων του βαρέος καυσίμου.....	97

Σύνοψη

Τα 2/3 των εμπορικών πλοίων χρησιμοποιούν βαρύ καύσιμο (Heavy Fuel Oil, HFO) για την κίνησή τους. Η κακή ποιότητα του βαρέος καυσίμου, λόγω της υψηλής ποσότητας σε θείο και των μεγάλων τιμών πυκνότητας και ιξώδους, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση αναφορικά με τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, καθιστά αναγκαία τη μελέτη της λειτουργίας των σύγχρονων ναυτικών μηχανών με χρήση βαρέος καυσίμου.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετάται η επίδραση των χαρακτηριστικών του βαρέος καυσίμου στη ροή του spray, σε συνθήκες αντιπροσωπευτικές ναυτικών κινητήρων Diesel. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση εργαλείων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου, και εισήχθη στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις της ροής του spray σε θάλαμο σταθερού όγκου, υπό συνθήκες υψηλής πίεσης, για βαρύ καύσιμο και για καύσιμο Diesel. Εν προκειμένω, θεωρήθηκαν δύο διαφορετικά προφίλ έγχυσης, και δύο μεγέθη ακροφυσίων, αντιπροσωπευτικά αργόστροφων και μεσόστροφων ναυτικών κινητήρων. Για την περιγραφή της διάσπασης του spray έγινε χρήση των μοντέλων E-TAB (Enhanced Taylor Analogy Breakup model) και USB (Unified Spray Breakup model).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεικνύουν ότι το μήκος διείδυσης του spray είναι παρόμοιο για βαρύ καύσιμο και για καύσιμο Diesel. Αναφορικά με το μέγεθος των σταγονιδίων, το spray βαρέος καυσίμου χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερα σταγονίδια σε σύγκριση με το spray καυσίμου Diesel. Τα παρόντα υπολογιστικά αποτελέσματα συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με αντίστοιχα πειραματικά της βιβλιογραφίας.

Περιεχόμενα Κεφαλαίων

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στο παγκόσμιο ενδιαφέρον για την περιβαλλοντική προστασία του πλανήτη, και στην επιτακτική ανάγκη μείωσης των εκπομπών ρύπων από τους ναυτικούς κινητήρες. Επίσης, παρουσιάζονται οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή της χρήσης του βαρέος καυσίμου στη ναυτιλία, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του, και αναλύονται οι βασικές αρχές που διέπουν τη ροή spray καυσίμου.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, καθώς και στα δύο μοντέλα διάσπασης του spray, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου, και περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του νέου μοντέλου βαρέος καυσίμου, και την υλοποίηση των αριθμητικών υπολογισμών σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία, και γίνεται σε αναφορά σε μελλοντικά βήματα με στόχο την πληρέστερη κατανόηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του βαρέος καυσίμου στη θερμορευστομηχανική των ναυτικών κινητήρων Diesel.

Τέλος, στο Παράρτημα 1 παρουσιάζονται όλες οι αλλαγές που έγιναν στον κώδικα KIVA, προκειμένου να εισαχθεί το νέο μοντέλο βαρέος καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Η ναυτιλία και οι νέοι κανονισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος

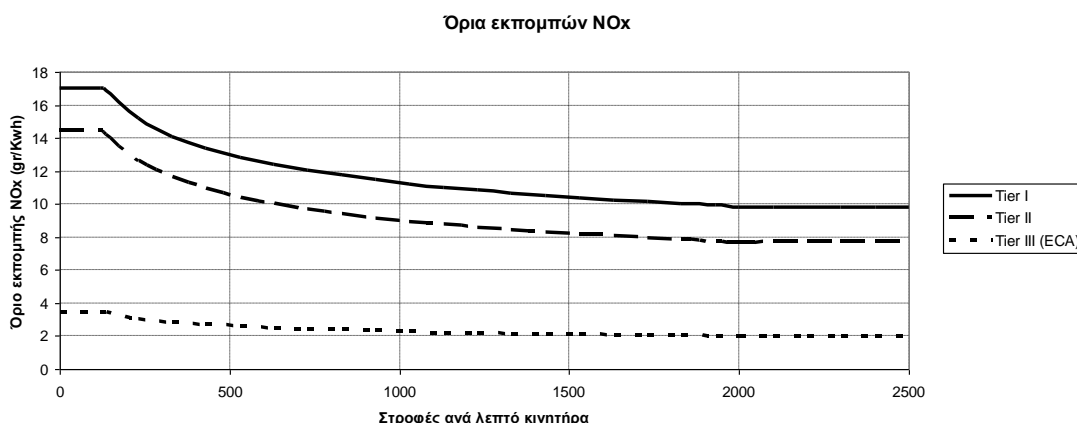
Η εξέλιξη των ναυτικών κινητήρων την τελευταία δεκαετία έχει επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από το παγκόσμιο ενδιαφέρον των κρατικών και διεθνών ναυτιλιακών οργανισμών για την προστασία του περιβάλλοντος. Για τον σκοπό αυτό έχουν θεσπιστεί ορισμένοι κανονισμοί, οι οποίοι στοχεύουν στον περιορισμό των ρύπων που προέρχονται από τα πλοία.

Πιο συγκεκριμένα, το 2002 η Ευρωπαϊκή Ένωση πρότεινε μία σειρά μέτρων για τη μείωση της εκπομπής ρύπων από πλοία που προσεγγίζουν ευρωπαϊκά λιμάνια [1].

Σε διεθνές επίπεδο, ο κανονισμός της MARPOL (MARine POLLution), ο οποίος υιοθετήθηκε από τον οργανισμό IMO (International Maritime Organisation) θέτει όρια στις εκπομπές στις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) και οξειδίων του αζώτου (NO_x). Επιπρόσθετα, επιβάλλει αυστηρότερους κανονισμούς, όσον αφορά στις παράκτιες περιοχές και στις περιοχές κοντά σε λιμάνια (Emission Controlled Areas, ECAs). [2].

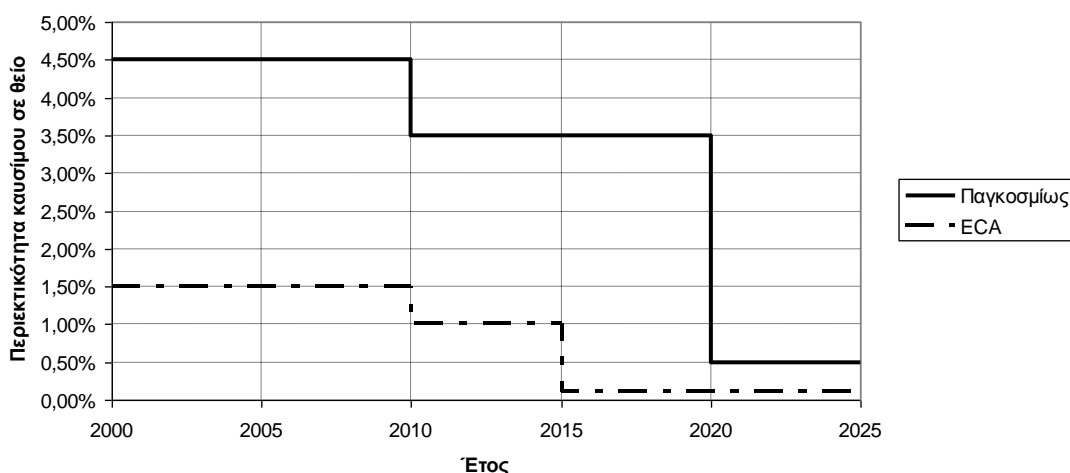
Σε συμφωνία με τους παραπάνω κανονισμούς, η επιτροπή για την Προστασία του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environment Protection) κατέληξε, τον Απρίλιο του 2008, σε τρία επίπεδα κανονισμών (Tiers) για τους νέους κινητήρες. Ανάλογα με τη χρονολογία κατασκευής τους, οι κινητήρες θα πρέπει να είναι συμβατοί με το αντίστοιχο επίπεδο κανονισμών, βλ. Διαγράμματα 1, 2. Από τα Διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι τα όρια είναι ελαστικότερα για τους αργόστροφους κινητήρες ($RPM < 130$), ενώ γίνονται αυστηρότερα για μεσόστροφους και ταχύστροφους. Προς το παρόν δεν έχουν ανακοινωθεί κανονισμοί για τον περιορισμό των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης (soot), αλλά αναμένονται στο άμεσο μέλλον.

Αξίζει επίσης να τονιστεί η δραστική μείωση των ορίων του θείου, που αφορά στις περιοχές ECA. Η περιεκτικότητα καυσίμου σε θείο θα μειωθεί στο 0,1% μέχρι το 2025.



Διάγραμμα 1: Κανονισμοί εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) για ναυτικούς κινητήρες, σύμφωνα με τον οργανισμό IMO: επιτρεπόμενα όρια σε g/kWh, σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε στροφές ανά λεπτό.

Περιεκτικότητα καυσίμου σε θείο



Διάγραμμα 2: Επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε θείο καυσίμου για ναυτικούς κινητήρες, σε συνάρτηση με το ημερολογιακό έτος, σύμφωνα με τον οργανισμό IMO.

Για τους ναυτικούς κινητήρες Diesel, η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), το οποίο συντελεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, είναι αναπόφευκτη. Ωστόσο, λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης πρόωσης, η εκπομπή ανά μονάδα ισχύος είναι σχετικά μικρή. Επίσης, η εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα (CO) είναι πολύ μικρή, διότι οι κινητήρες Diesel λειτουργούν με περίσσεια αέρα [3].

Οι σημαντικότεροι ρύποι ναυτικών κινητήρων Diesel είναι τα οξείδια του αζώτου (μονοξείδιο και διοξείδιο του αζώτου - NO_x) και τα σωματίδια της αιθάλης (soot ή Particulate Matter, PM). Επιπρόσθετοι ρύποι είναι οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) και τα οξείδια του θείου (SO_x). Οι εκπομπές ρύπων συμβάλλουν στη θέρμανση του πλανήτη (φαινόμενο του θερμοκηπίου), στον σχηματισμό όξινης βροχής και αιθαλομίχλης (νέφος), και αποτελούν αιτίες για προβλήματα υγείας του ανθρώπινου οργανισμού, όπως αναπνευστικά και κυκλοφορικά προβλήματα, και καρκινογένεσεις. Αξιοσημείωτο είναι ότι η εκπομπή NO_x από ναυτικούς κινητήρες αναλογεί στο 15% της συνολικής παγκόσμιας έκλυσης NO_x από την ανθρώπινη δραστηριότητα [4].

Στο πλαίσιο της συμμόρφωσης με τους εκάστοτε κανονισμούς, οι κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων, αλλά και η πανεπιστημιακή κοινότητα, διεξάγουν έρευνα για νέους τρόπους βελτίωσης των κινητήρων. Σε αυτή την κατεύθυνση, η αριθμητική προσομοίωση των διεργασιών ροής και καύσης στους κινητήρες Diesel με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) αποτελεί σήμερα ένα βασικό εργαλείο. Στόχος είναι η επίτευξη βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας, οι οποίες οδηγούν σε ελαχιστοποίηση των εκπεμπόμενων ρύπων, χωρίς ταυτόχρονη μείωση του βαθμού απόδοσης (ισοδύναμα: χωρίς αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου).

1.2 Σκοπός της παρούσας εργασίας

Σχεδόν τα 2/3 των πλοίων του παγκοσμίου στόλου χρησιμοποιούν βαρύ καύσιμο για την κίνησή τους. Η μεγάλη διαφορά στις φυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου σε σχέση με το καύσιμο Diesel καθιστά αναγκαία την ανάλυση και μελέτη

της επίδρασης των εν λόγω ιδιοτήτων στη ροή και την καύση στις σύγχρονες ναυτικές μηχανές.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού ήταν απαραίτητη η δημιουργία ενός νέου μοντέλου καυσίμου, το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό του βαρέος καυσίμου. Γενικά, το βαρύ καύσιμο χαρακτηρίζεται από μεγάλο ιξώδες, καθώς και μεγάλη πυκνότητα και υψηλή επιφανειακή τάση, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διάσπαση των σταγόνων του spray.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, δημιουργήθηκε νέο μοντέλο βαρέος καυσίμου, το οποίο εγκαταστάθηκε στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA. Το μοντέλο ελέγχθηκε για συνθήκες υψηλής πίεσης σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου. Εν προκειμένω, έγινε χρήση δύο διαφορετικών μοντέλων διάσπασης spray, και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά της βιβλιογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βαρύ καύσιμο και διάσπαση δέσμης καυσίμου

2.1 Βαρύ καύσιμο

2.1.1 Γενικά στοιχεία για το βαρύ καύσιμο

Το βαρύ καύσιμο συναντάται συχνά και με τον όρο μαζούτ, και σε συνήθειες συνθήκες θερμοκρασίας είναι μαύρο και παχύρρευστο [5]. Πρόκειται για υπόλειμμα της απόσταξης του αργού πετρελαίου, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προϊόντα του αργού πετρελαίου, τα οποία είναι αποστάγματα. Είναι το προϊόν του διωλιστηρίου με τη χαμηλότερη τιμή πώλησης. Οι προδιαγραφές της αγοράς θέτουν περιορισμούς κυρίως στο ιξώδες και στην περιεκτικότητα σε θείο.

Για την παρασκευή του μαζούτ χρησιμοποιούνται τα βαριά υπολείμματα από όλες τις διεργασίες. Στα σύγχρονα διωλιστήρια το υπόλειμμα ατμοσφαιρικής απόσταξης είναι σπάνιο, επειδή υφίσταται περαιτέρω διεργασίες για την αύξηση της παραγωγής λευκών προϊόντων. Το υπόλειμμα της απόσταξης υπό κενό είναι πολύ βαρύ, και δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές της αγοράς ελαφρών πετρελαιοειδών ή ναυτικών καυσίμων. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται εν μέρει με ιξωδόλυση των βαρέων υπολειμμάτων. Η πλέον συνήθης τακτική, όμως, είναι η ανάμιξη των βαρέων υπολειμμάτων με ελαφρά συστατικά, ώστε το τελικό προϊόν να έχει το επιθυμητό ιξώδες. Προτιμάται η χρήση gasoil που προέρχονται από πυρολυτικές διεργασίες, λόγω της κακής τους ποιότητας για την παραγωγή Diesel. Για λόγους ασφαλείας, αποκλείεται η χρήση ελαφρών συστατικών, της κλάσης της βενζίνης και της κηροζίνης.

Επειδή το κόστος αποθείωσης των υπολειμμάτων είναι πολύ υψηλό και η τιμή του τελικού προϊόντος χαμηλή, χρησιμοποιείται για την παρασκευή μαζούτ υπόλειμμα απόσταξης αργού πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

2.1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το βαρύ καύσιμο είχε ξεκινήσει να χρησιμοποιείται για την κίνηση των πλοίων [6]. Αρχικά δοκιμάστηκε σε ένα πλοίο του βρετανικού Πολεμικού Ναυτικού, σε μία προσπάθεια να αντικαταστήσει το κάρβουνο στους λέβητες. Λίγο αργότερα χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο σε πλοία με ατμομηχανές.

Σύντομα, όμως, αποδείχθηκε ότι η μηχανή Diesel ήταν πολύ πιο αποδοτική, και, με τη βελτίωση της αξιοπιστίας της, αυτή κατάφερε να αντικαταστήσει την ατμομηχανή στα εμπορικά πλοία. Αρχικά οι μηχανές Diesel έκαίγαν αποστάγματα του αργού πετρελαίου. Στα τέλη του 1940 ο John Lamb απέδειξε πως ήταν δυνατή η χρήση βαρέος καυσίμου, όταν το δοκίμασε σε ορισμένα tankers της Shell. Η χρήση του όμως σε κινητήρες Diesel απαιτούσε ορισμένες τροποποιήσεις στο σύστημα προετοιμασίας καυσίμου και στη μηχανή: κατ' αρχάς απαιτούνταν θέρμανση του καυσίμου προκειμένου να μειωθεί το ιξώδες του, και να είναι δυνατή η άντληση και ο ψεκασμός του. Επίσης, ήταν απαραίτητη η χρήση δεξαμενής καθίζησης πετρελαίου

και φυγοκέντριση για την απομάκρυνση του νερού και των ιζημάτων. Ακόμη, εκείνη την εποχή τα καύσιμα περιείχαν υπολείμματα θερμικής πυρόλυσης από τον καταλύτη θερμικής πυρόλυσης της Shell στο Curacao της Καραϊβικής. Έως και τη δεκαετία του 1950 αντιμετωπιζόνταν προβλήματα που αφορούσαν στην έλλειψη σταθερότητας του βαρέος καυσίμου, γεγονός που έδωσε το κίνητρο για τη μελέτη της χημείας του προβλήματος.

Με το πέρασμα των δεκαετιών, ολοένα περισσότερες μηχανές Diesel έκαναν χρήση βαρέος καυσίμου. Προβλήματα από τη χρήση του βαρέος καυσίμου εξακολουθούσαν να υπάρχουν, έδειχναν όμως να είναι αντιμετωπίσιμα.

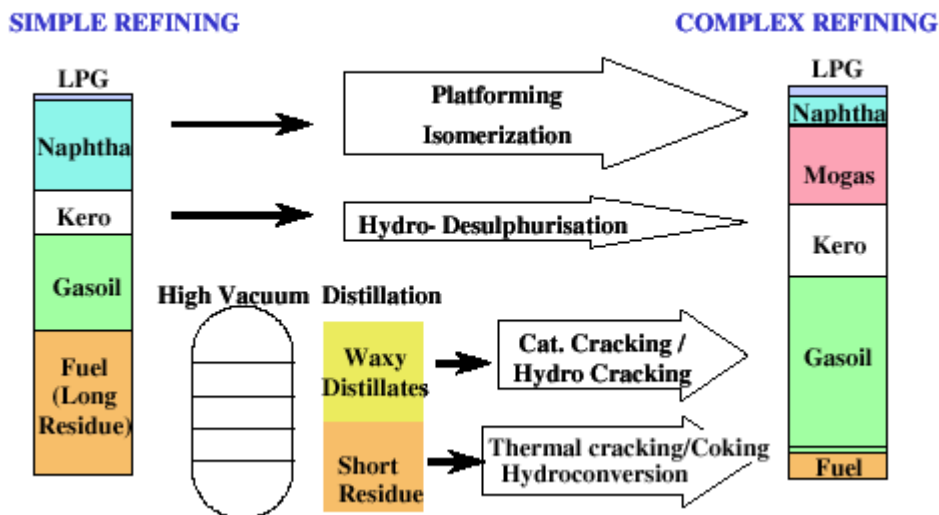
Μόνο μετά τις κρίσεις πετρελαίου του 1970 έλαβε χώρα μία δραματική αλλαγή στη ναυτιλία. Η αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου ανάγκασε τα διυλιστήρια να παράγουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερες ποσότητες distillate product από μία δεδομένη ποσότητα αργού πετρελαίου. Αυτό είχε ως συνέπεια τη ραγδαία αύξηση του αριθμού των μονάδων θερμικής και καταλυτικής μετατροπής στα διυλιστήρια όλου του κόσμου. Η τιμή των καυσίμων εκείνη την εποχή είχε αυξηθεί από τα 30 δολάρια/τόνο στα 200 δολάρια/τόνο. Αυτή η τεράστια αύξηση της τιμής των καυσίμων σήμανε και το τέλος εποχής για τα ατμόπλοια, τα οποία είχαν επιζήσει έως τότε χάρη στο χαμηλό κόστος των καυσίμων, στο υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας τους και στο χαμηλό κόστος συντήρησης. Το τέλος της δεκαετίας του 1970 και οι αρχές της δεκαετίας του 1980 βρήκαν πολλά ατμόπλοια να δημιουργούν ουρές έξω από τα διαλυτήρια πλοίων.

Με την αύξηση του αριθμού των πλοίων που χρησιμοποιούσαν βαρύ καύσιμο, αυξήθηκαν και τα λειτουργικά προβλήματα. Η τιμή της πυκνότητας του καυσίμου έφτανε τα 0,991 Kg/lt στους 15°C, γεγονός που προκαλούσε προβλήματα στη λειτουργία των συσκευών φυγοκεντρικού καθαρισμού.

Η έλλειψη προδιαγραφών για τα καύσιμα της ναυτιλίας, σε συνδυασμό με τα προβλήματα που αντιμετωπιζόνταν, οδήγησε στην έκδοση των πρώτων προδιαγραφών για ναυτικά καύσιμα το 1982, με τίτλο «Προδιαγραφές καυσίμων πετρελαίου για ναυτικούς κινητήρες και λέβητες». Αυτές εκδόθηκαν από το «Βρετανικό Ινστιτούτο Προτύπων» (“British Standards Institution”), ενώ οι πρώτες διεθνείς προδιαγραφές (ISO 8217) εκδόθηκαν το 1987 [6].

Αυτή την περίοδο η ναυτική βιομηχανία αντιμετώπισε τα πρώτα προβλήματα έναυσης του καυσίμου, τα οποία επηρέασαν κυρίως τα πλοία που στράφηκαν από καύσιμα distillate σε βαρύ καύσιμο με χαμηλότερο όμως ιξώδες. Τα προβλήματα που αντιμετώπισαν αρκετά πλοία εκείνη την εποχή κατέληγαν ακόμη και στην καταστροφή των μηχανών τους. Αυτό το γεγονός οδήγησε τη Shell στη δημιουργία ενός προγράμματος έρευνας και εξέλιξης, το οποίο αποσκοπούσε στην κατανόηση των λόγων που προκαλούσαν τα συγκεκριμένα προβλήματα. Αποτέλεσμα αυτού του προγράμματος ήταν η εισαγωγή του δείκτη αρωματικότητας (CCAI), ο οποίος αναλύεται στην παράγραφο 4.1.

Τη δεκαετία του 1980 η διεθνής νομοθεσία για το περιβάλλον επηρέασε τον τρόπο λειτουργίας των διυλιστηρίων, τα οποία αναγκάστηκαν να τροποποιήσουν κατάλληλα τις μονάδες τους. Η θερμική πυρόλυση εγκαταλείφθηκε, και τη θέση της πήρε η απόσταξη υπό κενό. Το αποτέλεσμα αυτών των αλλαγών ήταν η αλλαγή στην ποσότητα του κάθε προϊόντος. Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι διεργασίες διύλισης και τα τελικά προϊόντα. Όπως φαίνεται, η ποσότητα του βαρέος καυσίμου μειώθηκε αισθητά, μετά από περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση διύλισης πετρελαίου με νέες τεχνικές [6].

Το βαρύ καύσιμο χαρακτηρίζεται από πολύ περισσότερα αρωματικά στοιχεία και χαμηλότερη ευστάθεια. Με την αύξηση της αρωματικότητας αυξάνει η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου. Όταν η θερμοκρασία της αυτανάφλεξης του καυσίμου αυξηθεί, πλησιάζοντας τα επίπεδα της θερμοκρασίας στην περιοχή του Άνω Νεκρού Σημείου, τότε η μηχανή θα έχει πρόβλημα στην ανάφλεξη.

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1990 παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση των προβλημάτων που αφορούσαν σε καύσιμα που κατά γενική ομολογία πληρούσαν τις προϋποθέσεις του ISO 8217. Το 2002 και το 2003 παρατηρήθηκαν επίσης κάποια σοβαρά προβλήματα, τα οποία οδήγησαν σε έναν λεπτομερέστερο δειγματοληπτικό έλεγχο καυσίμων σε ορισμένα λιμάνια [6].

2.1.3 Η απόσταξη του αργού πετρελαίου

Σε ένα σύγχρονο διυλιστήριο πετρελαίου λαμβάνει χώρα ένα μεγάλο πλήθος διεργασιών που έχουν στόχο να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή καυσίμων και πρώτων υλών με τον πλέον οικονομικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις της εκάστοτε νομοθεσίας αναφορικά με βελτιωμένα καύσιμα, καθώς και με την προστασία του περιβάλλοντος.

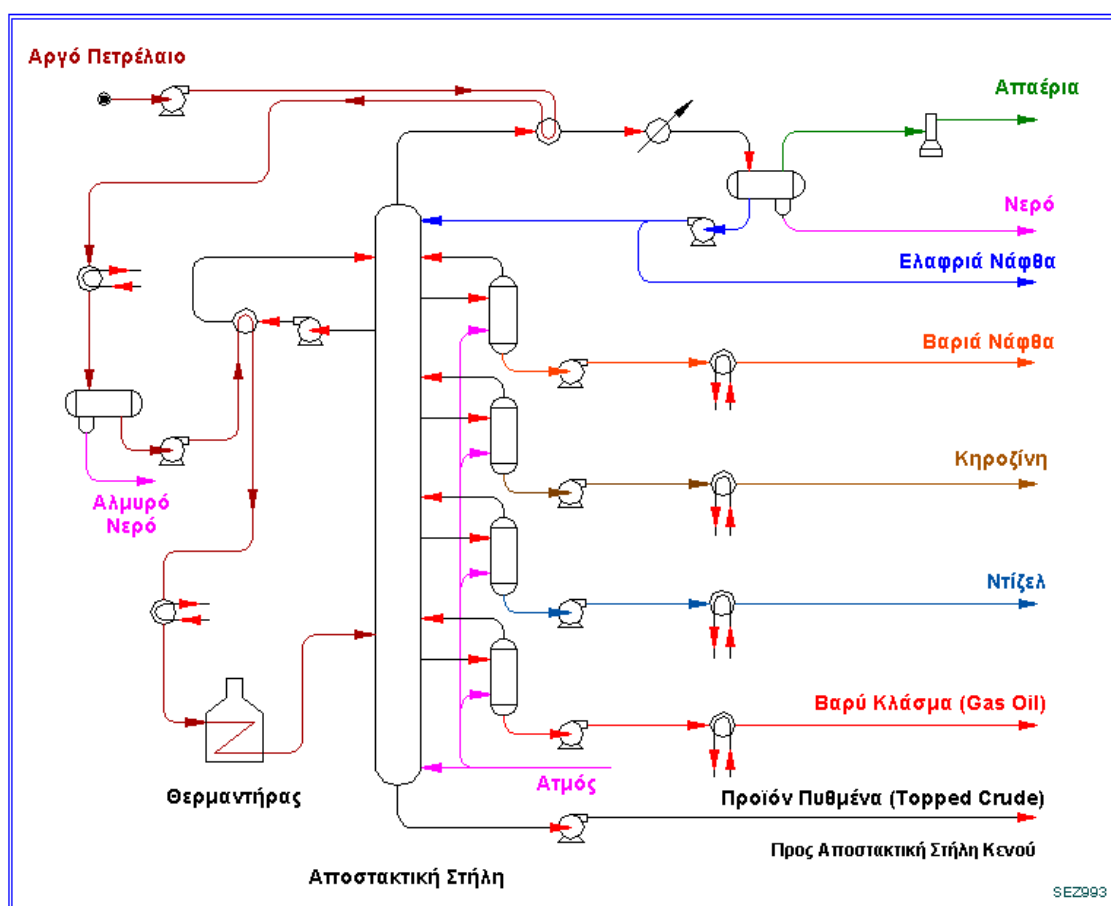
Στις αποστακτικές στήλες του αργού πετρελαίου λαμβάνουν χώρα οι κυριότερες διεργασίες ενός διυλιστηρίου. Οι στήλες αυτές χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό του αργού πετρελαίου σε κλάσματα, ανάλογα με το σημείο βρασμού τους (Σχήμα 2).

Απόδοση και οικονομία επιτυγχάνονται εάν η απόσταξη του αργού πετρελαίου γίνει σε δύο στάδια. Πρώτα, η απόσταξη του συνόλου του αργού πετρελαίου γίνεται πρακτικά σε ατμοσφαιρική πίεση, και κατόπιν το κλάσμα πυθμένος της ατμοσφαιρικής στήλης (ρεύμα με υψηλό σημείο βρασμού) τροφοδοτεί μια δεύτερη στήλη, η οποία λειτουργεί σε υψηλό κενό (χαμηλή πίεση).

Η στήλη κενού απαιτείται διότι ο θερμικός διαχωρισμός των βαρέων κλασμάτων σε ατμοσφαιρική πίεση απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες. Σε αυτές όμως τις θερμοκρασίες, λαμβάνει χώρα παράλληλα και θερμική διάσπαση των κλασμάτων αυτών, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των προϊόντων και την απώλεια υδρογονανθράκων. Η θερμοκρασία βρασμού (σημείο βρασμού) ελαττώνεται με την

ελάττωση της (συνολικής ή μερικής) πίεσης. Έτσι, τα βαρύτερα κλάσματα στη στήλη κενού βράζουν σε μικρότερη θερμοκρασία, και αποφεύγεται η θερμική τους διάσπαση. Όμοια δράση έχει και η προσθήκη ατμού στη στήλη.

Πριν εισέλθει στην ατμοσφαιρική στήλη, το αργό πετρέλαιο προθερμαίνεται σε μια σειρά από εναλλάκτες θερμότητας στους 288 °C με θερμική εναλλαγή, με τα προϊόντα και τα ρεύματα επαναροής της στήλης. Στη συνέχεια, το αργό πετρέλαιο θερμαίνεται σε φούρνο-κλίβανο (direct-fire-furnace) στους 343 - 400 °C, και στη συνέχεια τροφοδοτεί την ατμοσφαιρική στήλη. Η θερμοκρασία εξόδου του αργού πετρελαίου από τον φούρνο είναι αρκετά υψηλή, ώστε να έχουν ατμοποιηθεί όλα τα προϊόντα που αφαιρούνται πάνω από τον δίσκο τροφοδοσίας, και ένα 10-20% επιπλέον από τα προϊόντα πυθμένα.



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση τυπικής διεργασίας απόσταξης του αργού πετρελαίου [34].

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2, μετά την απόσταξη του αργού πετρελαίου, τα παραγόμενα καύσιμα διακρίνονται σε έξι κατηγορίες, ανάλογα με το σημείο βρασμού, τη σύνθεση και τη λειτουργία τους. Το σημείο βρασμού (που κυμαίνεται από 175 μέχρι 600°C), το ιξώδες και το μήκος της αλυσίδας ανθράκων (που περιλαμβάνει από 20 μέχρι 70 άτομα άνθρακα) αυξάνουν με την αύξηση του αριθμού της κατηγορίας του καυσίμου. Αντίθετα, η τιμή του προϊόντος μειώνεται, καθώς το καύσιμο γίνεται βαρύτερο. Πιο συγκεκριμένα:

- Η ελαφριά και η βαριά νάφθα, όπως επίσης και η κηροζίνη χαρακτηρίζονται ως ελαφρά καύσιμα ή απλώς ως αποστάγματα.

- Το βαρύ κλάσμα και το προϊόν πυθμένα είναι τα υπολείμματα της απόσταξης, και χαρακτηρίζονται ως βαριά καύσιμα.
- Τέλος, το καύσιμο Diesel είναι ένα καύσιμο ενδιάμεσου βάρους.

2.2 Βασικές έννοιες spray καυσίμου

Ο ψεκασμός του καυσίμου και τα χαρακτηριστικά του σχηματιζόμενου spray παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις μηχανές εσωτερικής καύσης, γιατί επιδρούν στην ανάμιξη του υγρού καυσίμου με τον αέρα καθώς και στη διαθέσιμη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, η οποία είναι ρυθμιστικός παράγοντας της εξάτμισης και της καύσης του καυσίμου [7].

Στους κινητήρες, είναι επιθυμητή η γρήγορη διάσπαση των σταγόνων καυσίμου σε πολλές μικρότερες θυγατρικές, με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας επαφής του καυσίμου με τον θερμό συμπιεσμένο αέρα. Η επίτευξη μεγάλης επιφάνειας διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα προς το καύσιμο, διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται η γρήγορη ατμοποίηση του καυσίμου, η ανάμιξή του με τον αέρα, και κατ' επέκταση η καύση του.

Τα παραπάνω γίνονται κατανοητά με το ακόλουθο παράδειγμα: εάν μία σταγόνα διασπαστεί σε δύο θυγατρικές, η επιφάνεια θα αυξηθεί κατά 28%. Αντίθετα, εάν η αρχική σταγόνα διασπαστεί σε 1000 θυγατρικές, τότε η επιφάνεια θα αυξηθεί 1000%. Αυτό αποδεικνύεται ως εξής:

Περίπτωση Α: Διάσπαση αρχικής σταγόνας σε δύο θυγατρικές

Αν V_0 και R ο όγκος και η ακτίνα της αρχικής σταγόνας αντίστοιχα και V_1 και r ο όγκος και η ακτίνα των θυγατρικών σταγόνων, τότε θα ισχύει η σχέση:

$$V_1 = \frac{4}{3} * \pi * r^3 \rightarrow V_0 = 2 * V_1.$$

$$\text{Δηλαδή, } \frac{4}{3} * \pi * R^3 = 2 * \frac{4}{3} * \pi * r^3 \rightarrow r^3 = \frac{R^3}{2} \rightarrow r = \frac{R}{\sqrt[3]{2}} \rightarrow r = 0.79 * R.$$

Εάν επίσης συμβολίσουμε με A_0 την επιφάνεια της πατρικής σταγόνας και με A_1 την επιφάνεια της κάθε μίας θυγατρικής, τότε θα ισχύει ότι:

$$A_1 = 4 * \pi * r^2 \rightarrow A_1 = 0.64 * A_0. \text{ Τελικά οι δύο θυγατρικές σταγόνες θα έχουν επιφάνεια ίση με: } 2 * A_1 = 1.28 * A_0, \text{ δηλαδή } 28\% \text{ μεγαλύτερη από την αρχική επιφάνεια της πατρικής σταγόνας.}$$

Περίπτωση Β: Διάσπαση αρχικής σταγόνας σε 1000 θυγατρικές

Ομοίως με την περίπτωση Α, θα ισχύει ότι:

$$V_0 = 1000 * V_1 \rightarrow$$

$$\frac{4}{3} * \pi * R^3 = 1000 * \frac{4}{3} * \pi * r^3 \rightarrow r^3 = \frac{R^3}{1000} \rightarrow r = \frac{R}{\sqrt[3]{1000}} \rightarrow r = 0.1 * R.$$

Τελικά, η επιφάνεια μίας θυγατρικής σταγόνας θα είναι:

$$A_1 = 4 * \pi * r^2 \rightarrow A_1 = 0.01 * A_0, \text{ οπότε η συνολική επιφάνεια και των } 1000 \text{ θυγατρικών σταγόνων θα είναι: } 1000 * A_1 = 10 * A_0, \text{ δηλαδή } 1000\% \text{ μεγαλύτερη από αυτή της πατρικής σταγόνας.}$$

Ιδιαίτερα σε κινητήρες άμεσου ψεκασμού, όπου το καύσιμο ψεκάζεται απευθείας στον θάλαμο καύσης για να δημιουργήσει ένα αναφλέξιμο μίγμα, η

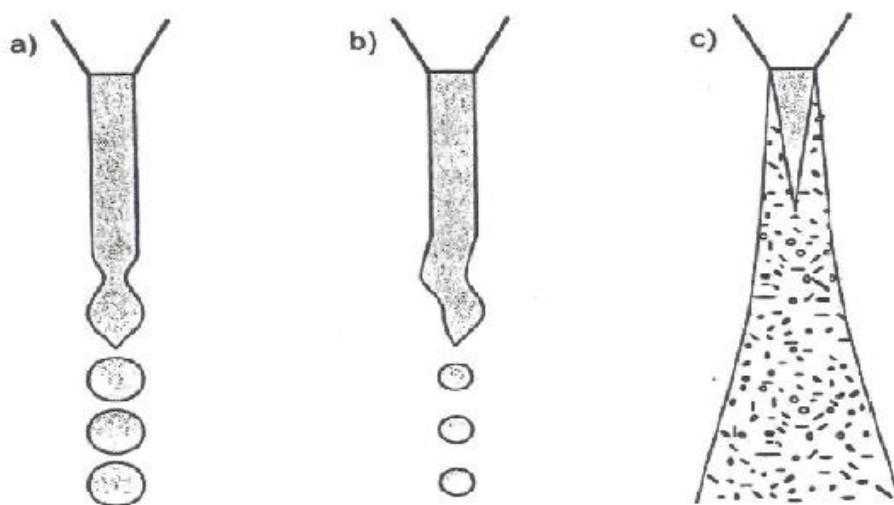
διάσπαση της δέσμης καυσίμου αποτελεί ένα ισχυρό μέτρο ελέγχου της διεργασίας της καύσης. Η κινητική ενέργεια του spray αντιπροσωπεύει την κύρια πηγή δημιουργίας τύρβης στον θάλαμο καύσης, συνεπώς επηρεάζει την ανάμιξη αέρα-καυσίμου, όπως επίσης και την ταχύτητα της φλόγας προανάμιξης.

Επίσης, το spray επηρεάζει σημαντικά την καθυστέρηση έναυσης, την έκλυση θερμότητας (heat release), και επομένως τα επίπεδα θορύβου, την κατανάλωση καυσίμου και τη σύνθεση των καυσαερίων του κινητήρα. Συνεπώς, η ανάγκη κατανόησης των ιδιοτήτων του spray είναι ιδιαίτερα έντονη.

Ταυτόχρονα, όμως, τα φαινόμενα των spray είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα, διότι οι σταγόνες του υγρού καυσίμου αλληλεπιδρούν με διάφορους τρόπους με την τυρβώδη αέρια φάση αλλά και με τη φλόγα. Επιπρόσθετα, η δυσκολία προσέγγισης και ανάλυσης των συνθηκών που επικρατούν μέσα στον θάλαμο καύσης είναι μεγάλη. Για αυτό ακριβώς τον λόγο έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα που περιγράφουν τους μηχανισμούς διάσπασης του spray και δίνουν τη δυνατότητα ανάλυσής τους σε βάθος. Η ανάπτυξη των μοντέλων spray είναι μεγάλη κατά τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας και της αλματώδους ανάπτυξης της τεχνολογίας των υπολογιστών.

2.2.1 Περιοχές του spray

Ένα spray μπορεί να διασπαστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τις ιδιότητες του καυσίμου και τις συνθήκες έγχυσής του [7]. Οι τρεις δυνατοί τρόποι διάσπασης ενός spray παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση των τριών τρόπων διάσπασης ενός spray: a) διάσπαση Rayleigh, b) ανεμογενής διάσπαση και c) κωνική διάσπαση.

Σε περιπτώσεις που το καύσιμο εγχύεται με πολύ χαμηλή ταχύτητα, παρατηρείται η διάσπαση Rayleigh (Σχήμα 3 α), η οποία εξαρτάται από τις δυνάμεις αδράνειας που ασκούνται στο υγρό, όπως επίσης και από την τιμή της επιφανειακής τάσης. Το μήκος της διάσπασης, το οποίο καθορίζει το σημείο όπου λαμβάνει χώρα η διάσπαση του spray, είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της διαμέτρου του ακροφυσίου. Στη διάσπαση Rayleigh, παρατηρείται μεγάλο μήκος διάσπασης, ενώ οι σταγόνες που προκύπτουν από τη διάσπαση έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του ακροφυσίου.

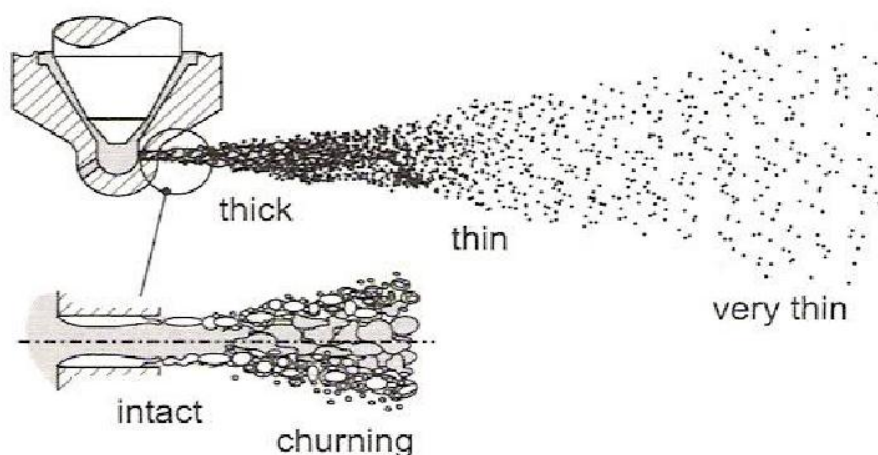
Στην ανεμογενή διάσπαση (Σχήμα 3 β), οι αεροδυναμικές δυνάμεις στη διαπιφάνεια με την αέρια φάση γίνονται ολοένα σημαντικότερες. Η επιφάνεια του spray παραμορφώνεται από την επίδραση της αέριας φάσης, και τελικά αυτό οδηγείται σε διάσπαση. Το μέσο μέγεθος των σταγόνων που προκύπτουν είναι μειωμένο σε σύγκριση με τη διάσπαση Rayleigh, και είναι περίπου ίσο με τη διάμετρο του ακροφυσίου. Το μήκος της διάσπασης είναι και σε αυτή την περίπτωση ακέραιο πολλαπλάσιο της διαμέτρου του ακροφυσίου, αλλά μικρότερο από αυτό της διάσπασης Rayleigh. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τρόπων διάσπασης έγκειται στο γεγονός ότι η σχετική ταχύτητα μεταξύ υγρού και αερίου αυξάνει στην ανεμογενή διάσπαση, με αποτέλεσμα να ενισχύονται οι αεροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στην επιφάνεια του υγρού.

Τέλος, στις περιπτώσεις μεγάλων πυκνοτήτων του αέριου μίγματος και μεγάλων ταχυτήτων έγχυσης, αυξάνεται περαιτέρω ο λόγος των αεροδυναμικών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους (αριθμός Weber), και παρατηρείται η κωνική διάσπαση (Σχήμα 3 γ). Αυτό το είδος του spray συναντάται συχνότερα στις ναυτικές εφαρμογές, λόγω της μεγάλης ταχύτητας έγχυσης, και για αυτόν τον λόγο αναλύεται λεπτομερέστερα στη συνέχεια.

Το κωνικό spray μπορεί να διαιρεθεί σε διάφορες περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Κοντά στην περιοχή του ακροφυσίου διακρίνεται ένας άθικτος υγρός πυρήνας (intact core), ο οποίος τάχιστα διασπάται σε επιμέρους υγρούς πυρήνες (churning flow), και στη συνέχεια σε σταγονίδια. Λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς της σε σχέση με αυτή της αέριας φάσης, η συνεισφορά της υγρής φάσης στη συνολική μάζα είναι πολύ μεγάλη. Αυτή η περιοχή του spray ονομάζεται «πυκνή» περιοχή.

Με τη χωρική απομάκρυνση από το ακροφύσιο, αυξάνει η μέση απόσταση των σταγονιδίων, εξαιτίας του κωνικού σχήματος του spray. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται ο χώρος που καταλαμβάνει η αέρια φάση σε σχέση με την υγρή. Δημιουργείται έτσι μία νέα περιοχή, η οποία χαρακτηρίζεται από τιμές λόγου υγρής προς αέρια μάζα κοντά στη μονάδα. Η περιοχή αυτή ονομάζεται «λεπτή» περιοχή του spray.

Τέλος, η περιοχή του spray, όπου η ποσότητα της υγρής φάσης είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή της αέριας, ονομάζεται «πολύ λεπτή» περιοχή.



Σχήμα 4: Απεικόνιση των τριών περιοχών ενός spray καυσίμου.

2.2.2 Στάδια διάσπασης

Λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των τριών περιοχών του spray, διακρίνονται δύο στάδια διάσπασης:

α) η πρωτογενής διάσπαση (primary breakup), η οποία περιλαμβάνει την πυκνή περιοχή και

β) η δευτερογενής διάσπαση (secondary breakup), η οποία περιλαμβάνει τη λεπτή και την πολύ λεπτή περιοχή.

Οι πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις των ναυτικών κινητήρων σε σχέση με τους κινητήρες της αυτοκινητοβιομηχανίας δεν επιτρέπουν απευθείας συγκρίσεις ανάμεσα στις δύο κατηγορίες κινητήρων. Η διάμετρος ενός τυπικού ακροφυσίου μίας μεγάλης ναυτικής μηχανής είναι της τάξης του 1 mm, δηλαδή μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από ένα τυπικό ακροφύσιο κινητήρα αυτοκινήτου.

Προτού αναλυθεί περαιτέρω η διάσπαση της δέσμης καυσίμου, κρίνεται απαραίτητη η παράθεση των αδιάστατων αριθμών που επηρεάζουν τη δυναμική του spray, για διευκόλυνση του αναγνώστη:

- Αριθμός Weber:

$$We = \frac{\rho_g * d_o * u_o^2}{\sigma} \quad (2.1), \text{ όπου:}$$

ρ_g : η πυκνότητα του αερίου

d_o : η αρχική διάμετρος της σταγόνας

u_o : η αρχική ταχύτητα της σταγόνας και

σ : η επιφανειακή τάση του υγρού.

Ο αριθμός Weber εκφράζει τον λόγο των αεροδυναμικών δυνάμεων προς τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης.

- Αριθμός Ohnesorge:

$$Oh = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L * d_o * \sigma}} \quad (2.2), \text{ όπου:}$$

μ_L : το ιξώδες του υγρού καυσίμου

ρ_L : η πυκνότητα του υγρού καυσίμου

d_o : η αρχική διάμετρος της σταγόνας (διάμετρος του ακροφυσίου) και

σ : η επιφανειακή τάση του υγρού.

Ο αριθμός Ohnesorge εκφράζει τον λόγο των δυνάμεων συνεκτικότητας προς τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης.

- Αριθμός Reynolds:

$$Re = \frac{\rho_L * u_o * d_o}{\mu_L} \quad (2.3), \text{ όπου:}$$

ρ_L : η πυκνότητα του υγρού καυσίμου

u_o : η αρχική ταχύτητα της σταγόνας (ταχύτητα έγχυσης)

d_o : η αρχική διάμετρος της σταγόνας (διάμετρος του ακροφυσίου) και

μL: το ιξώδες του υγρού καυσίμου.

Ο αριθμός Reynolds εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας.

Διαφοροποίηση στο μέγεθος του ακροφυσίου επιδρά άμεσα στις τιμές των κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν τη δυναμική του spray. (Ως ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούν να ληφθούν οι αριθμοί Weber και Reynolds). Κατά συνέπεια, υπάρχει σημαντική επίδραση στην πρωτογενή και κατ' επέκταση στη δευτερογενή διάσπαση του spray. Χαρακτηριστικές τιμές των αριθμών Weber και Reynolds παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

	Marine	Automotive
Re	120.000	20.000
We	500.000	50.000

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές τιμές των αριθμών Weber και Reynolds σε spray ναυτικών κινητήρων και κινητήρων της αυτοκινητοβιομηχανίας.

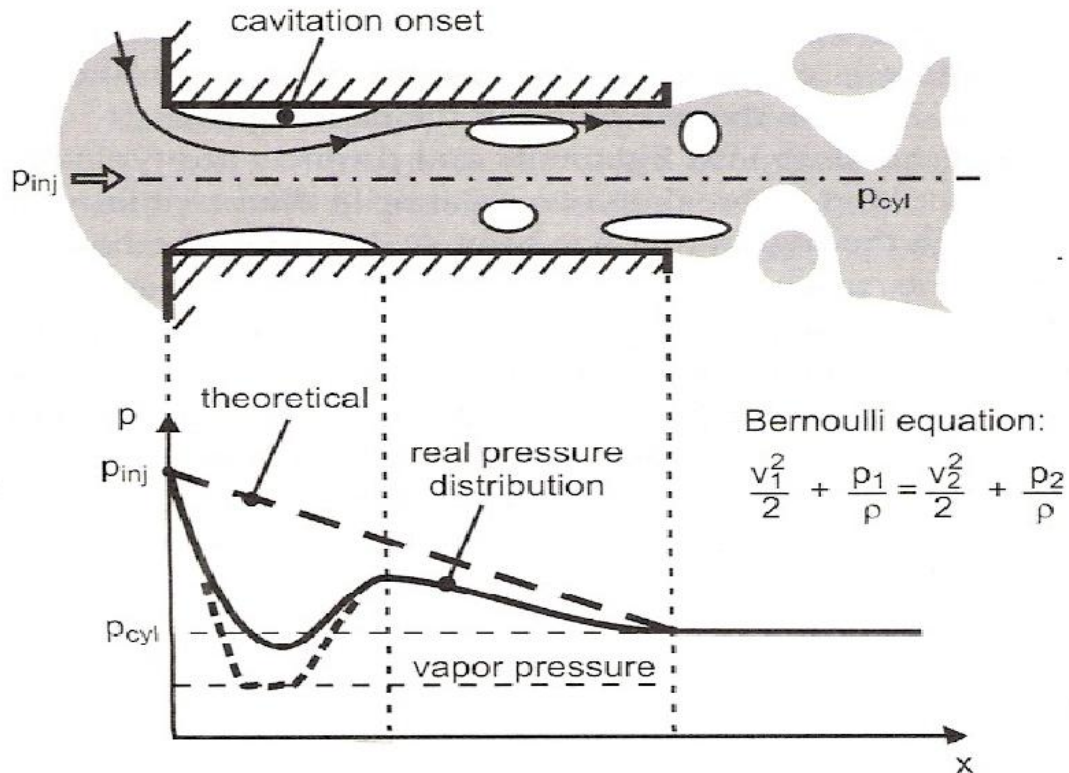
Τα δύο στάδια της διάσπασης του spray χρήζουν ξεχωριστής μελέτης. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους αναλύονται στη συνέχεια.

2.2.2.1 Πρωτογενής διάσπαση

Η πρωτογενής διάσπαση του spray εξαρτάται άμεσα από την πίεση ψεκασμού, τη γεωμετρία του ακροφυσίου και τα χαρακτηριστικά της ροής εντός αυτού. Τέτοια χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν την παρουσία τύρβης, καθώς και φυσαλίδων σπηλαιώσης.

Πιο συγκεκριμένα, λόγω της πτώσης πίεσης κατά μήκος του ακροφυσίου, η ροή καυσίμου επιταχύνεται μέσα στην οπή έγχυσης. Ως αποτέλεσμα, η ροή γίνεται τυρβώδης [8]. Η δημιουργία τύρβης στη ροή του υγρού καυσίμου εντός του εγχυτήρα προκαλεί την αποσταθεροποίηση της δέσμης του εγχεόμενου καυσίμου. Σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli, αύξησης της ταχύτητας εντός του ακροφυσίου προκαλεί μείωση της πίεσης, με συνέπεια τον κίνδυνο ελάττωσης της πίεσης χαμηλότερα και από την πίεση ατμοποίησης του καυσίμου. Σε περίπτωση που συμβεί αυτό, δημιουργούνται φυσαλίδες σπηλαιώσης μέσα στο ακροφύσιο, οι οποίες συνεισφέρουν στη διάσπαση του spray.

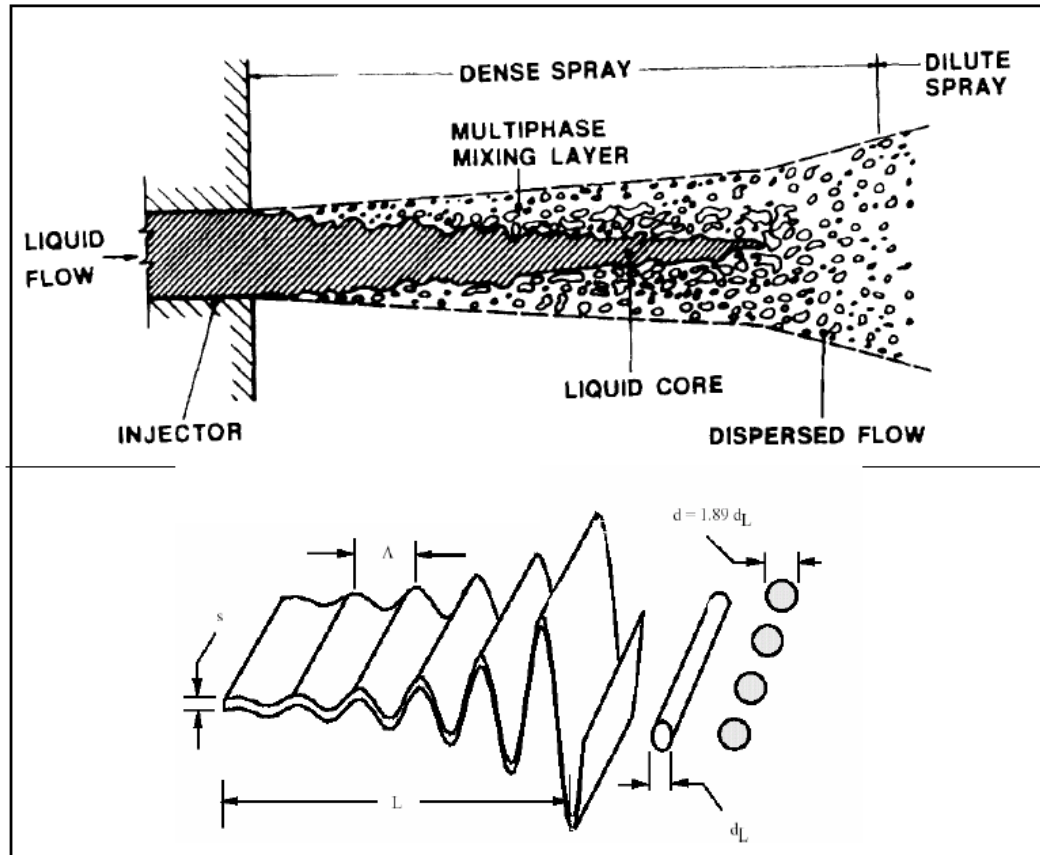
Στο Σχήμα 5 γίνεται σύγκριση της θεωρητικής κατανομής της πίεσης με την πραγματική κατανομή κατά μήκος μίας ροϊκής γραμμής.



Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση της ροής του καυσίμου σε ακροφύσιο, και σύγκριση της θεωρητικής κατανομής της πίεσης με την πραγματική κατανομή κατά μήκος μίας ροϊκής γραμμής [35].

Η δομή του spray που δημιουργείται αλληλεπιδρά με την αέρια φάση, και καταλήγει στη διάσπαση του spray σε σωματίδια και στη συνέχεια σε σταγονίδια, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Η δομή του spray διαφέρει, ανάλογα με τη γεωμετρία του εγχυτήρα. Σε κινητήρες Diesel, χρησιμοποιούνται εγχυτήρες με ακροφύσια πολλαπλών οπών (multi-hole nozzles), από τις οποίες εξέρχεται το καύσιμο σε μορφή κυλινδρικής δέσμης. Αντίθετα, σε κάποιες εφαρμογές κινητήρων βενζίνης, χρησιμοποιούνται ακροφύσια με κατάλληλη εσωτερική γεωμετρία, ώστε το καύσιμο να εξέρχεται σε μορφή επίπεδης δέσμης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση διάσπασης α) κυλινδρικής δέσμης και β) επίπεδης δέσμης [9].

Υπάρχουν σαφείς διαφορές στο σχήμα, το μέγεθος και τους χαρακτηριστικούς χρόνους της κυλινδρικής και της επίπεδης δέσμης υγρού που εγχύεται σε περιβάλλον αέριου μίγματος [9]. Ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των δύο δομών περιλαμβάνουν τη δημιουργία κυματισμών και ασταθειών στην υγρή επιφάνεια, που οδηγούν στη σταδιακή διάσπαση της δέσμης και των δημιουργούμενων σταγονιδίων. Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά μόνο σε κυλινδρικές δέσμες και όχι σε δομές επίπεδων δεσμών, λόγω της αντιστοιχίας των πρώτων με τη γεωμετρία των εγχυτήρων που χρησιμοποιούνται σε ναυτικούς κινητήρες.

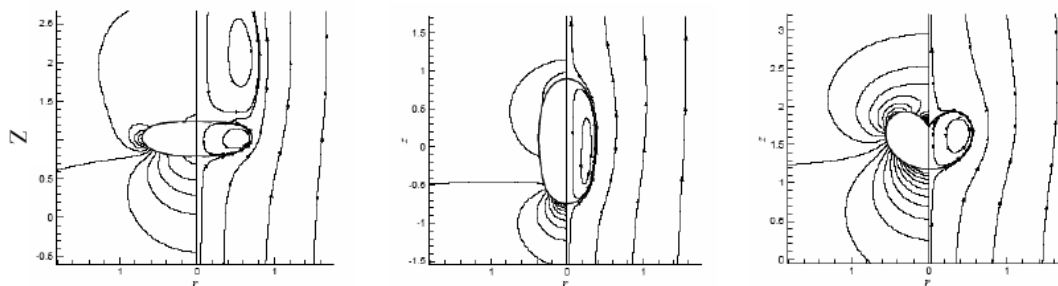
2.2.2.2 Παραμόρφωση και αεροδυναμική αντίσταση σταγόνων

Η διάσπαση μίας σταγόνας σε άλλες μικρότερες εξαρτάται καθοριστικά από τον αριθμό Weber, We . Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις: Για $We < 12$, δεν παρατηρείται διάσπαση αλλά μόνο παραμόρφωση. Για $We > 12$, παρατηρείται παραμόρφωση, ακολουθούμενη από διάσπαση.

A) Παραμόρφωση σταγόνας για $We < 12$:

Σε αυτή την περίπτωση η σταγόνα φτάνει σε μία σταθερή κατάσταση, και δεν διασπάται περαιτέρω. Στην εργασία [36] μελετήθηκε υπολογιστικά η παραμόρφωση σταγόνων για $We < 12$ και $Re < 200$, προκειμένου να προβλεφθεί το τελικό στάδιο της παραμόρφωσης μίας αρχικά σφαιρικής σταγόνας υγρού σε περιβάλλον αερίου. Η

μελέτη κατέληξε σε τρία σχήματα σταγόνας μετά την παραμόρφωση, τα οποία απεικονίζονται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση σταγόνων πεπλατυσμένης, επιμηκυμένης και λακκοειδούς σφαίρας [36].

- Σταγόνες σχήματος πεπλατυσμένης σφαίρας: Παρατηρείται μία ζώνη υπερπίεσης στο χείλος πρόσπτωσης και εκφυγής, και μία ζώνη υποπίεσης κοντά στον ισημερινό. Η μέγιστη πίεση εμφανίζεται στο σημείο ανακοπής, ενώ η ελάχιστη στον ισημερινό. Αυτή η κατανομή της πίεσης οδηγεί στο σχήμα τύπου πεπλατυσμένης σφαίρας.
- Σταγόνες σχήματος επιμηκυμένης σφαίρας: Αυτό το σχήμα σταγόνας προκύπτει κυρίως λόγω της εσωτερικής κυκλοφορίας υγρού μέσα στη σταγόνα, παρά λόγω της εξωτερικής ροής του αέρα.
- Λακκοειδείς σταγόνες: Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μία κοίλη περιοχή στο πίσω μέρος της σταγόνας. Εμφανίζονται σε μικρούς αριθμούς Re και μεγάλους αριθμούς Oh ($Oh > 0.1$). Συνεπώς, αυτό το είδος σταγόνων συναντάται συχνότερα σε σταγόνες που είναι σε πτώση, και όχι σε σταγόνες που εγχύονται με μεγάλη ταχύτητα.

B) Παραμόρφωση σταγόνας για $We > 12$:

Σε αυτή την περίπτωση η σταγόνα παραμορφώνεται, και στη συνέχεια διασπάται [9]. Στο χρονικό διάστημα πριν τη διάσπαση, η σταγόνα παραμορφώνεται και παίρνει ένα ελλειψοειδές σχήμα. Οι Hsiang και Faeth [28] πραγματοποίησαν πειράματα σε ένα ευρύ πεδίο συνθηκών, και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η μέγιστη δυνατή παραμόρφωση δίνεται συναρτήσει του αριθμού Weber από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{d_{c, \max}}{d_0} = 1 + 0.19\sqrt{We}, \text{ για } Oh < 0.1 \text{ και } We < 100 \quad (2.4)$$

και

$$\frac{d_{c, \max}}{d_0} \approx 2, \text{ για } Oh < 0.1 \text{ και } We > 100, \quad (2.5)$$

όπου: $d_{c, \max}$: το μήκος του μεγάλου άξονα της σταγόνας και d_0 : η αρχική διάμετρος της σταγόνας.

Καθώς μία σταγόνα καυσίμου αλληλεπιδρά με την αέρια φάση, δέχεται μία δύναμη η οποία την επιβραδύνει και την παραμορφώνει σε σχέση με την αρχική της κατάσταση [7]. Η δύναμη αεροδυναμικής αντίστασης που ασκείται σε μία σταγόνα που περιβάλλεται από ένα αέριο πυκνότητας ρ_g και ταχύτητας \vec{u} μπορεί γενικά να εκφραστεί ως εξής:

$$F_D = 1/2 * \rho_g * C_D * A_p * |\vec{u} - \vec{v}| * (\vec{u} - \vec{v}) \quad (2.6), \text{ όπου:}$$

F_D : η δύναμη αεροδυναμικής αντίστασης

ρ_g : η πυκνότητα του αερίου

C_D : ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης της σταγόνας

A_p : η μετωπική επιφάνεια της σταγόνας

u : η ταχύτητα του αερίου

v : η ταχύτητα της σταγόνας καυσίμου

Η τιμή του συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης C_D στη ροή γύρω από ένα σώμα προκύπτει συνήθως πειραματικά. Στην περίπτωση της σταγόνας καυσίμου, η τιμή του συντελεστή C_D εξαρτάται από το σχήμα της σταγόνας, από τις συνθήκες της ροής και από τις ιδιότητες της αέριας φάσης.

Για σχετικά χαμηλές ταχύτητες της ροής γύρω από ένα σφαιρικό σταγονίδιο ($Re < 1$), δεν υφίσταται αποκόλληση της ροής γύρω από αυτό. Η δύναμη αντίστασης οφείλεται κυρίως στην αντίσταση τριβής λόγω του ιξώδους του υγρού. Για αυτή την περιοχή των ταχυτήτων, ο συντελεστής αντίστασης προκύπτει από τον νόμο του Stokes ως εξής:

$$C_D = 24/Re, \quad (2.7),$$

όπου ο αριθμός Re ορίζεται ως:

$$Re = \frac{2 * r_p * \rho_g * |\vec{u} - \vec{v}|}{\mu_g} \quad (2.8),$$

όπου:

r_p η ακτίνα της σταγόνας και

μ_g : το δυναμικό ιξώδες του αερίου.

Για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds, η ροή του αέρα αποκολλάται από την επιφάνεια της σταγόνας, και έτσι η αντίσταση μορφής αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία από την αντίσταση λόγω ιξώδους.

Για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds, ο συντελεστής αντίστασης C_D παίρνει τις εξής τιμές [7]:

$$C_D = \frac{24}{Re} * \frac{1 + Re^{2/3}}{6}, \text{ για } Re < 1000 \quad (2.9) \text{ και}$$

$$C_D = 0.424, \text{ για } Re > 1000 \quad (2.10).$$

Σε περιπτώσεις που το spray καυσίμου είναι αρκετά πυκνό, όπως για παράδειγμα κοντά στο ακροφύσιο [7], ο συντελεστής C_D βρίσκεται από τη σχέση:

$$C_D = \frac{24}{Re} * (\theta^{-2.65} + \frac{\theta^{2/3} * Re^{2/3}}{6}) , \text{ για } Re < 1000 \quad (2.11),$$

όπου θ : το κλάσμα του όγκου που καταλαμβάνεται από την αέρια φάση (local void fraction).

Οι παραπάνω σχέσεις που αφορούν στον συντελεστή αντίστασης ισχύουν μόνο για απόλυτα σφαιρικές σταγόνες καυσίμου. Όμως, οι υγρές σταγόνες των spray καυσίμων παραμορφώνονται πριν από τη διάσπασή τους. Φυσικά, αυτό διαφοροποιεί τον πραγματικό συντελεστή αντίστασης.

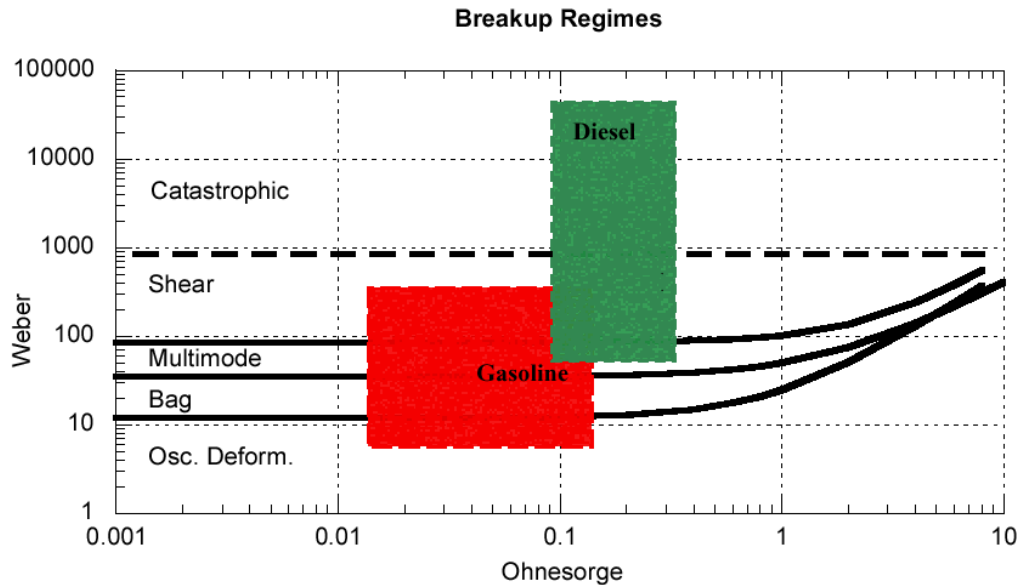
2.2.2.3 Δευτερογενής διάσπαση

Με το πέρας της πρωτογενούς διάσπασης και τη δημιουργία σφαιρικών σταγονιδίων, λαμβάνει χώρα η δευτερογενής διάσπαση του spray [9]. Οι βασικές αρχές που διέπουν το συγκεκριμένο στάδιο είναι κοινές για όλα τα είδη των spray, σε αντίθεση με ό,τι ισχύει για την πρωτογενή διάσπαση.

Η δευτερογενής διάσπαση των επιμέρους υγρών πυρήνων και σταγονιδίων οφείλεται κυρίως σε μεγάλες αεροδυναμικές δυνάμεις, οι οποίες προέρχονται από την αέρια φάση και επιδρούν στην επιφάνεια των υγρών σταγόνων. Οι δυνάμεις αυτές παραμορφώνουν τα πρωτογενή σφαιρικά σταγονίδια, και τελικά οδηγούν στην ολική διάσπασή τους σε άλλα, θυγατρικά.

Έχουν γίνει πολλές μελέτες επί του θέματος, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη δευτερογενή διάσπαση [9]. Τόσο οι αρχικές μελέτες [37, 38], όσο και πιο πρόσφατες [39, 40] συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα του Faeth και των συνεργατών του [9].

Η δευτερογενής διάσπαση εξαρτάται μόνο από την αρχική διάμετρο των σταγόνων, τη σχετική ταχύτητα ως προς το περιβάλλον αέριο, και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υγρού και του αερίου. Τα μεγέθη αυτά καθορίζουν τις τιμές των αριθμών Weber και Ohnesorge, οι οποίοι με τη σειρά τους καθορίζουν τον μηχανισμό διάσπασης της σταγόνας. Μολονότι ένας από τους μηχανισμούς διάσπασης των σταγόνων μπορεί να είναι κυρίαρχος, επιβάλλεται η μελέτη και η μοντελοποίηση και όλων των υπολοίπων, διότι, σε μικρότερο βαθμό, λαμβάνουν και αυτοί χώρα. Το γεγονός αυτό φαίνεται στο Διάγραμμα 3, όπου διακρίνονται τέσσερεις μηχανισμοί διάσπασης, καθώς επίσης και χαρακτηριστικές περιοχές τυπικών spray βενζίνης και καυσίμου Diesel.



Διάγραμμα 3: Περιοχές διάσπασης του spray σε συνάρτηση με τους αριθμούς Weber και Ohnesorge. Στο Διάγραμμα έχουν σημειωθεί οι περιοχές που αντιστοιχούν σε συνήθεις εφαρμογές spray βενζίνης και καυσίμου Diesel [9].

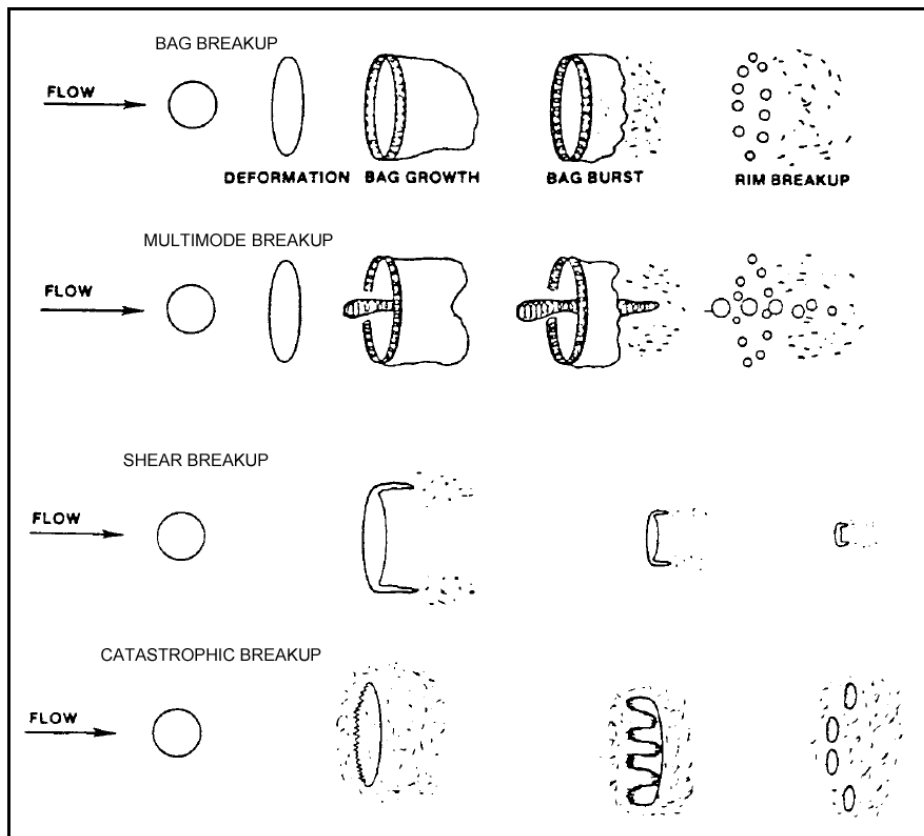
Στο Διάγραμμα 3 είναι σημαντικό να παρατηρήσει κανείς πως, για μικρούς αριθμούς Ohnesorge ($Oh < 0.1$), η μετάβαση από τη μία περιοχή στην άλλη είναι συνάρτηση μόνο του αριθμού Weber. Ο αριθμός Ohnesorge καθίσταται ολοένα σημαντικότερος για $Oh > 0.1$. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Για μικρούς αριθμούς Ohnesorge, οι δυνάμεις λόγω του ιξώδους είναι πολύ μικρές, και, ως αποτέλεσμα, οι αεροδυναμικές αντιστάσεις μπορούν να εξισορροπηθούν μόνο από την επίδραση της επιφανειακής τάσης. Με την αύξηση του ιξώδους, αυξάνεται η συμμετοχή των δυνάμεων συνεκτικότητας στην εξισορρόπηση των αεροδυναμικών δυνάμεων από την αέρια φάση.

Τα όρια μετάβασης από τη μία περιοχή στην άλλη είναι τα εξής [27]:

- Σακουλοειδής διάσπαση (bag breakup): $12 < We < 35$
- Πολυμορφική διάσπαση (multimode breakup): $35 < We < 80$
- Διατμητική διάσπαση (shear breakup): $80 < We < 850$ και
- Καταστροφική διάσπαση (catastrophic breakup): $We > 850$.

Τα όρια αυτά μπορεί να αυξηθούν εάν αυξηθεί ο αριθμός Ohnesorge, ενώ υπάρχει αμφιβολία για την εικόνα σε μεγάλους αριθμούς Weber και Ohnesorge, λόγω της δυσκολίας εκτέλεσης πειραμάτων υπό αντίστοιχες συνθήκες.

Στο Σχήμα 8 παρίστανται σχηματικά οι μηχανισμοί διάσπασης σταγόνων.



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών δευτερογενούς διάσπασης, σύμφωνα με τους Pilch και Erdman, 1987 [32].

2.2.3 Χρόνος διάσπασης

Ένας χαρακτηριστικός χρόνος διάσπασης έχει προταθεί από τους Ranger και Nicholls [38], και είναι ο εξής:

$$t^* = \frac{d_0}{u_0} * \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_g}} \quad (2.12),$$

όπου:

- d_0 : η αρχική διάμετρος της σταγόνας
- u_0 : η αρχική ταχύτητα της σταγόνας
- ρ_L : η πυκνότητα του υγρού, και
- ρ_g : η πυκνότητα του αερίου.

Οι Pilch και Erdman [32] πρότειναν ότι οι ακόλουθοι δύο χρόνοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί:

Ο χρόνος έναρξης και ο χρόνος λήξης της διάσπασης της σταγόνας. Ο ορισμός του χρόνου έναρξης της διάσπασης είναι αυθαίρετος, και εξαρτάται από τον μηχανισμό διάσπασης. Επίσης, ο χρόνος έναρξης είναι φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού Weber. Μία απλή εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τους Pilch και Erdman [32] είναι η εξής:

$$\frac{t}{t^*} = 1.9 * (We - 12)^{-1.4} * (1 + 2.2 * Oh^{1.6}) \quad (2.13),$$

όπου:

t^* : ο αδιάστατος χρόνος που ορίστηκε στην εξίσωση (2.12).

Ως χρόνος λήξης της διάσπασης μίας σταγόνας ορίζεται η χρονική στιγμή, κατά την οποία η σταγόνα και όλα τα τμήματα που έχουν προέλθει από αυτή δεν διασπώνται περαιτέρω. Ορισμένες σχέσεις που δείχνουν τον συνολικό χρόνο διάσπασης μίας σταγόνας έχουν προταθεί από τους Pilch και Erdman [32], ως συνάρτηση του αριθμού Weber:

$$\frac{t}{t^*} = 6 * (We - 12)^{-1/4}, \text{ για } 12 < We < 18 \quad (2.14)$$

$$\frac{t}{t^*} = 2.45 * (We - 12)^{-1/4}, \text{ για } 18 < We < 45 \quad (2.15)$$

$$\frac{t}{t^*} = 14.1 * (We - 12)^{-1/4}, \text{ για } 45 < We < 351 \quad (2.16)$$

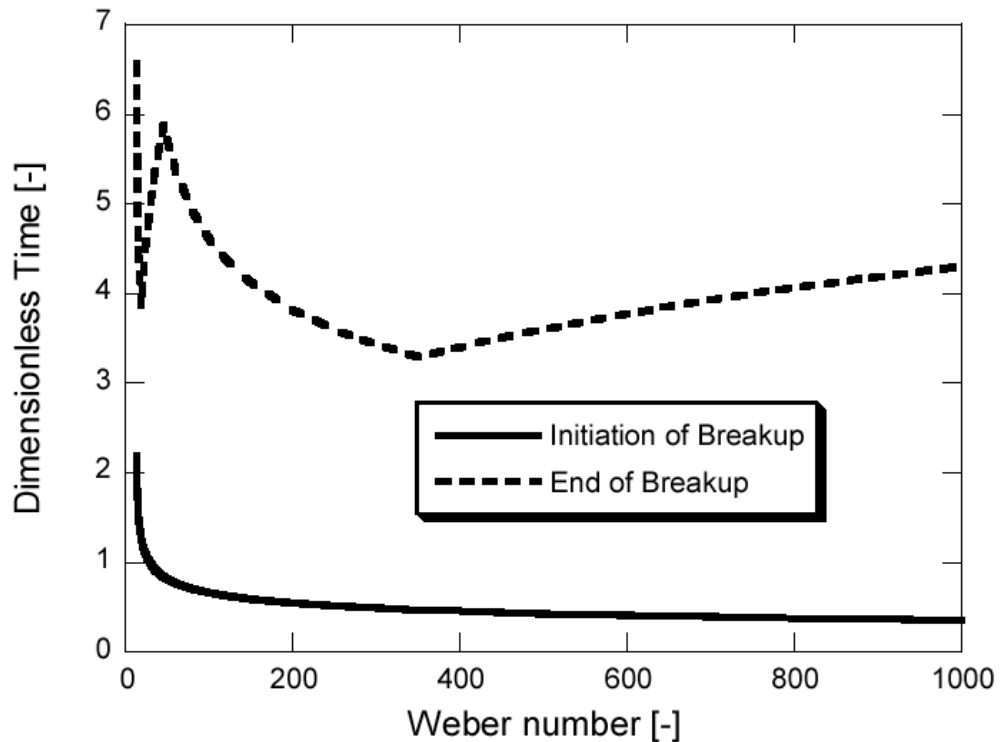
$$\frac{t}{t^*} = 0.766 * (We - 12)^{-1/4}, \text{ για } 351 < We < 2670 \quad (2.17)$$

$$\frac{t}{t^*} = 5.5, \text{ για } 2670 < We \quad (2.18)$$

Οι προηγούμενες σχέσεις ισχύουν μόνο σε περιπτώσεις σταγόνων με μικρό ιξώδες ($Oh < 0.1$). Για $Oh > 0.1$, ο Gelfand [33] πρότεινε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{t}{t^*} = 4.5 * (1 + 1.2 * Oh^{1.64}), \text{ για } We < 228 \quad (2.19)$$

Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζονται οι αδιάστατοι χρόνοι έναρξης και λήξης της διάσπασης σε συνάρτηση με τον αριθμό Weber, για $Oh < 0.1$.



Διάγραμμα 4: Αδιάστατοι χρόνοι έναρξης και λήξης της δευτερογενούς διάσπασης, συναρτήσει του αριθμού Weber, για τιμές του αριθμού Ohnesorge $Oh < 0.1$. Ο χρόνος είναι αδιαστατοποιημένος με τον χαρακτηριστικό χρόνο t_d [9].

Στον χρόνο λήξης της διάσπασης, περατώνεται ο μηχανισμός της δευτερογενούς διάσπασης. Παρόλα αυτά, είναι ακόμη πιθανή η ύπαρξη πατρικών σταγόνων με $We > 12$. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, οι σταγόνες αυτές θα μπορούσαν να υποστούν και τριτογενή διάσπαση. Αντίθετα, οι Hsiang και Faeth, και ο Faeth [27, 28] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν είναι δυνατή η ύπαρξη μίας περαιτέρω διάσπασης, δηλαδή ότι η δευτερογενής διάσπαση αποτελεί πάντα το καταληκτικό στάδιο, ανεξάρτητα από τον αριθμό We της σταγόνας.

2.3 Βιβλιογραφική Επισκόπηση Μοντελοποίησης Βαρέος Καυσίμου

Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα που προήλθαν από τους Fink et al. [13] και αφορούν σε μεσόστροφους ναυτικούς κινητήρες, οι διαφορές του μήκους διείσδυσης του spray βαρέος καυσίμου είναι πολύ μικρές σε σχέση με το μήκος διείσδυσης του spray καυσίμου Diesel κινητήρων της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η βασική διαφορά συνίσταται στο αρκετά μεγαλύτερο μέγεθος των σταγόνων του spray βαρέος καυσίμου, σε σχέση με το αντίστοιχο μέγεθος των σταγονιδίων του spray καυσίμου Diesel.

Πρόσφατα, έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος HERCULES θάλαμος καύσης σταθερού όγκου [17], για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές σε μεγάλες (αργόστροφες) ναυτικές μηχανές, με τα πρώτα πειράματα να εκτελούνται εδώ και πολύ πρόσφατα. Ο θάλαμος επιτρέπει την οπτική επαφή με το spray καυσίμου, συνεπώς είναι δυνατή η παρατήρηση της ροής και της καύσης του spray, καθώς επίσης και του σχηματισμού των καυσαερίων σε συνθήκες πολύ παρόμοιες με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μεγάλων ναυτικών κινητήρων

Diesel. Επιπρόσθετα, η διαμόρφωση του θαλάμου σταθερού όγκου προσφέρει τη δυνατότητα παρατήρησης της αλληλεπίδρασης των spray που προέρχονται από τους τρεις διαφορετικούς εγχυτήρες (σε αντιστοιχία με τους μεγάλους δίχρονους κινητήρες Diesel). Τέλος, αξίζει να τονιστεί πως στα πειράματα μπορεί να γίνει χρήση καυσίμων διαφορετικών ποιοτήτων. Η συγκεκριμένη διάταξη αναμένεται να υποστηρίξει σε σημαντικό βαθμό την έρευνα που σχετίζεται με τη μοντελοποίηση του spray σε συνθήκες αντίστοιχες με αυτές μεγάλων ναυτικών κινητήρων.

Το 2006, οι Goldsworthy et al. [31] παρουσίασαν ένα απλοποιημένο μοντέλο βαρέος καυσίμου. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, το βαρύ καύσιμο έχει σταθερό ιξώδες, πυκνότητα και ενθαλία εξάτμισης, ενώ η επιφανειακή τάση είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε σε προσομοιώσεις με κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για δύο αντιπροσωπευτικά καύσιμα, από τις οποίες προέκυψαν αποτελέσματα σε ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά δεδομένα, αναφορικά με την καθυστέρηση έναυσης, τον ρυθμό καύσης και τη μορφή του spray και της φλόγας [30].

Πιο πρόσφατα, οι Struckmeier et al. [18] υιοθέτησαν το μοντέλο του Goldsworthy, και το βελτίωσαν προσθέτοντας μοντέλο εξάτμισης του καυσίμου που περιλαμβάνει περισσότερα του ενός στοιχεία (multi-component droplet evaporation). Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει ορισμένα ελαφρά και κάποια βαρύτερα καύσιμα, των οποίων οι πιέσεις κορεσμού διαφέρουν μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, τα ελαφρύτερα συστατικά εξατμίζονται πρώτα, ενώ τα βαρύτερα αργότερα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα αποδείχτηκε ικανοποιητική, όσον αφορά στη διείδυση του spray και την εξάτμιση του καυσίμου.

Πρόσφατα, πραγματοποιήθηκαν έρευνες που αφορούσαν στη μείωση των ρύπων από κινητήρες της αυτοκινητοβιομηχανίας [30], με χρήση εναλλακτικών στρατηγικών έγχυσης. Με αφορμή τις συγκεκριμένες μελέτες, οι Κοντούλης [8, 19] και Ανδρεάδης [20, 21] επιχείρησαν την περαιτέρω βελτίωση και βελτιστοποίηση του χρονικού προφίλ έγχυσης σε μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες Diesel.

Οι μελέτες των Κοντούλη και Ανδρεάδη κάνουν χρήση spray καυσίμου Diesel και όχι βαρέος καυσίμου, το οποίο είναι το κυρίως χρησιμοποιούμενο καύσιμο στη ναυτιλία σήμερα. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των χαρακτηριστικών του βαρέος καυσίμου στη ροή και την κάυση στους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες, δημιουργήθηκε το μοντέλο του βαρέος καυσίμου που περιγράφεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ο κώδικας KIVA και τα μοντέλα καυσίμου

3.1 Ο κώδικας KIVA

Προκειμένου να κατανοηθούν σε βάθος οι συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της διάσπασης ενός spray καυσίμου και κατά την καύση του μέσα στον θάλαμο καύσης, είναι απαραίτητη η προσομοίωση της ροής του spray. Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση κωδικών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, η οποία τα τελευταία χρόνια έχει σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη.

Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι ο κώδικας KIVA3-V [22,23], που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Εργαστήριο του Los Alamos, των ΗΠΑ.

Η πρώτη επίσημη έκδοση του προγράμματος KIVA έγινε το 1985, ενώ τέσσερα χρόνια αργότερα (1989) αντικαταστάθηκε από τη βελτιωμένη έκδοση, KIVA-II [25]. Αυτές οι πρώτες εκδόσεις του κώδικα χαρακτηρίστηκαν από δυσκολίες αναφορικά με την επίλυση προβλημάτων σε πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως για παράδειγμα οι προθάλαμοι κινητήρων Diesel.

Το 1993 αναπτύχθηκε ο κώδικας KIVA3 [22], ο οποίος προσέφερε εξοικονόμηση χρόνου στους υπολογισμούς. Τέλος, ο κώδικας KIVA-3V διατέθηκε επίσημα το 1997 [23], προσφέροντας την επιπρόσθετη δυνατότητα μοντελοποίησης της ροής σε βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής.

Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA3 επιλύει αριθμητικά τις διαφορικές εξισώσεις διατήρησης για τρισδιάστατες ροές, οι οποίες είναι χρονικά μεταβαλλόμενες, τυρβώδεις και περιλαμβάνουν χημικές αντιδράσεις και διφασική ροή. Για την επίλυση είναι απαραίτητη η περιγραφή της αέριας φάσης από τις εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας, από κοινού με τις εξισώσεις του μοντέλου τύρβης.

Η εξέλιξη του spray περιγράφεται από μία συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x, v, r, T_d, y, \frac{dy}{dt}, t), \text{ όπου:}$$

x: το διάνυσμα θέσης

v: το διάνυσμα ταχύτητας

r: η ακτίνα της σταγόνας

T_d: η θερμοκρασία της σταγόνας

y: η παραμόρφωση σε σχέση με το αρχικό σφαιρικό της σχήμα

$\frac{dy}{dt}$

: ο ρυθμός της παραμόρφωσης

t: ο χρόνος

Η εξίσωση της εξέλιξης του spray είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της συνάρτησης κατανομής σε έναν κλειστό όγκο ελέγχου. Αυτό οδηγεί σε μία σχεδόν γραμμική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης, οι σταθερές της οποίας προσδιορίζονται

από κάποια υπο-μοντέλα που περιγράφουν τις συγκρούσεις μεταξύ σταγόνων, τη διάσπαση και την εξάτμισή τους, καθώς επίσης και την επίδραση της βαρύτητας.

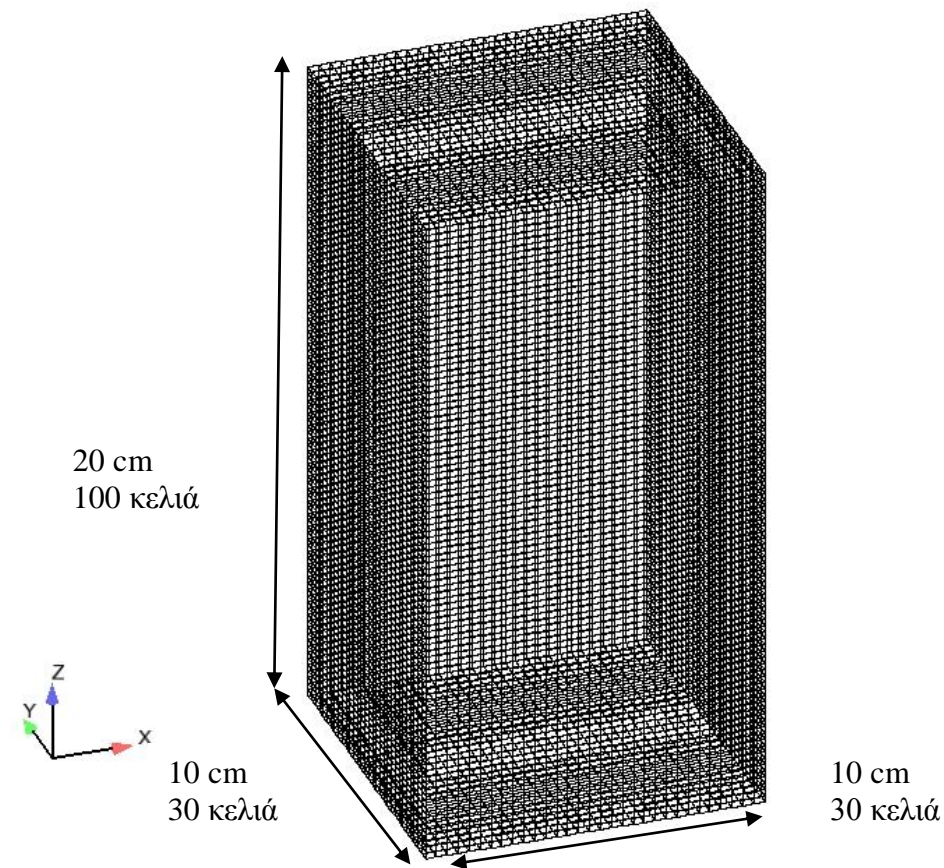
Οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες για το spray καυσίμου περιλαμβάνουν τη θέση και τη διάμετρο του ακροφυσίου, τον προσανατολισμό του άξονα του spray, τη γωνία του spray, όπως επίσης και την αλληλεπίδραση του καυσίμου με τα τοιχώματα.

Για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης του spray χρησιμοποιείται η στοχαστική τεχνική των σωματιδίων (parcels) [9]. Πρόκειται για έναν διαχωρισμό των σταγόνων του καυσίμου, και ομαδοποίησή τους σε σωματίδια (parcels). Κάθε σωματίδιο αποτελείται από μία ομάδα σταγόνων ίδιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Όλα τα σωματίδια περιέχουν την ίδια μάζα καυσίμου. Ο αριθμός των σταγόνων σε κάθε σωματίδιο εξαρτάται από τον αριθμό των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του spray. Τυπικές τιμές χρησιμοποιούμενου αριθμού σωματιδίων είναι 3,000-30,000. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται 10,000 σωματίδια για την πρωτογενή διάσπαση, ενώ δημιουργούνται νέα σωματίδια κατά τη διάρκεια της δευτερογενούς διάσπασης.

Η τεχνική των σωματιδίων χρησιμοποιείται για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου. Το μέγεθος των σταγονιδίων καυσίμου είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις της μηχανής. Έτσι, στην περίπτωση που επιχειρούνταν υπολογισμοί για κάθε σωματίδιο ξεχωριστά, το μέγεθος των κελιών του πλέγματος θα έπρεπε να είναι της τάξης ορισμένων μικρομέτρων, γεγονός που θα αύξανε υπερβολικά τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος και τη χρησιμοποιούμενη υπολογιστική μνήμη. Για τον σκοπό αυτό οι σταγόνες καυσίμου ομαδοποιούνται, συνθέτοντας μεγαλύτερες μονάδες (parcels). Έτσι, οι διαστάσεις των κελιών του πλέγματος είναι της τάξης ορισμένων χιλιοστών, δηλαδή χίλιες φορές μεγαλύτερες από ό,τι χωρίς τη χρήση σωματιδίων.

3.2 Υπολογιστικό πλέγμα

Στην παρούσα εργασία, γίνεται προσομοίωση της ροής spray σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου. Προκειμένου να περιγραφούν σε ικανοποιητικό βαθμό οι συνθήκες λειτουργίας του θαλάμου καύσης, χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικό πλέγμα, σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Οι διαστάσεις του παραλληλεπίπεδου είναι 10 x 10 x 20 cm, ενώ ο αριθμός των κελιών που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς είναι 90.000. Οι διαστάσεις των κελιών είναι 3,3 x 3,3 x 2 mm. Η επιλογή του μεγέθους των 2 mm στον κατακόρυφο άξονα έγινε με βάση προγενέστερη μελέτη [12]. Το συγκεκριμένο μέγεθος θεωρήθηκε βέλτιστο, καθώς περαιτέρω μείωση δεν οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 9: Υπολογιστικό πλέγμα για την προσομοίωση της ροής spray σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου.

3.3 Μοντέλα διάσπασης του spray

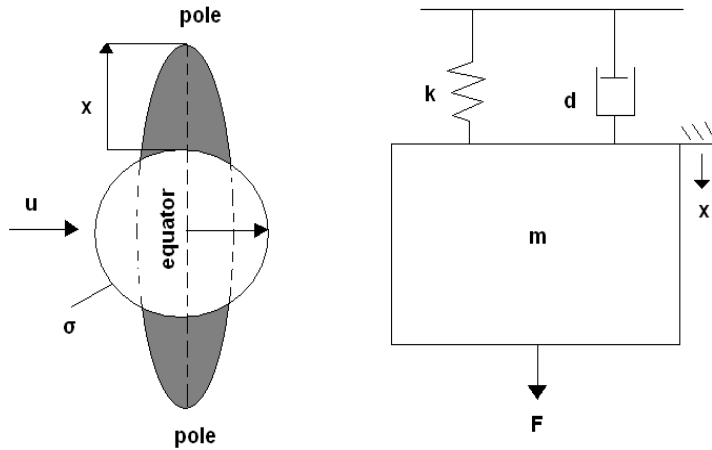
Για τη μοντελοποίηση ενός spray καυσίμου, έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα διάσπασης του spray. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο από αυτά:

1. Το μοντέλο E-TAB, το οποίο είναι επέκταση του μοντέλου TAB.
2. Το μοντέλο USB.

Ακολουθεί ανάλυση των δύο μοντέλων.

3.3.1 Το μοντέλο TAB (Taylor Analogy Breakup model)

Το μοντέλο TAB εισήχθη από τους O'Rourke και Amsden [25], και βασίζεται στην αναλογία ανάμεσα στη δυναμική αρμονικού ταλαντωτή συστήματος μάζας - ελατηρίου - αποσβεστήρα και σε αυτή μίας σταγόνας που διεισδύει σε ένα αέριο, με σχετική ταχύτητα u_{rel} .



Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος μάζας - ελατηρίου - αποσβεστήρα στο μοντέλο TAB.

Η εξωτερική δύναμη F που ασκείται στη μάζα αντιστοιχεί στις αεροδυναμικές δυνάμεις που επιβραδύνουν και παραμορφώνουν τη σταγόνα μέσα στον θάλαμο καύσης. Η δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου $F=k*x$ λειτουργεί κατ' αντιστοιχία με την επιφανειακή τάση του υγρού, που τείνει να επαναφέρει τη σταγόνα στην αρχική της μορφή. Τέλος, με τη δύναμη απόσβεσης $F=d*u$ λαμβάνεται υπόψη ο ρόλος των τριβών που αναπτύσσονται εντός της σταγόνας λόγω του δυναμικού ιξώδους του υγρού, μ_l . Η κίνηση του συστήματος μάζας-ελατηρίου περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης:

$$m\ddot{x} = F - kx - d\dot{x} \quad (3.1), \text{ όπου:}$$

x : η απομάκρυνση της μάζας από τη θέση ισορροπίας,

\dot{x} : η ταχύτητα της μάζας m ,

\ddot{x} : η επιτάχυνση της μάζας m ,

k : η σταθερά του Hooke και

d : η σταθερά απόσβεσης.

$m\ddot{x}$: η δύναμη του αρμονικού ταλαντωτή

F : η εξωτερική δύναμη

$-kx$: η δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου

$-d\dot{x}$: η δύναμη απόσβεσης

Σύμφωνα με τις αντιστοιχίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι επιμέρους όροι της 3.1 θα πρέπει να αντικατασταθούν ως εξής:

$$\frac{F}{m} = C_f * \frac{\rho_s * u^2}{\rho_L * r} \quad (3.2)$$

$$\frac{k}{m} = C_k * \frac{\sigma}{\rho_L * r^3} \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{m} = C_d * \frac{\mu_L}{\rho_L * r^2} \quad (3.4)$$

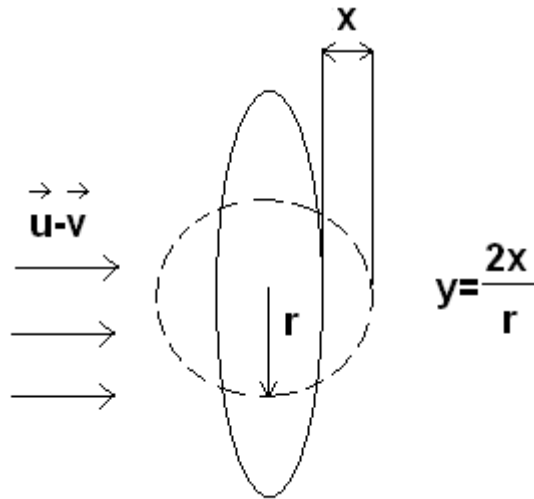
Η μεταβλητή x θα περιγράψει πλέον την παραμόρφωση της σταγόνας από την αρχική της κατάσταση (Σχήμα 11).

Οι συντελεστές C_F , C_K και C_d είναι οι σταθερές του μοντέλου. Στις εξισώσεις (3.2)-(3.4), r είναι η ακτίνα της σφαιρικής σταγόνας στην αρχική της θέση, ρ_g και ρ_l η πυκνότητα του αερίου και του υγρού, αντίστοιχα, και σ η επιφανειακή τάση του υγρού. Χρησιμοποιώντας την αδιάστατη μεταβλητή $y = \frac{x}{C_b * r}$, η εξίσωση της

κίνησης προκύπτει ότι είναι:

$$\ddot{y} = \frac{C_f \rho_g u^2}{C_b \rho_L r^2} - \frac{C_k * \sigma}{\rho_L * r^3} * y - \frac{C_d * \mu_L}{\rho_L * r^2} * \dot{y} \quad (3.5).$$

Σε αυτή την περίπτωση η μεταβλητή y , που εκφράζει την παραμόρφωση της σταγόνας, αδιαστατοποιείται με την ακτίνα της σταγόνας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12:



Σχήμα 11: Παραμόρφωση της σταγόνας σύμφωνα με το μοντέλο TAB.

Στην περίπτωση μίας παραμορφωμένης σταγόνας, η οποία δεν έχει διατηρήσει το αρχικό σφαιρικό της σχήμα, ο συντελεστής αντίστασης βρίσκεται από τη σχέση:

$$C_D = C_{D,sphere} * (1 + 2.632 * y). \quad (3.6)$$

Η παραπάνω σχέση κάνει χρήση του γεγονότος ότι, για μεγάλους αριθμούς Reynolds, ο συντελεστής αντίστασης ενός δίσκου είναι περίπου 3.6 φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της σφαίρας [9].

Για γνωστή σχετική ταχύτητα u_{rel} , η εξίσωση (3.5) καταλήγει στην εξής λύση:

$$y(t) = We_c + e^{-\frac{t}{t_d}} * [(y_0 - We_c) * \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega} (\frac{dy_0}{dt} + \frac{y_0 - We_c}{t_d}) * \sin(\omega t)] \quad (3.7),$$

όπου:

$$t_d = \frac{2 * \rho_1 * \alpha^2}{5 * \mu_1} \quad (3.8) \text{ και}$$

$$\omega^2 = \frac{8 * \sigma}{\rho_1 * \alpha^3} - \frac{1}{t_d^2} \quad (3.9),$$

όπου ω ο ρυθμός ενίσχυσης των διαταραχών στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου (growth rate).

Θεωρούμε επίσης πως τη χρονική στιγμή $t = 0$: $y_0 = 0$ και $dy/dt = 0$.

Στη σχέση (3.8), ο αριθμός Weber υπολογίζεται με βάση την ακτίνα της σταγόνας και όχι τη διάμετρο, όπως συμβαίνει σε πολλές άλλες περιπτώσεις. Από πειραματικά αποτελέσματα έχει αποδειχθεί πως κάτω από μια κρίσιμη τιμή του αριθμού Weber, δεν λαμβάνει χώρα διάσπαση της σταγόνας. Αυτή η τιμή είναι $We_c = 6$. Επίσης, στο μοντέλο TAB θεωρείται πως η διάσπαση πραγματοποιείται μόνο όταν $y > 1$.

Οι τιμές των σταθερών του μοντέλου έχουν προκύψει με βάση πειραματικά δεδομένα και λαμβάνονται ίσες με:

$$C_k=8, C_d=5, C_b=0.5 \text{ και } C_F=1/3.$$

Από την εξίσωση (3.7) μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που θα χρειαστεί για τη διάσπαση της σταγόνας, η οποία λαμβάνει χώρα για $y(t) = 1$.

Μέγεθος θυγατρικών σταγόνων:

Το μέγεθος της σταγόνας μετά τη διάσπαση προκύπτει από τη διατήρησης της ενέργειας πριν και μετά τη διάσπασή της. Σύμφωνα με το ισοζύγιο της ενέργειας, η συνολική ενέργεια της πατρικής σταγόνας ισούται με τη συνολική ενέργεια των θυγατρικών σταγόνων. Εφαρμογή του ισοζυγίου οδηγεί στη σχέση:

$$\frac{r}{r_{3,2}} = 1 + \frac{8 * K}{20} + \frac{\rho_L * r^3}{\sigma} * \dot{y}^2 * \left(\frac{6 * K - 5}{120} \right) \quad (3.10),$$

όπου:

r : η ακτίνα της πατρικής σταγόνας,

$r_{3,2}$: η μέση ακτίνα των θυγατρικών σταγόνων (Sauter Mean Radius,

$SMR = 3 * \frac{V_p}{A_p}$, όπου V_p ο όγκος όλων των σταγονιδίων του spray καυσίμου και A_p η επιφάνειά τους) και

K : μία σταθερά του μοντέλου, η οποία στην παρούσα εργασία παίρνει την τιμή $K=10/3$. Η τιμή αυτή υιοθετήθηκε από τη βιβλιογραφία [10].

Από τη σχέση (3.10) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση ακτίνα των θυγατρικών σταγόνων, $r_{3,2}$. Με γνωστή την τιμή της ακτίνας $r_{3,2}$, είναι εύκολος ο

υπολογισμός του αριθμού των σταγόνων που προκύπτουν, με εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας πριν και μετά τη διάσπαση.

Συνήθως, γίνεται χρήση μίας συνεχούς κατανομής μεγεθών στις διάφορες σταγόνες, έτσι ώστε να υπάρξει μια ρεαλιστική αναπαραγωγή της δέσμης καυσίμου.

Με βάση την αντιστοίχιση της εξωτερικής δύναμης με τη δύναμη αντίστασης του αέρα, παρουσιάζεται στη συνέχεια μία εκτίμηση της επίδρασης του μεγέθους της σταγόνας στην επιβράδυνσή της.

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ισχύει: $F_{\text{Drag}} = m * a$, όπου:

$$F_{\text{Drag}} = C_D * \frac{\rho}{2} * u_o^2 * \pi * \frac{d^2}{4} \quad (3.11) \quad \text{και} \quad m = \rho * \frac{4}{3} * \pi * \frac{d^3}{8} \quad (3.11),$$

όπου:

F_{Drag} : η δύναμη της αντίστασης του αέρα

m : η μάζα της σταγόνας

a : η επιβράδυνση της σταγόνας

C_D : ο συντελεστής αντίστασης της σταγόνας, ο οποίος εξαρτάται από το σχήμα της

ρ : η πυκνότητα του καυσίμου

d : η διάμετρος της σταγόνας.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$a = \frac{K * C_D * u_o^2}{d} \quad (3.12),$$

όπου K μία σταθερά, που περιλαμβάνει τους υπόλοιπους σταθερούς όρους.

Προκύπτει συνεπώς ότι η επιβράδυνση μίας σταγόνας καυσίμου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητάς της και αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου της. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερα είναι τα σταγονίδια του καυσίμου, τόσο δυσκολότερα αυτά θα επιβραδυνθούν.

Ταχύτητα θυγατρικών σταγόνων

Η ταχύτητα της πατρικής σταγόνας είναι ίση με:

$$\frac{dx}{dt} = C_b * r * \frac{dy}{dt} \quad (3.13),$$

όπου τα x και y αναφέρονται στο Σχήμα 11.

Το μέτρο της ταχύτητας των θυγατρικών σταγόνων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u = C_v * C_b * r * \frac{dy}{dt} \quad (3.14),$$

όπου ο συντελεστής C_v λαμβάνει τιμές της τάξης της μονάδας.

Η διεύθυνση της ταχύτητας των θυγατρικών σταγόνων διαφέρει από τη διεύθυνση της πατρικής σταγόνας.

Εν γένει, οι προβλέψεις με βάση το μοντέλο TAB είναι ικανοποιητικές, αλλά κυρίως σε χαμηλές πιέσεις ψεκασμού και αερίου. Ασυμφωνίες με πειραματικά αποτελέσματα μπορούν πρωτίστως να αποδοθούν: (α) στην παρουσία φαινομένων σπηλαιώσης εντός του ακροφυσίου, και στην ύπαρξη του υγρού πυρήνα στην πραγματική ροή, (β) στα υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης των σταγόνων που το μοντέλο προβλέπει. Οι δύο αυτοί παράγοντες έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν δραματικά τη διάσπαση του spray, συνεπώς η διαμόρφωση των εξισώσεων του μοντέλου TAB επιδέχεται βελτίωση [10].

3.3.2 Το Μοντέλο E-TAB (Enhanced TAB model)

Ο Tanner, προσπαθώντας να καταλήξει σε περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα για τα βασικά χαρακτηριστικά του spray (μήκος διείδυσης και μέση ακτίνα σταγόνων), δημιούργησε το 1997 το μοντέλο E-TAB (Enhanced TAB) [10].

Σε σχέση με το μοντέλο TAB, η κύρια διαφορά του νέου μοντέλου έγκειται στον τρόπο υπολογισμού του μεγέθους και του αριθμού των σταγόνων που προκύπτουν από τη διάσπαση μίας σταγόνας. Το μοντέλο E-TAB θεωρεί μία αρχική παραμόρφωση των σταγόνων και μία κατανομή του μεγέθους τους. Επίσης, υποθέτει δύο διαφορετικούς τρόπους διάσπασης της σταγόνας (σακουλοειδή και διατμητική διάσπαση), ενώ η τιμή της σταθεράς K_{br} εξαρτάται από τον τρόπο διάσπασης. Ο ρυθμός διάσπασης της σταγόνας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dn(t)}{dt} = 3 * K_{br} * n(t) \quad (3.15),$$

όπου n είναι ο αριθμός των σταγόνων.

Ανάλογα με τον αριθμό Weber, η σταθερά K_{br} παίρνει τις εξής τιμές:

$$K_{br} = \begin{cases} k_1 * \omega, & We \leq 160 \\ k_2 * \omega * \sqrt{We}, & We > 160 \end{cases} \quad (3.16),$$

όπου ω ο ρυθμός ενίσχυσης των διαταραχών στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου (growth rate), όπως υπολογίζεται από την εξίσωση (3.9).

Πρέπει να τονιστεί πως εδώ ο υπολογισμός του αριθμού Weber γίνεται με βάση τη διάμετρο της σταγόνας, και όχι με βάση την ακτίνα της. Η παραπάνω οριακή τιμή του αριθμού Weber χρησιμοποιείται για την κατανομή των σταγόνων στις διάφορες περιοχές διάσπασης.

Οι τιμές των σταθερών k_1 και k_2 έχουν ορισθεί ίσες με 2/9 [10], έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ταυτίζονται με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας, αναφορικά με το μέγεθος των σταγόνων.

Ο αριθμός των θυγατρικών σταγόνων μπορεί να βρεθεί από τον λόγο:

$$N_{d,child} = \frac{m_{d,parent}}{m_{d,child}} \quad (3.17),$$

όπου $m_{d,parent}$ η μάζα της πατρικής σταγόνας και $m_{d,child}$ η μάζα των θυγατρικών σταγόνων.

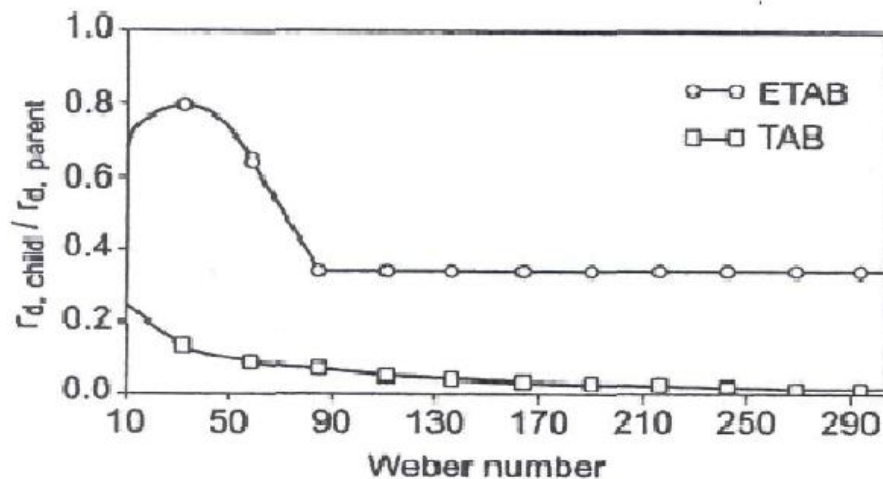
Η ακτίνα των σταγόνων διαφέρει από εκείνη που υπολογίζεται με βάση το μοντέλο TAB, και υπολογίζεται τώρα ως εξής:

$$\frac{r}{r_0} = e^{-K_{br} * t_{br}} \quad (3.18),$$

όπου t_{br} ο χρόνος που βρέθηκε στο μοντέλο TAB.

Παρατηρείται συνεπώς ότι το μοντέλο E-TAB λαμβάνει υπόψη του την εξάρτηση του μεγέθους των σταγόνων από τον χρόνο.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, το μοντέλο E-TAB προβλέπει σταγόνες μεγαλύτερου μεγέθους σε σχέση με το μοντέλο TAB, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα μία πιο ρεαλιστική κατανομή μεγέθους σταγόνων, ιδιαίτερα στην πιο πυκνή περιοχή του spray, κοντά στο ακροφύσιο.



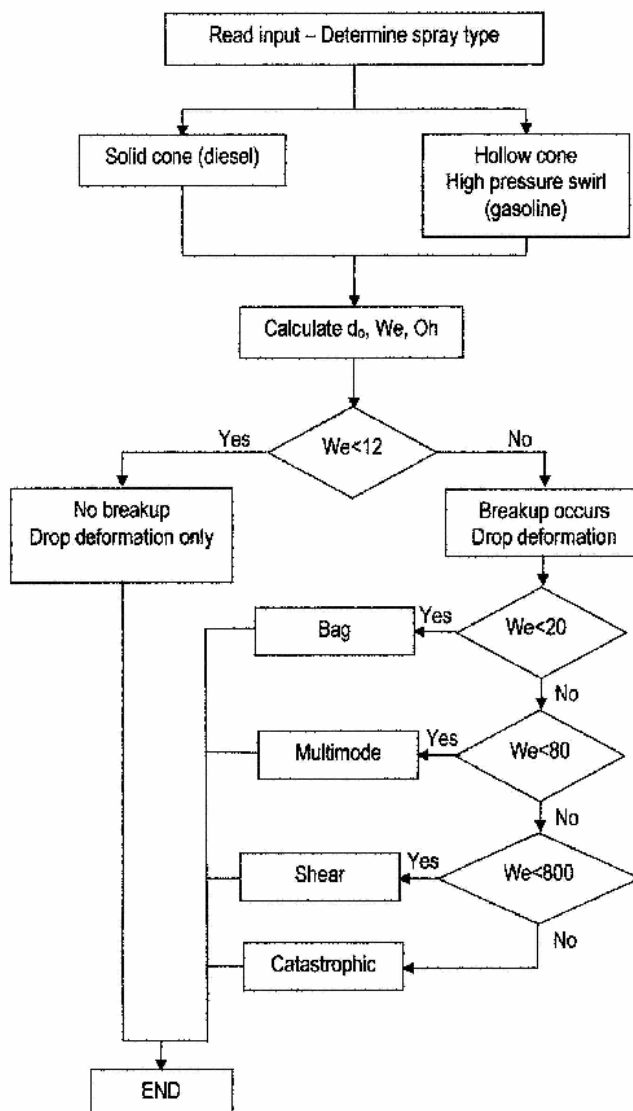
Σχήμα 12: Προβλέψεις μοντέλων TAB και E-TAB: λόγος ακτίνων θυγατρικής και πατρικής σταγόνας, συναρτήσει του αριθμού Weber [7].

3.3.3 Το μοντέλο USB (Unified Spray Breakup model)

Το 2005 οι Chryssakis και Assanis δημιούργησαν το μοντέλο USB (Unified Spray Breakup model) [9,11], το οποίο διακρίνει τη διάσπαση του spray σε τρία στάδια: την πρωτογενή διάσπαση, την παραμόρφωση των σταγόνων λόγω αεροδυναμικών δυνάμεων και τη δευτερογενή διάσπαση. Το μοντέλο λαμβάνει επίσης υπόψη όλους τους δυνατούς τρόπους δευτερογενούς διάσπασης μίας σταγόνας, και όχι μόνο τους δύο του μοντέλου E-TAB. Υπενθυμίζεται πως οι τέσσερις τρόποι διάσπασης είναι οι εξής:

1. Σακουλοειδής διάσπαση (bag breakup): $12 < We < 35$
2. Πολυτροπική διάσπαση (multimode breakup): $35 < We < 80$
3. Διατμητική διάσπαση (shear breakup): $80 < We < 850$ και
4. Καταστροφική διάσπαση (catastrophic breakup): $We > 850$

Η ανάγκη να ληφεί υπόψη καθεμία περιοχή του Διαγράμματος 3 στη μοντελοποίηση του spray οδήγησε στη δημιουργία του μοντέλου USB. Το μοντέλο διαχωρίζει ξεκάθαρα την πρωτογενή από τη δευτερογενή διάσπαση, και περιγράφει ξεχωριστά τον κάθε τρόπο διάσπασης. Συγκεκριμένα, η πρωτογενής διάσπαση βασίζεται στην προσέγγιση των Huh et al. [26], η οποία λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες τύρβης στην έξοδο του ακροφυσίου. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι η δευτερογενής διάσπαση δεν είναι μία στιγμιαία διαδικασία, αλλά έχει κάποια διάρκεια, βασίζεται δε στις σταγόνες που έχουν ήδη δημιουργηθεί από την πρωτογενή διάσπαση. Οι χρόνοι έναρξης και λήξης της διάσπασης δίνονται από τις σχέσεις 2.14-2.19. Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας του μοντέλου USB.



Σχήμα 13: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας του μοντέλου USB [9].

Στο πλαίσιο του μοντέλου USB, αρχικά καθορίζεται ο τύπος του spray (spray βενζίνης, spray Diesel ή άλλος τύπος spray). Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται το κατάλληλο μοντέλο πρωτογενούς διάσπασης για τον υπολογισμό βασικών παραμέτρων της διάσπασης (για παράδειγμα, μήκος διάσπασης και τελική διάμετρος σταγόνας). Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να κατατάξει τις

σταγόνες στις αντίστοιχες περιοχές διάσπασης (breakup regimes). Η κατάταξη γίνεται με βάση την τιμή του αρχικού αριθμού Weber της κάθε σταγόνας. Σε περίπτωση που η τιμή είναι μικρότερη του 12, τότε η σταγόνα δεν διασπάται περαιτέρω.

Τα spray βενζίνης καλύπτουν το κάτω φάσμα των αριθμών Weber, δηλαδή οι κύριοι μηχανισμοί διάσπασης είναι η σακουλοειδής, η πολυτροπική και σε ορισμένες περιπτώσεις η διατμητική διάσπαση. Αντίθετα, τα spray Diesel εκτείνονται στις περιοχές της διατμητικής και της καταστροφικής διάσπασης.

Σε περίπτωση που το υπό μελέτη spray είναι διαφορετικό από αυτά που μελετήθηκαν εδώ (spray Diesel ή spray βενζίνης), τότε το μοντέλο πρωτογενούς διάσπασης μπορεί να τροποποιηθεί, ανάλογα με τη δομή και τα φυσικά χαρακτηριστικά της πρωτογενούς διάσπασης, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία του ακροφυσίου. Αντίθετα, το μοντέλο δευτερογενούς διάσπασης δεν επηρεάζεται, με την προϋπόθεση βέβαια ότι λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες από το μοντέλο πρωτογενούς διάσπασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ιδιότητες βαρέος καυσίμου και εισαγωγή τους στον κώδικα KIVA

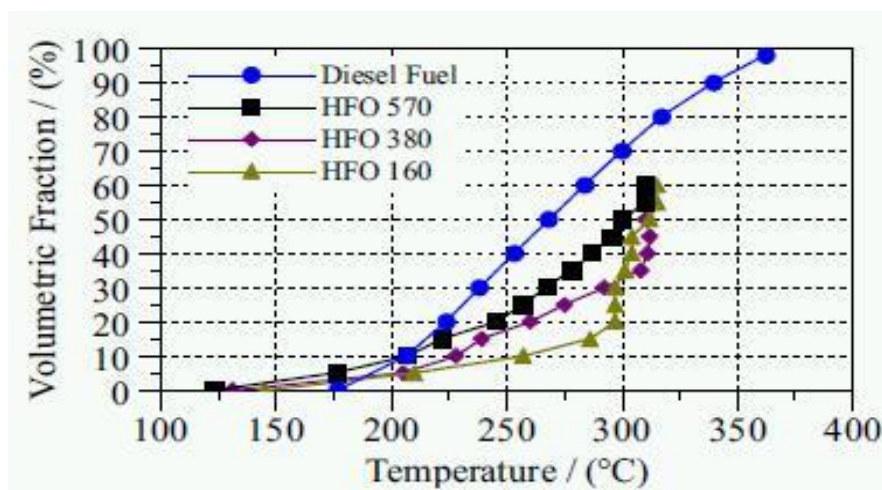
4.1 Ιδιότητες του βαρέος καυσίμου

Η βασικότερη διαφορά του βαρέος καυσίμου σε σχέση με το καύσιμο Diesel έγκειται στις πολύ διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητές του. Αυτή η διαφοροποίηση επηρεάζει άμεσα τη ροή και την καύση του βαρέος καυσίμου.

Το βαρύ καύσιμο βασίζεται στα υπολείμματα της δύλισης του αργού πετρελαίου, και κυρίως της απόσταξης υπό κενό. Αυτά τα υπολείμματα χαρακτηρίζονται από υψηλό ποσοστό μεγάλων και σταθερών μορίων υδρογονανθράκων με υψηλό λόγο άνθρακα-υδρογόνου. Ως αποτέλεσμα, η πυκνότητα και το ιξώδες τους έχουν υψηλές τιμές.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την καύση των spray βαρέος καυσίμου είναι πολύπλοκες, κυρίως λόγω του μεγάλου εύρους μοριακών βαρών και τύπων των μορίων που περιλαμβάνουν τα βαριά καύσιμα.

Τα χαρακτηριστικά πτητικότητας ενός καυσίμου εκφράζονται σε όρους θερμοκρασίας, στην οποία αποστάζουν συγκεκριμένες ποσότητες από ένα δείγμα του καυσίμου, υπό ελεγχόμενη θέρμανση και εντός προτυποποιημένης συσκευής [5]. Η θερμοκρασία απόσταξης ενός κλάσματος είναι σε αντιστοιχία με τις θερμοφυσικές ιδιότητές του, όπως το ιξώδες και η πυκνότητα. Τα τελικά προϊόντα παράγονται με ανάμιξη των επιμέρους κλασμάτων, συνεπώς τα χαρακτηριστικά της ανάμιξης καθορίζουν την ποιότητα των τελικών προϊόντων.



Διάγραμμα 5: Τυπικές καμπύλες απόσταξης: ποσοστό κατ' όγκον ατμοποιημένου καυσίμου, συναρτήσεως της θερμοκρασίας, για διαφορετικά καύσιμα [13].

Μία τυπική καμπύλη απόσταξης περιγράφει το ποσοστό του όγκου του καυσίμου που έχει εξατμιστεί σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Η απόσταξη μπορεί

να γίνει με αρκετές μεθόδους, με πιο συνηθισμένη τη μέθοδο ASTM D-86. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, καταγράφεται η θερμοκρασία στην οποία συμπυκνώνεται συγκεκριμένος όγκος καυσίμου, ο οποίος έχει εξατμιστεί από αρχικό όγκο δείγματος 100 ml. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εισάγονται σε ειδικό λογισμικό, με χρήση του οποίου προκύπτουν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του κάθε καυσίμου.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όλες οι θερμοφυσικές ιδιότητες του υπό μελέτη βαρέος καυσίμου μάς παρασχέθηκαν από την εταιρεία Motor Oil Hellas (Δρ. Γ. Μπέλλος, προσωπική επικοινωνία). Εδώ, θεωρείται ότι το βαρύ καύσιμο αποτελείται από ένα μόνο συστατικό (single-component fuel), και όχι από περισσότερα συστατικά (multicomponent-fuel). Στη συνέχεια, παρατίθενται ορισμένα συγκριτικά διαγράμματα για όλες τις θερμοφυσικές ιδιότητες του καυσίμου, οι τιμές των οποίων εισήχθησαν στον κώδικα KIVA.

Στα Διαγράμματα 6 και 8 γίνεται σύγκριση των δεδομένων της “Motor Oil Hellas” με άλλα αποτελέσματα, προερχόμενα από τη διεθνή βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για δεδομένα που προέκυψαν από έρευνα του Πανεπιστημίου του Rostock [13], και αφορούν τόσο σε τρία βαριά καύσιμα (με τις ονομασίες HFO 160, HFO 380 και HFO 570), όσο και σε ένα καύσιμο Diesel.

Τονίζεται εδώ ότι έγινε η κατάλληλη μετατροπή των μονάδων κάθε μεγέθους, ώστε να υπάρχει αντιστοίχιση με τις βασικές μονάδες του κώδικα KIVA, οι οποίες είναι: gr, cm και K.

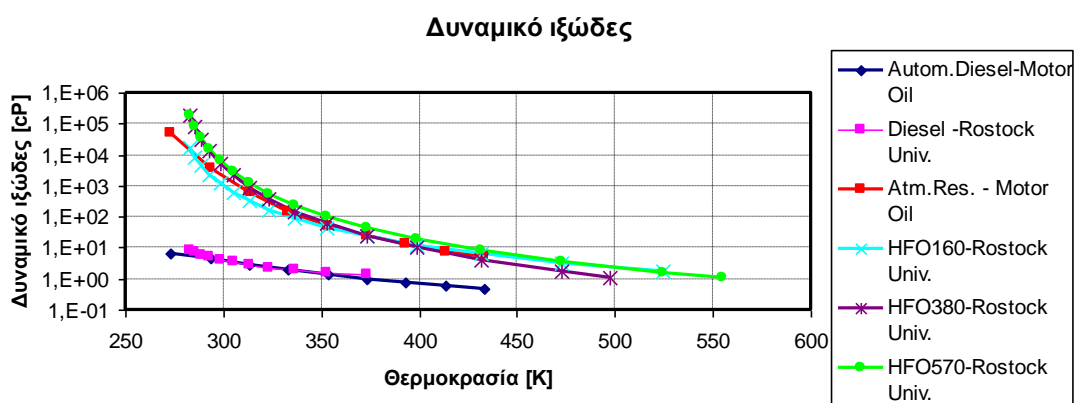
Το μοριακό βάρος του βαρέος καυσίμου που μελετήθηκε είναι 463 kg/kmol, ενώ του καυσίμου Diesel είναι 179 kg/kmol.

Δυναμικό ιξώδες

Το ιξώδες ενός ρευστού αποτελεί ένα μέτρο της εσωτερικής του αντίστασης στη ροή. Η τιμή του ιξώδους του καυσίμου είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στον σχεδιασμό του συστήματος τροφοδοσίας του κινητήρα με καύσιμο. Στα καύσιμα μαζούτ, όπως και στα υπόλοιπα καύσιμα, το κινηματικό ιξώδες μετράται σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D-445, και η τιμή του εκφράζεται συνήθως σε cSt. Προκειμένου τα καύσιμα μαζούτ να συμπεριφέρονται ως νευτώνια ρευστά (σε συμφωνία με τις απαιτήσεις της μεθόδου), η μέτρηση του ιξώδους τους γίνεται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία (50 °C). Αναφορικά με τη διάσπαση του spray καυσίμου σε πολύ μικρά σταγονίδια, η επίδραση του ιξώδους είναι πολύ σημαντική: μεγάλες τιμές του ιξώδους καθιστούν δυσχερή τη διάσπαση. Στην παρούσα εργασία, η θερμοκρασία έγχυσης του καυσίμου Diesel λήφθηκε ίση με 300 K.

Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στο δυναμικό ιξώδες ορισμένων καυσίμων. Εδώ, συγκρίνονται τέσσερα είδη βαρέος καυσίμου και δύο είδη καυσίμου Diesel, με βάση στοιχεία της βιβλιογραφία [13] και της Εταιρείας “Motor Oil Hellas”. Η μορφή των καμπυλών είναι σε συμφωνία με τη γνωστή μείωση του ιξώδους του καυσίμου με αύξηση της θερμοκρασίας. Παρατηρείται πως το δυναμικό ιξώδες του βαρέος καυσίμου στους 300 K είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του καυσίμου Diesel στην ίδια θερμοκρασία. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο, το βαρύ καύσιμο προθερμαίνεται περίπου στους 350 K. Σε αυτή τη θερμοκρασία η τιμή του ιξώδους του είναι και πάλι αρκετά μεγαλύτερη της αντίστοιχης τιμής του Diesel, στους 300 K, όμως η διαφορά έχει μειωθεί κατά μία τάξη μεγέθους.

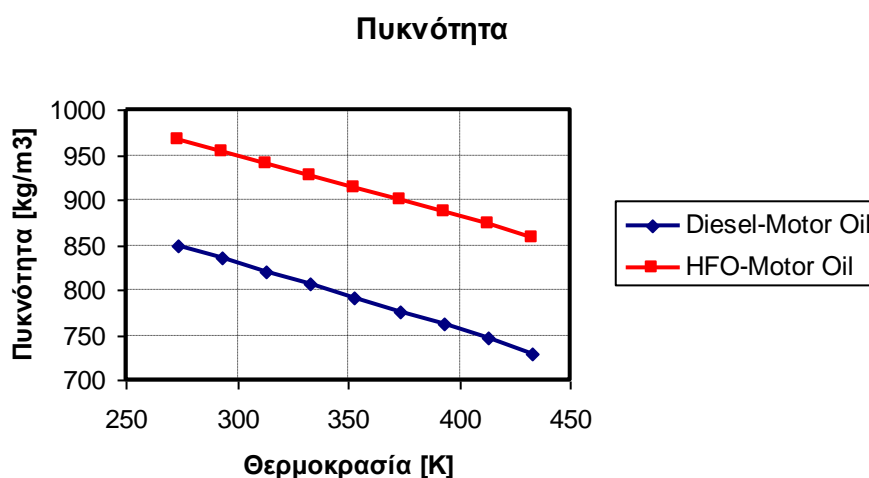
Με βάση τα παραπάνω, αναμένεται μία δυσκολία στη ροή του βαρέος καυσίμου, όπως επίσης και στην ατμοποίησή του.



Διάγραμμα 6: Δυναμικό ιξώδες καυσίμων Diesel και βαρέων καυσίμων, συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

Στο Διάγραμμα 6 φαίνεται μία πολύ καλή σύγκλιση των ερευνητικών αποτελεσμάτων του Πανεπιστημίου του Rostock με τις τιμές που μας παρασχέθηκαν από την εταιρεία “Motor Oil Hellas”. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως πρόκειται για καύσιμα ίδιων ή παρόμοιων ιδιοτήτων.

Πυκνότητα



Διάγραμμα 7: Πυκνότητα καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου, συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

Η πυκνότητα ενός καυσίμου, δηλαδή η μάζα της μονάδας όγκου του, μπορεί να δώσει χρήσιμες ενδείξεις για τη σύστασή του, καθώς και για χαρακτηριστικά του καυσίμου που σχετίζονται με τη λειτουργία του κινητήρα Diesel. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να αφορούν στην ποιότητα της ανάφλεξης, την ισχύ, την οικονομία, τις ιδιότητες ροής σε χαμηλή θερμοκρασία και την τάση σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης. Ορισμένες φορές, χρησιμοποιείται, ισοδύναμα, η *Σχετική Πυκνότητα*, SG, που ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του υγρού προς αυτήν ίσου όγκου νερού στην ίδια θερμοκρασία (συνήθως 60°F, δηλαδή 15.6°C). Άλλη μονάδα έκφρασης είναι το *βάρος API*, που έχει οριστεί από το Αμερικανικό Ινστιτούτο

Πετρελαίου (American Petroleum Institute), και συνιστά μία κλίμακα οριζόμενη από τη σχέση:

$$API (^{\circ}) = (141.5/SG_{60}^{\circ F}) - 131.5 . \quad (4.1)$$

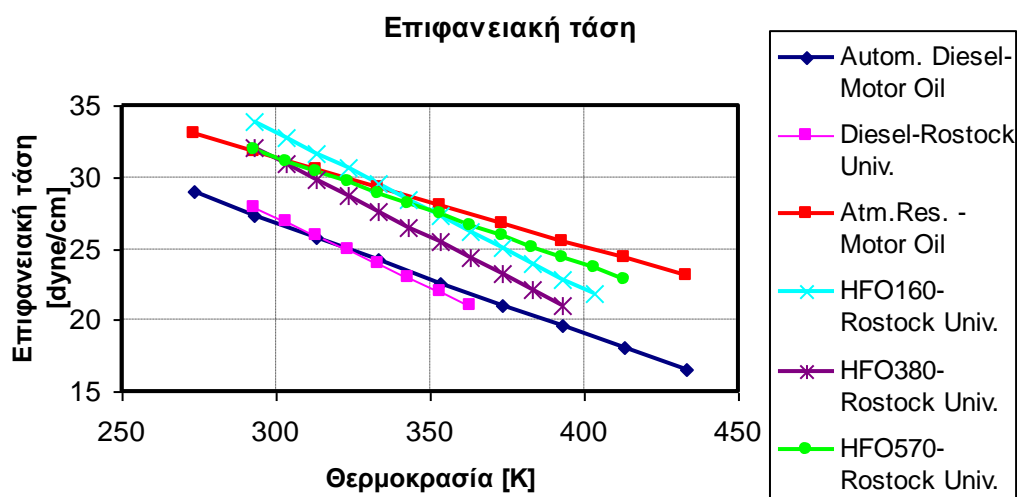
Η μέτρηση της πυκνότητας των μαζούτ γίνεται με τη μέθοδο ASTM D-1298. Εν προκειμένω, στο δείγμα βυθίζεται πυκνόμετρο, το οποίο είναι ένας γυάλινος βαθμονομημένος πλωτήρας. Η μετρώμενη τιμή της πυκνότητας ανάγεται στη θερμοκρασία αναφοράς των 15 °C. Η πυκνότητα των μαζούτ μετράται λίγο πάνω από τους 50 °C, ώστε το δείγμα να είναι πλήρως ομογενοποιημένο [5].

Η πυκνότητα έχει άμεση σχέση με το είδος των υδρογονανθράκων που περιέχονται στο καύσιμο, καθώς και με τον αριθμό ατόμων άνθρακα του μορίου. Η αύξηση του αριθμού ατόμων άνθρακα στο μόριο αυξάνει την πυκνότητα του υδρογονάνθρακα.

Από το Διάγραμμα 7 προκύπτει ότι η πυκνότητα του βαρέος καυσίμου είναι περίπου 13% μεγαλύτερη από εκείνη του καυσίμου Diesel για την ίδια θερμοκρασία. Επειδή όμως το βαρύ καύσιμο προθερμαίνεται στους 353 K (80 °C), η πυκνότητά του είναι μόλις 8% μεγαλύτερη από την πυκνότητα του καυσίμου Diesel στους 300 K.

Επιφανειακή τάση

Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζεται η επιφανειακή τάση διαφόρων καυσίμων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Παρατηρείται πως η επιφανειακή τάση του βαρέος καυσίμου είναι περίπου 20% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του καυσίμου Diesel στους 300 K. Μετά την προθέρμανση όμως του βαρέος καυσίμου στους 353 K, η τιμή της επιφανειακής τάσης του βαρέος καυσίμου σχεδόν ταυτίζεται με αυτή του καυσίμου Diesel στους 300 K.



Διάγραμμα 8: Επιφανειακή τάση καυσίμων Diesel και βαρέων καυσίμων, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

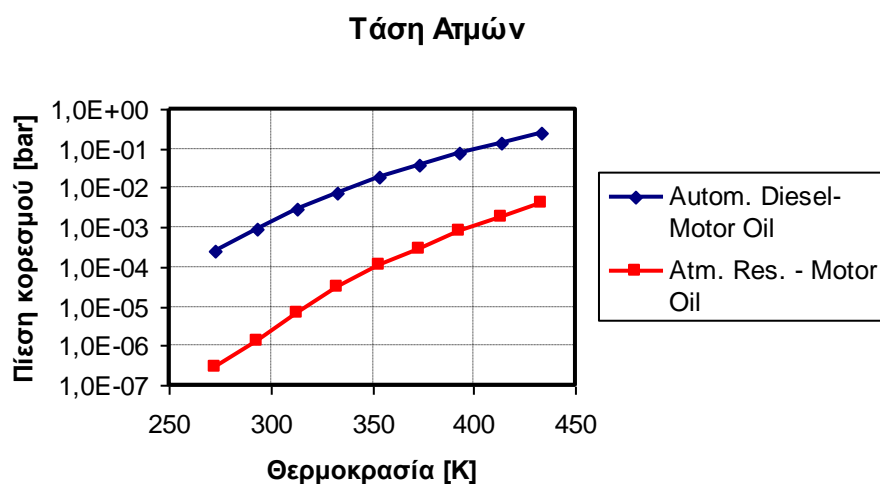
Από το Διάγραμμα 8 προκύπτει μία καλή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα που μας παρασχέθηκαν από τη “Motor Oil Hellas” και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από σχετική έρευνα της ομάδας του Πανεπιστημίου του Rostock [13].

Συγκεκριμένα, αναφορικά με το βαρύ καύσιμο η απόκλιση των καμπυλών είναι μικρή, ενώ οι δύο καμπύλες που αφορούν στο καύσιμο Diesel σχεδόν ταυτίζονται.

Τάση ατμών

Τάση ατμών ενός υγρού σε ορισμένη θερμοκρασία ονομάζεται η πίεση των ατμών της ουσίας, όταν ατμοί και υγρό βρίσκονται σε ισορροπία, στη θερμοκρασία αυτή. Η τάση ατμών εκφράζει, για μία ορισμένη θερμοκρασία, την ευκολία ή τη δυσκολία με την οποία εξατμίζεται ένα υγρό. Έτσι, μία μεγάλη τάση ατμών φανερώνει ευκολία στην εξατμισμό μιας καθαρής ουσίας, καί αντιστρόφως. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση ατμών μιας ουσίας, τόσο πιο πτητική αυτή θεωρείται. Η τάση ατμών ενός σώματος εξαρτάται τόσο από τη φύση της καθαρής ουσίας όσο και από τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι όσο ισχυρότερες είναι οι διαμοριακές δυνάμεις τόσο μικρότερη είναι η τάση ατμών. Επίσης, με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η ταχύτητα εξατμισμού, με συνέπεια να αυξάνεται και η πίεση των ατμών στην ισορροπία.

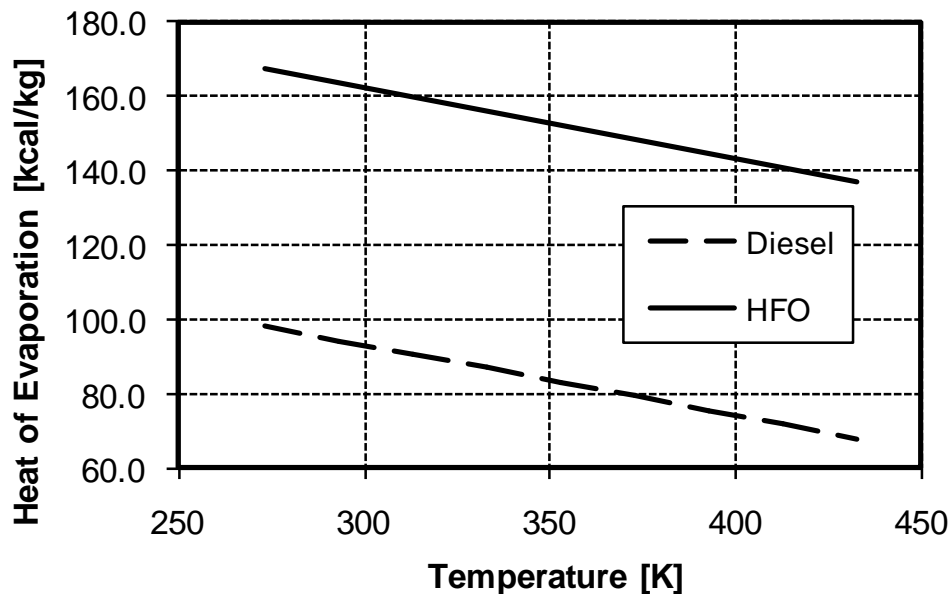
Στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζεται η εξάρτηση της τάσης ατμών από τη θερμοκρασία, για βαρύ καύσιμο και για καύσιμο Diesel.



Διάγραμμα 9: Τάση ατμών καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου, συναρτήσεως της θερμοκρασίας. Πηγή: “Motor Oil Hellas”.

Ενθαλπία εξατμισμού

Ως ενθαλπία εξατμισμού ενός ρευστού ορίζεται η ενέργεια που απαιτείται προκειμένου να μετατραπεί όλη η ποσότητα της υγρής φάσης σε κατάσταση κορεσμού σε αέρια φάση. Στο Διάγραμμα 10 παρουσιάζεται η εξάρτηση της ενθαλπίας εξατμισμού καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου από τη θερμοκρασία.



Διάγραμμα 10: Ενθαλπία εξάτμισης καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου, συναρτήσεως της θερμοκρασίας. Πηγή: “Motor Oil Hellas”.

Αναφλεξιμότητα βαρέος καυσίμου

Οι απαιτήσεις αναφορικά με την ποιότητα της καύσης του βαρέος καυσίμου σε ναυτικούς κινητήρες Diesel εξαρτώνται από το είδος του κινητήρα και τις συνθήκες λειτουργίας του. Δεν υπάρχει κάποια επίσημα καθορισμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της ποιότητας των ναυτιλιακών καυσίμων [5].

Έχει αποδειχθεί ότι τα χαρακτηριστικά της ανάφλεξης του καυσίμου εξαρτώνται τόσο από τις φυσικές, όσο και από τις χημικές ιδιότητές του. Οι φυσικές ιδιότητες που επηρεάζουν την ανάφλεξη περιλαμβάνουν το ιξώδες (συνεπώς εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του καυσίμου), ενώ οι αντίστοιχες χημικές ιδιότητες περιλαμβάνουν τον δείκτη αρωματικότητας.

Ο δείκτης αρωματικότητας (Carbon Calculated Aromatic Index - CCAI) είναι συνάρτηση της πυκνότητας και του ιξώδους του καυσίμου. Η αρωματικότητα ενός καυσίμου δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Για αυτόν τον λόγο έχει αναπτυχθεί μία σχέση από την εταιρεία Shell [15], η οποία δίνει μία ένδειξη της αρωματικότητας του καυσίμου, με βάση την πυκνότητα και το ιξώδες του. Ο δείκτης αρωματικότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

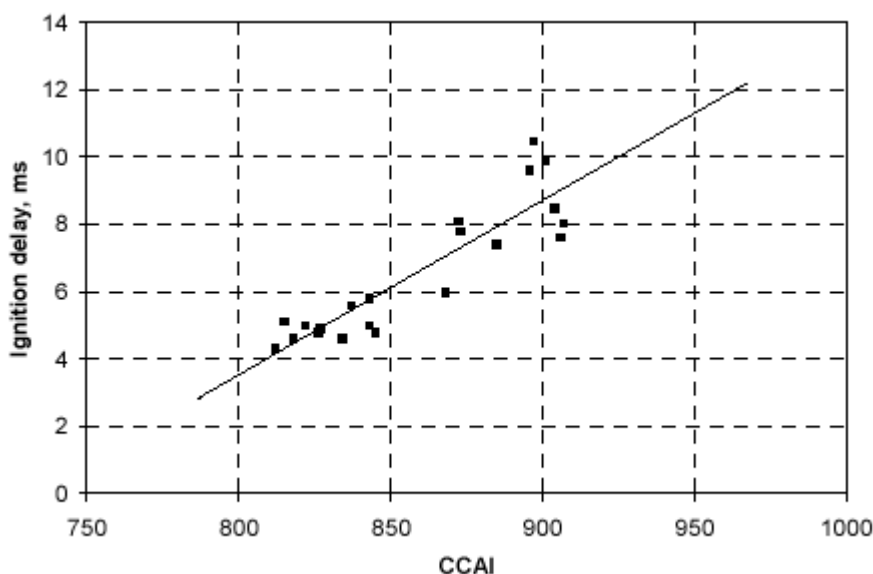
$$CCAI = \rho - 81 - 141 * \log[\log(\nu + 0.85)] - 483 * \log \left[\frac{\Theta + 273}{323} \right] \quad (4.2),$$

όπου:

- ρ : η πυκνότητα του καυσίμου στους 15 °C [kg/m³],
- ν : το κινηματικό ιξώδες στη θερμοκρασία Θ [mm²/s],
- Θ : Θερμοκρασία μέτρησης του κινηματικού ιξώδους (°C),
- log: ο δεκαδικός λογάριθμος.

Ο όρος αρωματικότητα αφορά στο σύνολο των ενώσεων που υπάρχουν στο καύσιμο και περιλαμβάνουν τουλάχιστον έναν αρωματικό δακτύλιο στο μόριό τους. Ανάλογα με τον δείκτη αρωματικότητας, το καύσιμο κατατάσσεται ως προς την ποιότητα της ανάφλεξης. Γενικά, όσο μικρότερος είναι ο δείκτης αρωματικότητας,

τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της ανάφλεξης του καυσίμου. Στο Διάγραμμα 11 φαίνεται η σχέση μεταξύ της καθυστέρησης ανάφλεξης του καυσίμου και του δείκτη αρωματικότητάς του, σε συνθήκες $p=50 \text{ bar}$, $\Theta=490 \text{ }^\circ\text{C}$.



Διάγραμμα 11: Καθυστέρηση ανάφλεξης καυσίμου, σε συνάρτηση με τον δείκτη αρωματικότητας (CCAI), σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας $p=50 \text{ bar}$, $\Theta=490 \text{ }^\circ\text{C}$ [15].

Σε σχέση με την επίδραση του ιξώδους, πολύ μεγάλο ιξώδες οδηγεί σε μεγάλου μεγέθους σταγονίδια καυσίμου, γεγονός που με τη σειρά του εμποδίζει την καλή ανάμιξη αέρα-καυσίμου. Συνέπεια αυτού είναι η καθυστέρηση της ανάφλεξης και της καύσης.

Πρέπει να τονιστεί ότι ο δείκτης αρωματικότητας είναι ένας αδιάστατος αριθμός, ο οποίος χαρακτηρίζει ποιοτικά την ανάφλεξη του κάθε καυσίμου. Ο δείκτης δεν παρέχει ένα απόλυτο μέτρο της καθυστέρησης έναυσης, καθώς αυτή εξαρτάται πολύ περισσότερο από τη γεωμετρία και τον σχεδιασμό της μηχανής, όπως επίσης και από τις συνθήκες λειτουργίας. Για αυτόν τον λόγο, κάθε προσπάθεια καθορισμού ορίων, όσον αφορά στην ικανοποιητική λειτουργία της μηχανής, χαρακτηρίζεται από δυσχέρειες.

Είναι πιθανό μία αργόστροφη μηχανή να λειτουργεί ικανοποιητικά με ένα καύσιμο με δείκτη CCAI μέχρι 870 ή ακόμη και μέχρι 890, ενώ μία άλλη με το ίδιο καύσιμο να αντιμετωπίζει προβλήματα.

Οι μεσόστροφες μηχανές είναι πιο ευαίσθητες σε καύσιμα χαμηλής ποιότητας (μεγάλου δείκτη CCAI) σε σύγκριση με τις αργόστροφες μηχανές. Αυτό σημαίνει ότι η ανοχή των αργόστροφων μηχανών σε καύσιμα χαμηλής ποιότητας είναι μεγαλύτερη, δηλαδή η ανάφλεξη δεν επηρεάζεται σε τόσο μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του καυσίμου, όσο συμβαίνει στις μεσόστροφες μηχανές.

Η κατάταξη των ναυτιλιακών καυσίμων με βάση τον δείκτη αρωματικότητάς τους δίνεται στον Πίνακα 2:

Τιμή CCAI	Ποιότητα ανάφλεξης
790-830	Πολύ καλή έως καλή
830-850	Καλή έως ικανοποιητική
850-870	Μέτρια έως κακή
870-950	Κακή έως μη αποδεκτή

Πίνακας 2: Εξάρτηση της ποιότητας της ανάφλεξης από τον δείκτη αρωματικότητας του καυσίμου.

Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες αυξάνουν την καθυστέρηση ανάφλεξης επειδή εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένη θερμική σταθερότητα στην αέρια φάση. Αυξημένη καθυστέρηση ανάφλεξης μπορεί να σημάνει προβληματική καύση και απρόβλεπτη μεταβολή της πίεσης στον θάλαμο καύσης μετά την ανάφλεξη του καυσίμου.

Από τις δεδομένες ιδιότητες του υπό μελέτη βαρέος καυσίμου, προκύπτει τιμή του δείκτη αρωματικότητας (CCAI) ίση με 818. Για την εύρεση της τιμής αυτής χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα:

$\rho=957 \text{ Kg/m}^3$ και $\nu=3890 \text{ mm}^2/\text{s}$ στους $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Η τιμή του κινηματικού ιξώδους προέκυψε από το πηλίκο του δυναμικού ιξώδους προς την πυκνότητα του βαρέος καυσίμου στη θερμοκρασία των $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Με βάση το Διάγραμμα 11, μία τιμή του δείκτη αρωματικότητας ίση με 800 οδηγεί σε καθυστέρηση ανάφλεξης 3.5 ms . Με δεδομένη τη γραμμική εξάρτηση των δύο μεγεθών, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως, για δείκτη αρωματικότητας ίσο με 818, η καθυστέρηση ανάφλεξης θα είναι περίπου ίση με 4.5 ms . Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, η ποιότητα ανάφλεξης του συγκεκριμένου βαρέος καυσίμου είναι καλή.

4.2 Υπολογισμός κρίσιμης θερμοκρασίας βαρέος καυσίμου

Ως κρίσιμη θερμοκρασία εννοείται η θερμοκρασία, πάνω από την οποία η αέρια φάση δεν μπορεί να μετατραπεί σε υγρή, ανεξάρτητα της πίεσης.

Ο υπολογισμός της κρίσιμης θερμοκρασίας στηρίχθηκε σε κατάλληλες σχέσεις της βιβλιογραφίας, οι οποίες περιλαμβάνουν την ειδική πυκνότητα του καυσίμου και το κανονικό σημείο βρασμού του (normal boiling point) [16]: Ως κανονικό σημείο βρασμού ορίζεται η θερμοκρασία, στην οποία η τάση ατμών του υγρού είναι ίση με την πίεση του περιβάλλοντος.

Αρχικά υπολογίζεται η τιμή του κανονικού σημείου βρασμού με χρήση της σχέσης:

$$K_w = \frac{\sqrt[3]{1.8 * T_b}}{s} \quad (4.3), \text{ όπου:}$$

K_w : μία σταθερά, η τιμή της οποίας δίνεται ίση με 11.7 στη βιβλιογραφία [16]
 T_b : το κανονικό σημείο βρασμού του βαρέος καυσίμου (normal boiling point)
 s : η ειδική πυκνότητα του βαρέος καυσίμου, η οποία έχει την τιμή 0.9537.

$$\left. \begin{aligned} K_w &= \frac{1.8 \cdot T_b^{1/3}}{S} \\ K_w &= 11.7 \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_b = 771.8 K.$$

Στη συνέχεια από τη σχέση

$$T_c = 189.8 + 450.6 * S + T_b * (0.4244 + 0.1174 * S) + \frac{14410 - 100688 * S}{T_b} \quad (4.4)$$

υπολογίζεται η κρίσιμη θερμοκρασία του βαρέος καυσίμου [16], η οποία προκύπτει $T_c = 1033 K$

4.3 Στάδια δημιουργίας του νέου μοντέλου καυσίμου

Αφού συλλέχθηκαν όλες οι απαιτούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου, ελέγχθηκε η σύγκλιση των δεδομένων που μας παρασχέθηκαν από την “Motor Oil Hellas” με τα αποτελέσματα του Πανεπιστημίου του Rostock [13]. Στη συνέχεια, οι ιδιότητες εισήχθησαν στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA3 [30]. Τα δεδομένα εισήχθησαν για διάφορες θερμοκρασίες, από $T=0 K$ έως την κρίσιμη θερμοκρασία, η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2. Προκειμένου να υλοποιηθεί αυτή η διαδικασία, ήταν απαραίτητη η αριθμητική μετατροπή των δεδομένων στις μονάδες που χρησιμοποιούνται στον κώδικα KIVA3.

Πιο συγκεκριμένα, τροποποιήθηκε η υπορουτίνα “fuelib.f” του κώδικα KIVA3. Πρόκειται για μία υπορουτίνα, η οποία υπολογίζει όλες τις απαιτούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες των καυσίμων. Σε αυτή προστέθηκαν οι ιδιότητες του νέου καυσίμου (βαρύ καύσιμο). Στον Πίνακα 3 παρατίθενται οι μονάδες του κώδικα KIVA3 και οι αντίστοιχες των δεδομένων της “Motor Oil Hellas”.

Ιδιότητα	Μονάδες “Motor Oil”	Μονάδες “KIVA3”	Ισοδυναμία
Δυναμικό ιξώδες	cP	gr/(cm*s)	1 cP = 10^{-2} gr/(cm*s)
Επιφανειακή τάση	dyn/cm	dyn/cm	-----
Πυκνότητα	kg/m ³	ton/m ³	1 ton/m ³ = 1000 kg/m ³
Τάση ατμών	bar	dyn/cm ²	1 bar = 10^6 dyn/cm ²
Ενθαλπία εξάτμισης	kcal/kg	erg/gr	1kcal/kg = $4.2 \cdot 10^{13}$ erg/gr

Πίνακας 3: Μετατροπή μονάδων ιδιοτήτων βαρέος καυσίμου.

Στο Παράρτημα 1 παρατίθενται τμήματα της τροποποιημένης υπορουτίνας fuelib.f του κώδικα KIVA3.

Ακολούθως καθορίστηκαν τα κριτήρια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, και οι περιπτώσεις που θα εξεταστούν. Ως κριτήρια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν το μήκος διείσδυσης του υγρού spray στον θάλαμο καύσης (tip penetration) και η μέση διάμετρος των σταγονιδίων του καυσίμου (SMD). Πρόκειται για δύο χαρακτηριστικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν σε

σημαντικό βαθμό τη ροή ενός spray καυσίμου, και κατά συνέπεια την ατμοποίησή του και την καύση.

Με τον όρο «μήκος διείσδυσης» (tip penetration) εννοείται η απόσταση μεταξύ της εξόδου του ακροφυσίου και του σημείου όπου βρίσκονται οι πλέον απομακρυσμένες σταγόνες, μετά τη διάσπαση του spray. Στους παρόντες υπολογισμούς, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του μήκους διείσδυσης του spray, το κριτήριο που προτάθηκε από τον Μ. Γκαβαϊσέ το 1995 [35]. Σύμφωνα με αυτό, ως μήκος διείσδυσης λαμβάνεται ο μέσος όρος της απόστασης των δέκα πιο απομακρυσμένων σταγονιδίων του καυσίμου από την έξοδο του ακροφυσίου.

Ως «μέση διάμετρος SMD» (Sauter Mean Diameter) εννοείται η διάμετρος της σταγόνας που θα ήταν αντιπροσωπευτική όλου του spray καυσίμου και ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου προς την επιφάνεια ολόκληρου του spray του καυσίμου:

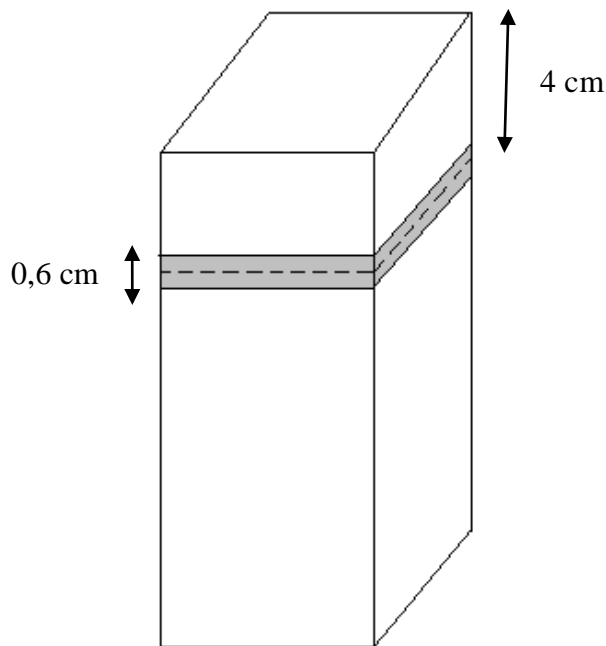
$$SMD = 6 * \frac{V_p}{A_p} \quad (4.5),$$

όπου:

V_p : ο συνολικός όγκος όλων των σταγόνων και

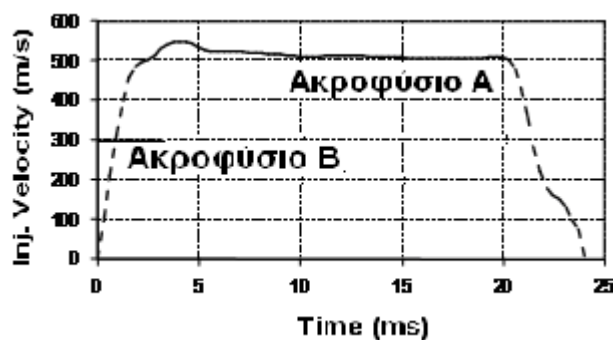
A_p : η συνολική επιφάνεια όλων των σταγόνων.

Στο πλαίσιο των παρόντων υπολογισμών σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου, θεωρείται ένας συγκεκριμένος όγκος ελέγχου για τον υπολογισμό του SMD. Έτσι, θεωρείται αρχικά ένα επίπεδο σε απόσταση 4 cm από το ακροφύσιο, και άλλα δύο επίπεδα σε απόσταση 0.3 cm εκατέρωθεν αυτού. Ο όγκος ελέγχου είναι αυτός που περιλαμβάνεται ανάμεσα στα τελευταία δύο επίπεδα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο συνολικός όγκος και η συνολική επιφάνεια όλων των σταγονιδίων που βρίσκονται μέσα σε αυτό τον όγκο ελέγχου, και η τιμή της διαμέτρου SMD από τη σχέση 4.5.



Σχήμα 14: Καθορισμός του όγκου ελέγχου για τον υπολογισμό της διαμέτρου SMD.

Στο επόμενο βήμα, έγινε ο καθορισμός των φυσικών συνθηκών που επικρατούν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Επιλέγησαν δύο διαφορετικά προφίλ έγχυσης καυσίμου, τα οποία παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 12. Το πρώτο προφίλ είναι αντιπροσωπευτικό ενός ναυτικού αργόστροφου κινητήρα, και χρησιμοποιήθηκε εδώ για ακροφύσιο διαμέτρου ακροφυσίου 0,9 χιλιοστών (Ακροφύσιο A). Το συγκεκριμένο προφίλ έγχυσης παρασχέθηκε από την εταιρεία κατασκευής ναυτικών κινητήρων Wartsila Switzerland. Το δεύτερο προφίλ έγχυσης καυσίμου χρησιμοποιήθηκε για ακροφύσιο διαμέτρου ακροφυσίου 0,37 χιλιοστών (Ακροφύσιο B), χαρακτηριστικό ενός μεσόστροφου κινητήρα. Το συγκεκριμένο προφίλ έγχυσης διατηρεί μία σταθερή ταχύτητα έγχυσης, ίση με 300 m/s. Η τιμή αυτή της ταχύτητας είναι αντιπροσωπευτική των ταχυτήτων έγχυσης του καυσίμου σε μεσόστροφους ναυτικούς κινητήρες.



Διάγραμμα 12: Χρονικά προφίλ έγχυσης καυσίμου σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου.

Όσον αφορά στις πιέσεις του αερίου μέσα στον θάλαμο καύσης, επιλέχθηκαν οι τιμές των 30 και 100 bar. Καί οι δύο τιμές χρησιμοποιήθηκαν για καθένα από τα ακροφύσια Α και Β.

Η μάζα του εγχεόμενου καυσίμου διαφέρει για τα δύο προφίλ έγχυσης. Από το ακροφύσιο Α εγχέονται 4 g από κάθε οπή μέσα στον θάλαμο καύσης, ενώ από το ακροφύσιο Β εγχέονται 95.2 mg από κάθε οπή μέσα στον θάλαμο καύσης. Οι αριθμοί αυτοί βρέθηκαν από τη σχέση:

$$m = \int V * \rho * A * dt, \text{ όπου:}$$

m: η εγχεόμενη μάζα καυσίμου

V: η στιγμιαία ταχύτητα έγχυσης

ρ : η πυκνότητα του αέρα

A: η διατομή του ακροφυσίου

t: ο χρόνος έγχυσης του καυσίμου.

Για το Ακροφύσιο Α, ο χρόνος έγχυσης του καυσίμου είναι ίσος με 23 ms (βλ. Διάγραμμα 12). Για το Ακροφύσιο Β, ο χρόνος έγχυσης του καυσίμου είναι, σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν εδώ, ίσος με 3.5 ms. Ο συγκεκριμένος χρόνος έγχυσης επιλέχθηκε ώστε να αντιστοιχεί στην εγχεόμενη μάζα σε αντίστοιχη μεσόστροφη μηχανή. Τέλος, η θερμοκρασία μέσα στον θάλαμο καύσης ορίστηκε στους 400 K, ενώ η επιλογή των θερμοκρασιών έγχυσης των δύο καυσίμων έχει αναλυθεί στην παράγραφο 4.1.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα μεγέθη που εισήχθησαν στον κώδικα ΚΙΥΑ3, για καθένα από τα δύο ακροφύσια.

Μέγεθος	Ακροφύσιο Α	Ακροφύσιο Β
Πίεση θαλάμου καύσης	30 ή 100 bar	30 ή 100 bar
Μάζα καυσίμου	4 g	95.2 mg
Θερμοκρασία θαλάμου καύσης	400 K	400 K
Ταχύτητα έγχυσης καυσίμου	0-550 m/s	300 m/s
Διάρκεια έγχυσης καυσίμου	23 ms	3.5 ms

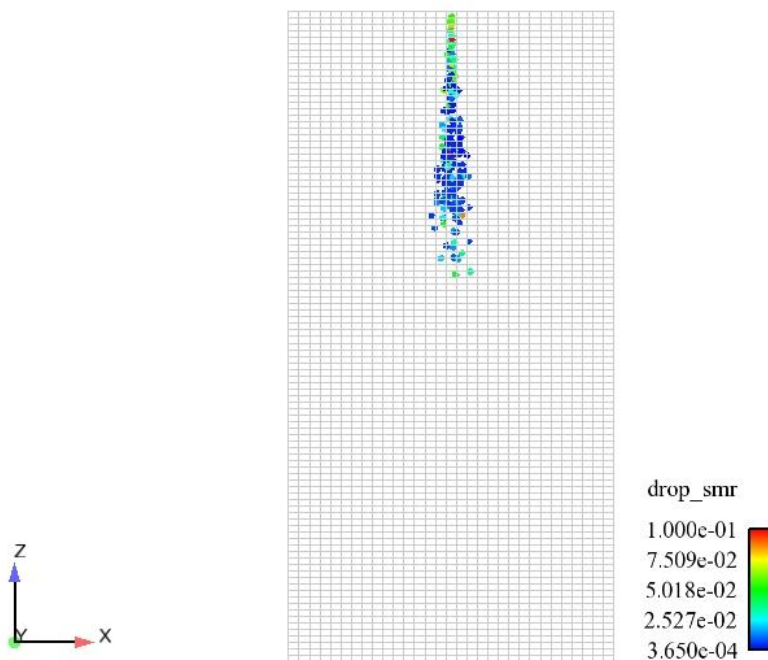
Πίνακας 4: Τιμές φυσικών μεγεθών για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA3, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών του spray, τα οποία είναι άμεσα συναρτώμενα με τη διάσπαση του spray (μήκος διείδυσης του spray και μέσο μέγεθος σταγονιδίων), για τις διάφορες περιπτώσεις και συνθήκες που εξετάστηκαν. Εδώ, εκτελέστηκαν υπολογισμοί υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για βαρύ καύσιμο, καθώς και για καύσιμο Diesel. Το τελευταίο προσεγγίστηκε ως καθαρό δεκατετράνιο ($C_{14}H_{30}$). Χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα διάσπασης του spray καυσίμου, το μοντέλο E-TAB και το μοντέλο USB. Τέλος, επιχειρήθηκε ο βέλτιστος προσδιορισμός ορισμένων μεταβλητών των μοντέλων, προκειμένου να υπάρχει καλύτερη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Για τον σκοπό αυτό διερευνήθηκε η επίδραση μίας σημαντικής σταθεράς του μοντέλου E-TAB στα βασικά χαρακτηριστικά του spray.

Στους παρόντες υπολογισμούς, θεωρήθηκε ένας θάλαμος καύσης σταθερού όγκου, ύψους 20 cm, στην κορυφή του οποίου ψεκάζεται το καύσιμο από το ακροφύσιο (βλ. Σχήμα 9).



Σχήμα 15: Απεικόνιση του spray στον θάλαμο καύσης σταθερού όγκου.

Στο Σχήμα 15 απεικονίζεται ένα spray καυσίμου Diesel μέσα στον θάλαμο. Το χρώμα των σταγονιδίων είναι ανάλογο του μεγέθους τους (SMR). Το Σχήμα 15 αντιστοιχεί σε spray καυσίμου Diesel, πίεση 30 bar, χρησιμοποιούμενο ακροφύσιο είναι το A, και

το μοντέλο spray είναι το USB. Σημειώνεται ότι τα μοντέλα διάσπασης spray E-TAB και USB έχουν πιστοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία με χρήση καυσίμου Diesel. Η δυσκολία στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγκειται στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων με χρήση του νέου μοντέλου βαρέος καυσίμου.

Οι τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο περιπτώσεις που μελετούμε (Ακροφύσιο A, Ακροφύσιο B) παρατίθενται στον Πίνακα 5.

Μέγεθος	Ακροφύσιο A	Ακροφύσιο B
Πίεση θαλάμου καύσης	30 ή 100 bar	30 ή 100 bar
Μάζα καυσίμου	4 g	95.2 mg
Αρχική θερμοκρασία θαλ. καύσης	400 K	400 K
Ταχύτητα έγχυσης καυσίμου	0-550 m/s	300 m/s
Θερμοκρασία καυσίμου	Diesel: 300 K Βαρύ καύσιμο: 353 K	Diesel: 300 K Βαρύ καύσιμο: 353 K

Πίνακας 5: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών στις δύο περιπτώσεις που μελετούνται (Ακροφύσια A και B).

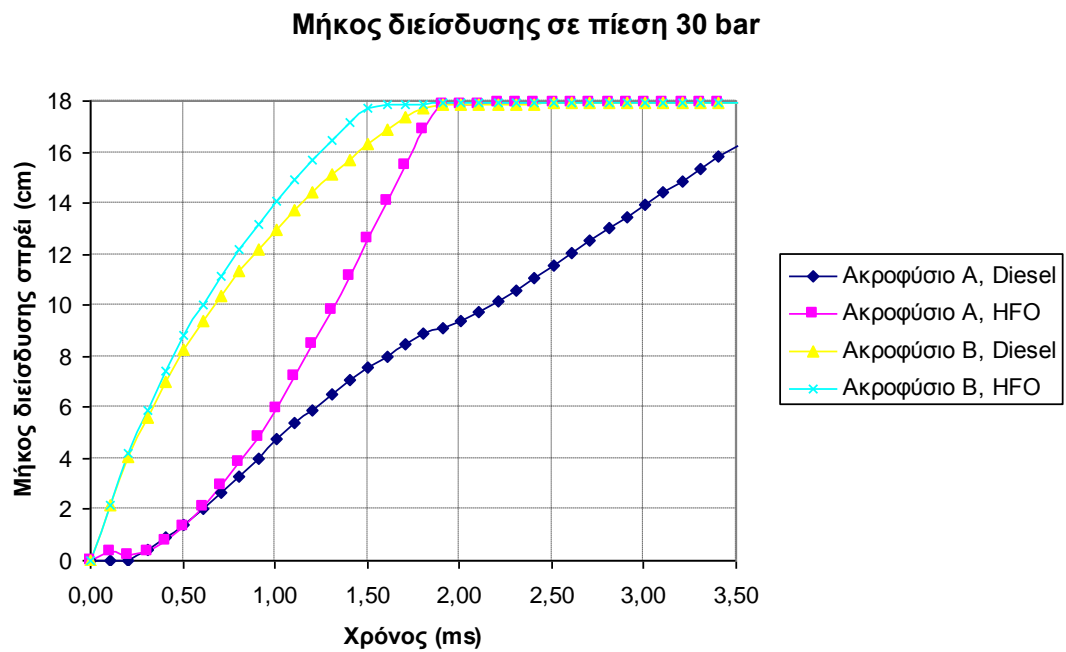
Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι, από τις δύο χρησιμοποιούμενες πιέσεις, η χαμηλή πίεση εντός του θαλάμου καύσης (30 bar) αντιστοιχεί σε μερικό φορτίο ή σε προέγχυση κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Αντίθετα, η υψηλή πίεση (100 bar) αντιστοιχεί σε συνθήκες λειτουργίας δίχρονου ναυτικού κινητήρα σε πλήρες φορτίο.

5.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση του μοντέλου E-TAB

Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με χρήση του μοντέλου E-TAB, για τα δύο καύσιμα και τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης.

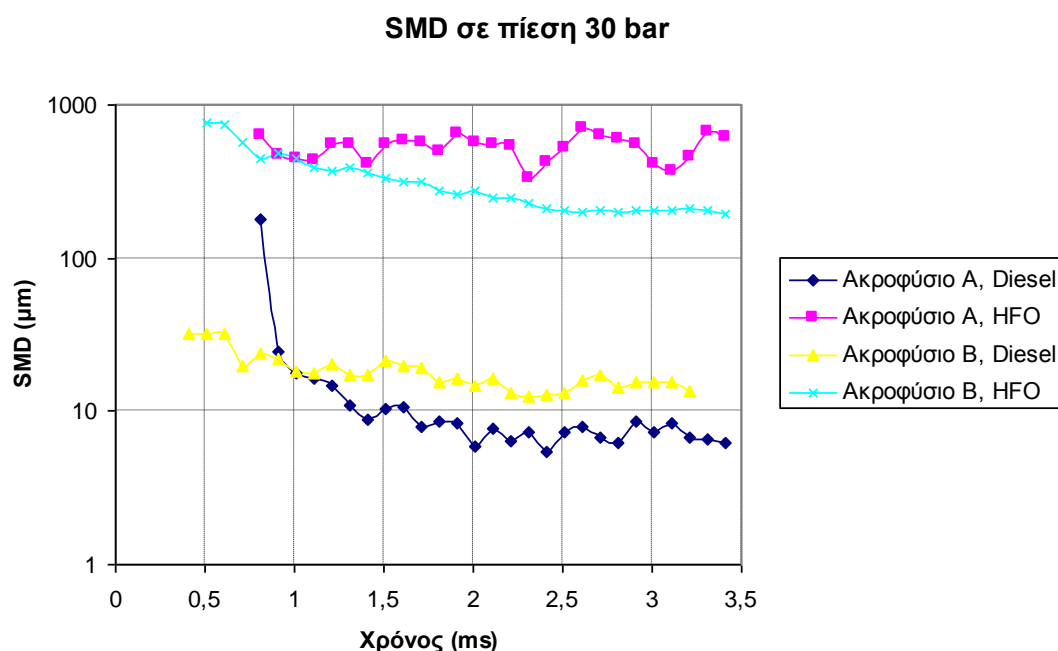
5.1.1.1 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου για πίεση θαλάμου καύσης 30 bar

A) Μήκος διείσδυσης (tip penetration)



Διάγραμμα 13: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

B) Μέση διάμετρος σταγόνας (Sauter Mean Diameter - SMD)



Διάγραμμα 14: Μέση διάμετρος σταγόνας συναρτήσεως του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζεται το μήκος διεύθυνσης των δύο spray για τα δύο ακροφύσια, σε πίεση 30 bar, ενώ στο Διάγραμμα 14 παρουσιάζεται η μέση διάμετρος των σταγονιδίων, για τις ίδιες περιπτώσεις.

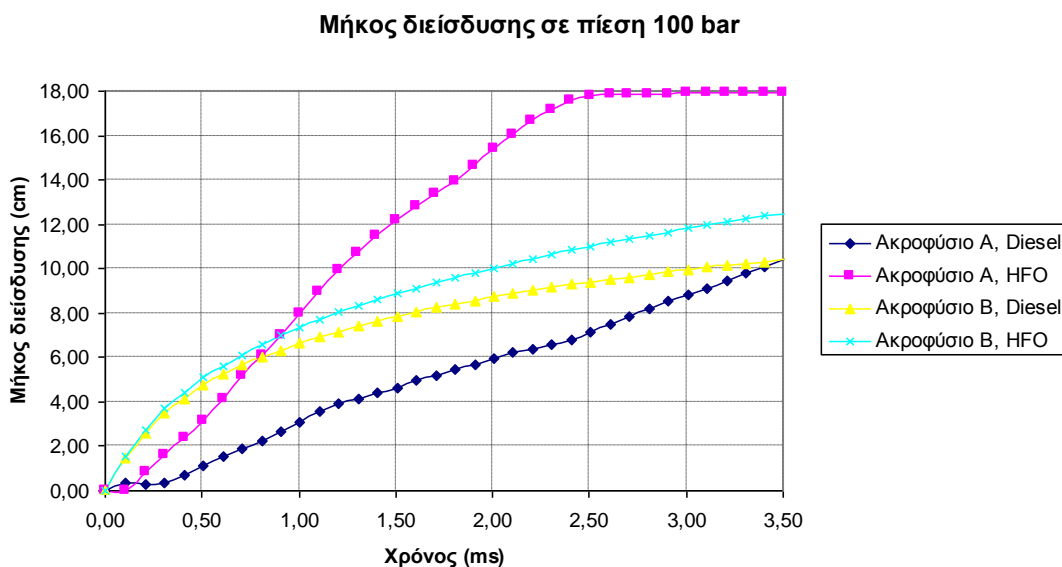
Από το Διάγραμμα 13 μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι το μήκος διεύθυνσης του βαρέος καυσίμου είναι και για τα δύο ακροφύσια μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του καυσίμου Diesel. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το μεγαλύτερο μέγεθος των σταγονιδίων του βαρέος καυσίμου (SMD), γεγονός που αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 14.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η διαφορά στη μορφή της καμπύλης του μήκους διεύθυνσης μεταξύ των δύο καυσίμων είναι αρκετά μεγαλύτερη, στις περιπτώσεις του Ακροφυσίου Α. Φαίνεται ότι τα δύο καύσιμα ακολουθούν κοινή πορεία για χρόνο 1 ms μετά την έναρξη του ψεκασμού. Μετέπειτα, όμως, τα σταγονίδια του βαρέος καυσίμου διασπώνται λιγότερο εύκολα, με αποτέλεσμα το μήκος διεύθυνσης να αυξάνει σημαντικά. Αντίθετα, τα σταγονίδια του καυσίμου Diesel συνεχίζουν να διασπώνται με σταθερό ρυθμό, και το τελικό μήκος διεύθυνσης του spray (στα 3.5 ms) φτάνει στα 16.1 cm.

Όσον αφορά στο ακροφύσιο Β, οι καμπύλες για τα δύο καύσιμα είναι πολύ παρόμοιες. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στα δύο καύσιμα έγκειται στην ελάχιστη ταχύτερη διάσπαση των σταγονιδίων του καυσίμου Diesel, γεγονός που οδηγεί σε λίγο βραδύτερη εξάπλωση του spray.

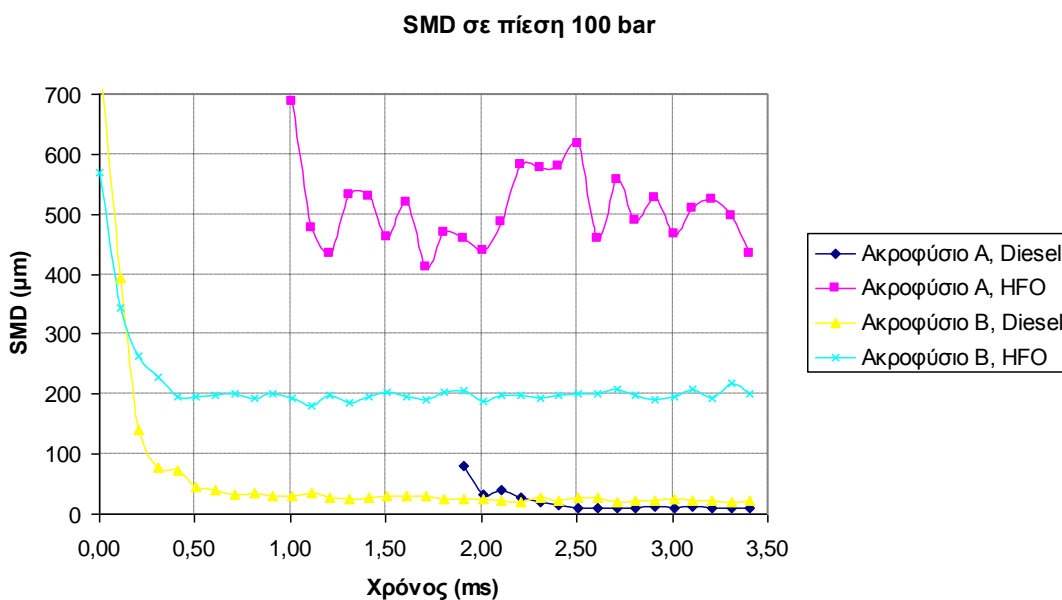
5.1.1.2 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου με πίεση θαλάμου καύσης 100 bar

A) Μήκος διείσδυσης (tip penetration)



Διάγραμμα 15: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

B) Διάμετρος μέσης σταγόνας (Sauter Mean Diameter-SMD)



Διάγραμμα 16: Μέση διάμετρος σταγόνας συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζεται το μήκος διείδυσης των δύο spray για τα δύο ακροφύσια, σε πίεση 100 bar, ενώ στο Διάγραμμα 16 παρουσιάζεται η μέση διάμετρος των σταγονιδίων, για τις ίδιες περιπτώσεις.

Στο Διάγραμμα 15 φαίνεται εμφανώς το μεγαλύτερο μήκος διείδυσης του spray βαρέος καυσίμου σε σχέση με το spray Diesel, και για τα δύο ακροφύσια. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι η χρονική μεταβολή του μήκους διείδυσης του spray του καυσίμου Diesel των δύο ακροφυσίων έχει διαφορετική μορφή. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές αρχικές ταχύτητες των δύο προφίλ έγχυσης. Στην περίπτωση του ακροφυσίου B, η ταχύτητα είναι σταθερή, με αποτέλεσμα το spray να διειδύει ταχύτερα από ό,τι στην περίπτωση του ακροφυσίου A. Σε μεγαλύτερους όμως χρόνους, το spray του ακροφυσίου A έχει αποκτήσει αρκετά μεγάλη ταχύτητα, οπότε διειδύει ταχύτερα, μέχρι οι αεροδυναμικές δυνάμεις να το επιβραδύνουν. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί το ίδιο ακριβώς μέγεθος των σταγονιδίων καυσίμου Diesel, για αμφότερα τα ακροφύσια (Διάγραμμα 16).

Η επίδραση του μεγέθους του ακροφυσίου είναι μεγαλύτερη για το βαρύ καύσιμο, καθώς οι διάμετροι των σταγόνων του ακροφυσίου A είναι πολύ μεγαλύτερες (διπλάσιες) από τις αντίστοιχες του ακροφυσίου B.

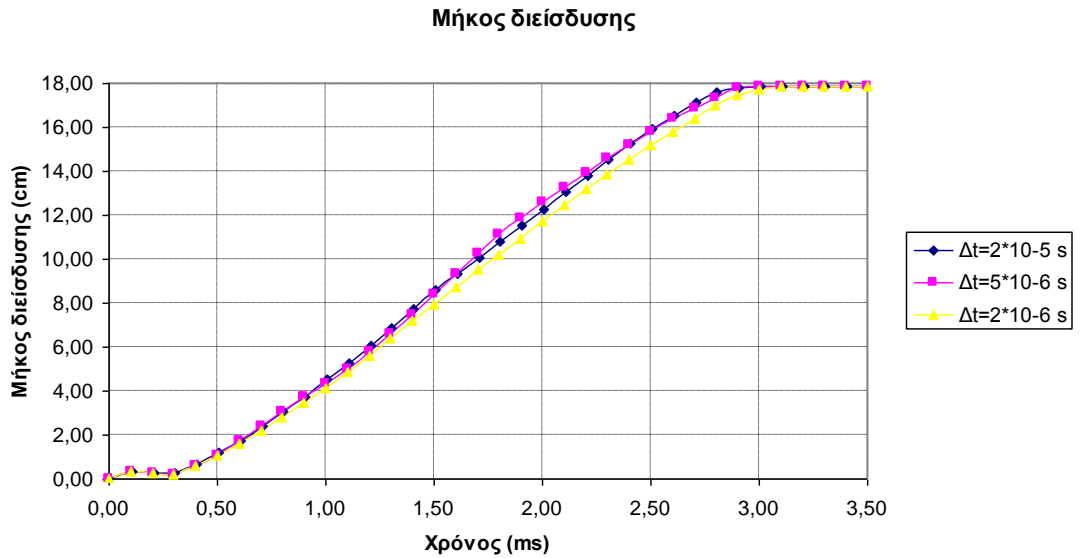
Τέλος, αξίζει και πάλι να σημειωθεί, πως και σε αυτή την περίπτωση οι μορφές των καμπυλών του μήκους διείδυσης των δύο spray στο ακροφύσιο B είναι παρόμοιες. Όσον αφορά στο ακροφύσιο A, η καμπύλη του spray βαρέος καυσίμου αποκολλάται πολύ νωρίς από την καμπύλη του spray Diesel και φτάνει έως τα 18 cm, δηλαδή έως την απέναντι πλευρά του δοχείου.

5.1.1.3. Έλεγχος επίδρασης του χρονικού βήματος (timestep)

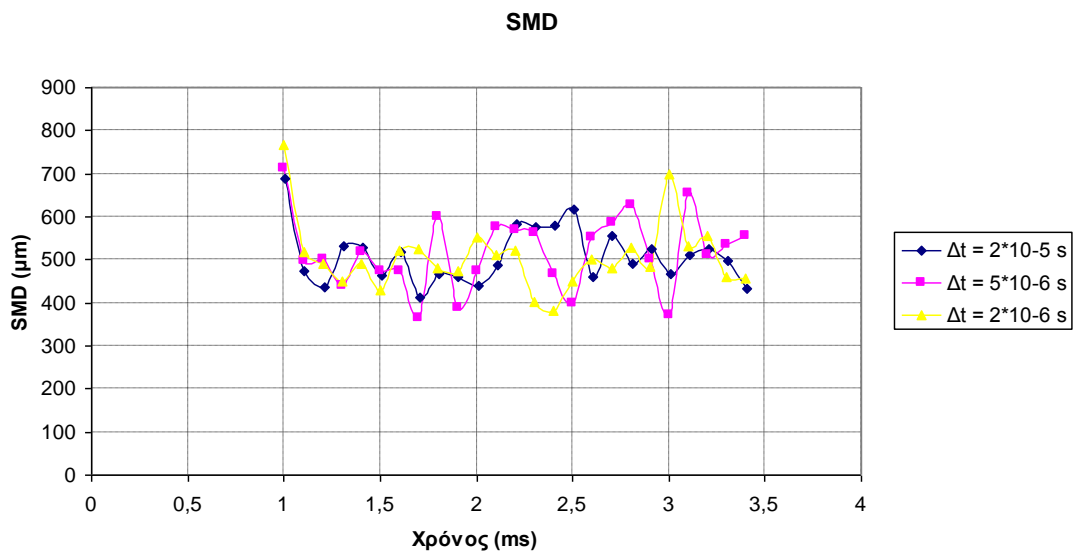
Κρίθηκε αναγκαία η ανάλυση της επίδρασης του χρονικού βήματος στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του μοντέλου E-TAB.

Όσο μικρότερο είναι το χρονικό βήμα, τόσο ακριβέστερα είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Από την άλλη πλευρά, σημαντική μείωση του χρονικού βήματος συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις, με τρία διαφορετικά χρονικά βήματα για την περίπτωση του ακροφυσίου A, σε πίεση 100 bar με βαρύ καύσιμο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 17 και 18.



Διάγραμμα 17: Μήκος διείδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο, για το ακροφύσιο A, για διαφορετικές τιμές του χρησιμοποιούμενου χρονικού βήματος. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.



Διάγραμμα 18: Μέση διάμετρος σταγόνας συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο, για το ακροφύσιο A, για διαφορετικές τιμές του χρησιμοποιούμενου χρονικού βήματος. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Στο Διάγραμμα 17 παρουσιάζεται το μήκος διείδυσης spray βαρέος καυσίμου σε πίεση 100 bar για τρία διαφορετικά χρονικά βήματα. Στο Διάγραμμα 18 φαίνεται το μέγεθος των σταγονιδίων για την ίδια περίπτωση. Από τα δύο διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι, για τιμές του χρονικού βήματος μικρότερες των $2 \cdot 10^{-5}$ s, το χρονικό βήμα επιδρά ελάχιστα στα αριθμητικά αποτελέσματα. Έτσι, επιλέγεται το χρονικό βήμα των $2 \cdot 10^{-5}$ s, με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

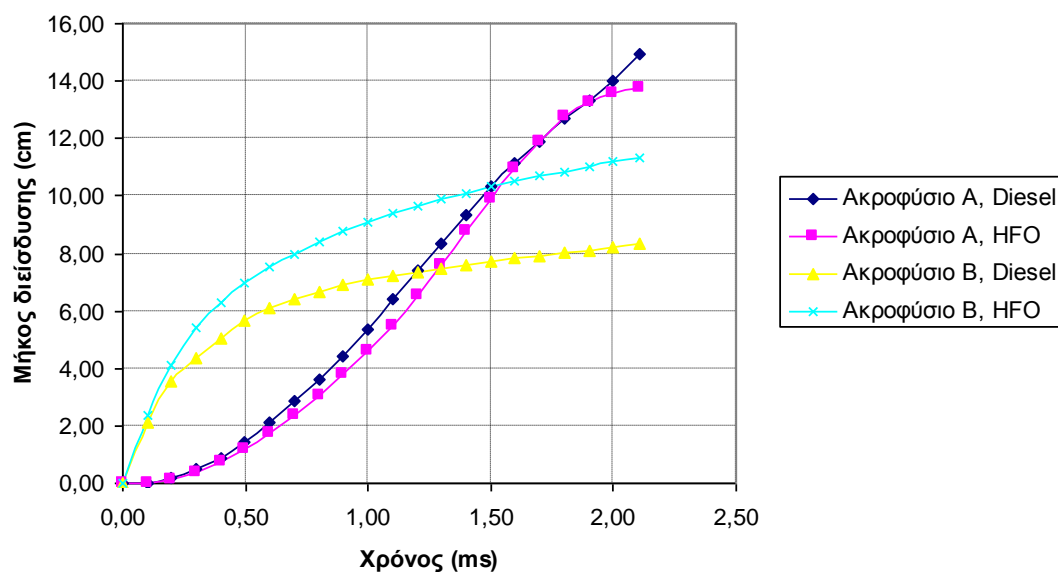
5.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο USB

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης με χρήση του μοντέλου USB για τα δύο καύσιμα και τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης.

5.1.2.1 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου για πίεση θαλάμου καύσης 30 bar

Α) Μήκος διείσδυσης (tip penetration)

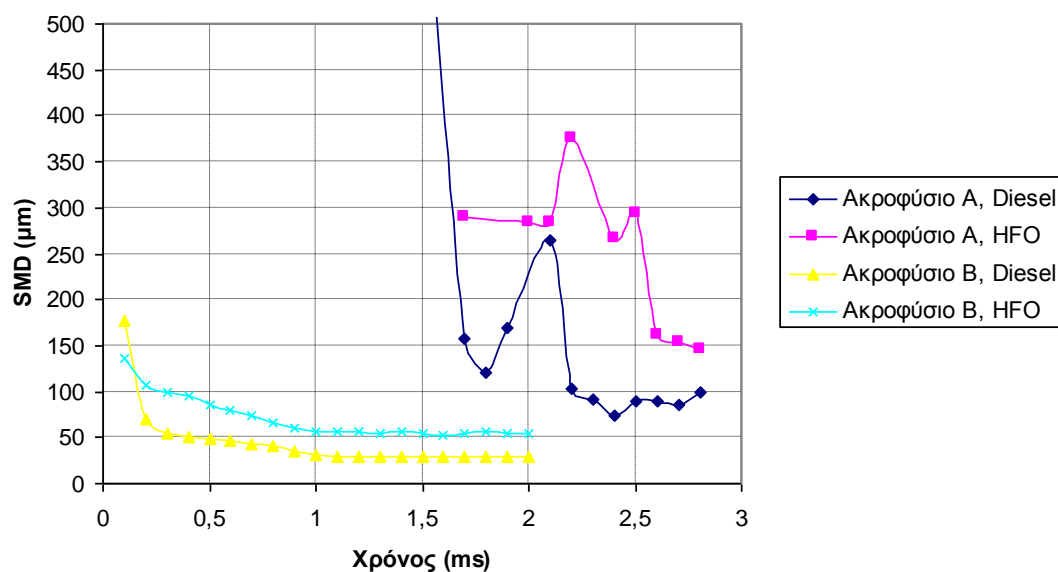
Μήκος διείσδυσης σε πίεση 30 bar



Διάγραμμα 19: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

B) Μέση διάμετρος σταγόνας (Sauter Mean Diameter-SMD)

SMD σε πίεση 30 bar



Διάγραμμα 20: Μέση διάμετρος σταγόνας συναρτήσεως του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

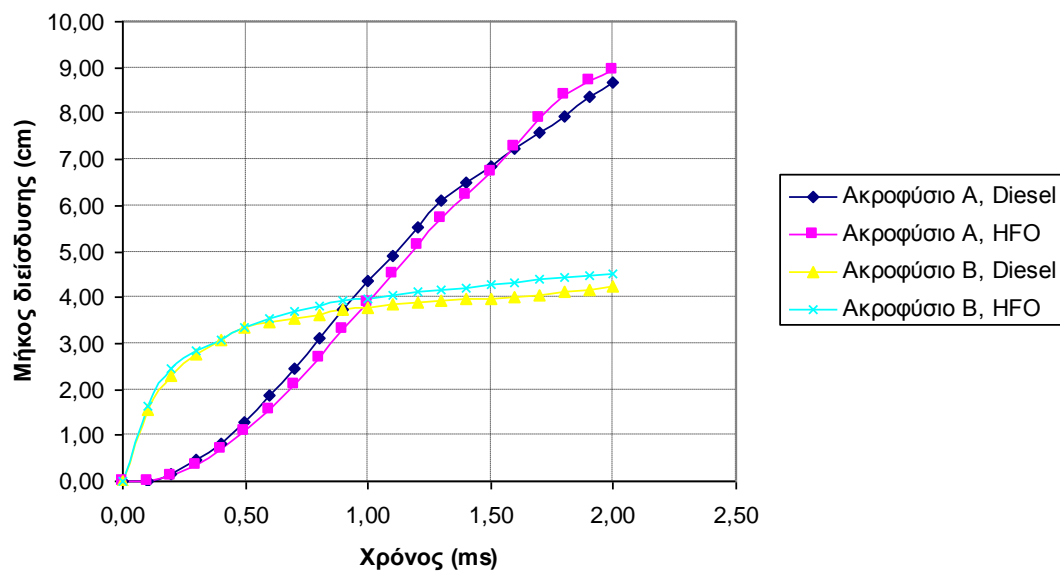
Στο Διάγραμμα 19 παρουσιάζεται το μήκος διεύθυνσης των δύο spray για τα δύο ακροφύσια σε πίεση 30 bar, ενώ στο Διάγραμμα 20 παρουσιάζεται η μέση διάμετρος των σταγονιδίων στην ίδια περίπτωση. Από το Διάγραμμα 19 προκύπτει ότι, στην περίπτωση του ακροφυσίου B, το spray του βαρέος καυσίμου διευσθύνει 30% μακρύτερα σε σχέση με το καύσιμο Diesel. Αντίθετα, στην περίπτωση του ακροφυσίου A, τα δύο καύσιμα χαρακτηρίζονται από το ίδιο σχεδόν μήκος διεύθυνσης.

Αναφορικά με τις τιμές της διαμέτρου SMD, αυτές προκύπτουν για βαρύ καύσιμο περίπου τριπλάσιες (σε σχέση με το καύσιμο Diesel) για το ακροφύσιο A, και περίπου διπλάσιες για το ακροφύσιο B.

5.1.2.2 Σύγκριση καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου για πίεση θαλάμου καύσης 100 bar

A) Μήκος διείσδυσης (tip penetration)

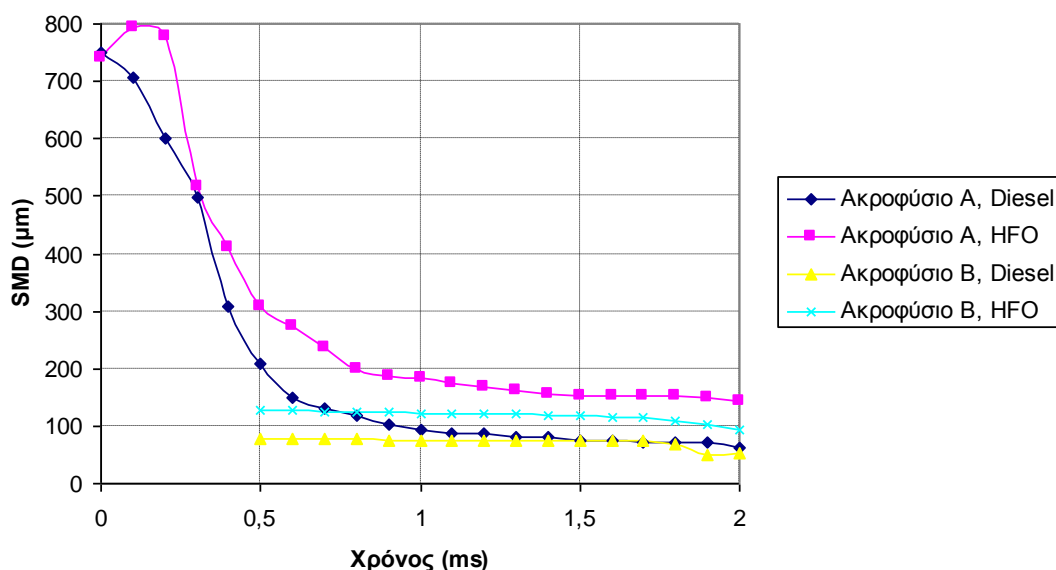
Μήκος διείσδυσης σε πίεση 100 bar



Διάγραμμα 21: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

B) Διάμετρος μέσης σταγόνας (Sauter Mean Diameter-SMD)

SMD σε πίεση 100 bar



Διάγραμμα 22: Μέση διάμετρος σταγόνας συναρτήσεως του χρόνου, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Στο Διάγραμμα 21 παρουσιάζεται το μήκος διείσδυσης των δύο spray για τα δύο ακροφύσια σε πίεση 100 bar, ενώ στο Διάγραμμα 22 παρουσιάζεται το μέγεθος των σταγονιδίων στην ίδια περίπτωση. Από το Διάγραμμα 21 φαίνεται πως τα spray και των δύο καυσίμων χαρακτηρίζονται από παρόμοιας μορφής καμπύλη, όσον αφορά στο μήκος διείσδυσης. Όπως είναι λογικό, το spray του βαρέος καυσίμου χαρακτηρίζεται από λίγο υψηλότερες τιμές μήκους διείσδυσης (Διάγραμμα 21), λόγω των μεγαλύτερων σταγονιδίων του (Διάγραμμα 22).

Γενικά, παρατηρείται μικρή επίδραση του είδους του καυσίμου στο μήκος διείσδυσης και στις τιμές SMD. Φαίνεται πως το μέγεθος των σταγονιδίων στην περίπτωση του ακροφυσίου A μειώνεται ραγδαία μέχρι να φτάσει την τελική του τιμή. Αντίθετα, στην περίπτωση του ακροφυσίου B, τα σταγονίδια των δύο καυσίμων διασπώνται με πολύ βραδύτερο ρυθμό, ενώ το αρχικό τους μέγεθος είναι πολύ μικρότερο.

Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι το μήκος διείσδυσης του spray στην πίεση των 100 bar είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με την πίεση των 30 bar. Αυτό συμβαίνει λόγω των μεγαλύτερων δυνάμεων αεροδυναμικής αντίστασης που ασκούνται στα σταγονίδια του spray στην περίπτωση της μεγάλης πίεσης, με αποτέλεσμα την ταχύτερη επιβράδυνσή τους.

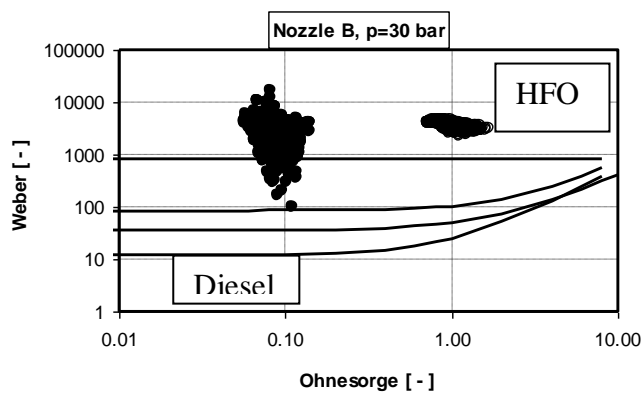
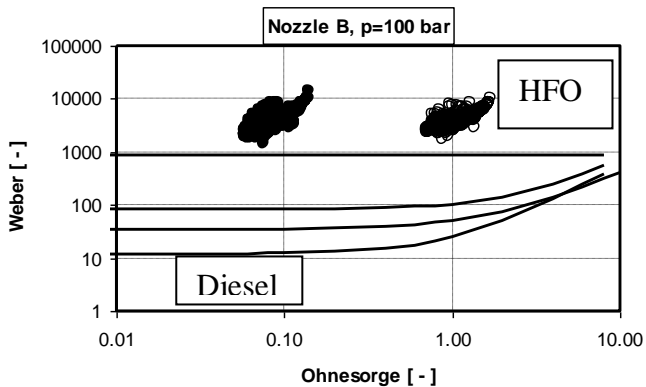
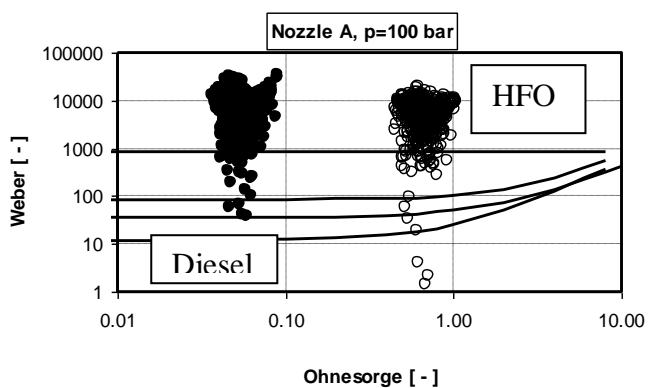
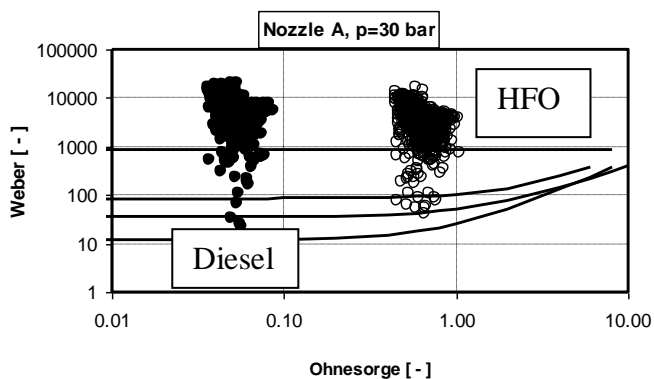
5.1.2.3 Ταξινόμηση σταγόνων καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου σε περιοχές διάσπασης

Προκειμένου να κατανοηθεί σε βάθος ποιοι μηχανισμοί διάσπασης των spray είναι κυρίαρχοι για κάθε καύσιμο, επιχειρήθηκε μία ταξινόμηση των σταγονιδίων των δύο καυσίμων στις περιοχές διάσπασης (breakup regimes). Το μοντέλο USB

υπολογίζει τον αριθμό Weber κάθε σταγόνας τη στιγμή της δημιουργίας της. Επίσης, υπολογίζεται για κάθε σταγόνα και ο αριθμός Ohnesorge, και έτσι υπάρχει η δυνατότητα κατανομής των σταγονιδίων των καυσίμων στις περιοχές διάσπασης. Οι τέσσερις περιοχές που φαίνονται στις εικόνες του Διαγράμματος 23 αντιστοιχούν στις περιοχές του Διαγράμματος 3 της παραγράφου 2.2.2.3. Στην αριστερή περιοχή όλων των εικόνων του Διαγράμματος 23 παρουσιάζεται η κατανομή των σταγόνων του καυσίμου Diesel, ενώ στη δεξιά πλευρά η κατανομή των σταγόνων του βαρέος καυσίμου.

Από το Διάγραμμα 23 προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι κύριοι μηχανισμοί διάσπασης και των δύο καυσίμων είναι η διατμητική και η καταστροφική διάσπαση. Σε ένα ποσοστό, όμως, λαμβάνουν χώρα όλοι οι μηχανισμοί, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη μελέτης όλου του εύρους καθεμίας των τεσσάρων περιοχών ξεχωριστά.

Παρατηρείται επίσης ότι η περιοχή του spray βαρέος καυσίμου περιλαμβάνει αριθμούς Ohnesorge μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερους από αυτούς του spray καυσίμου Diesel. Αυτό οφείλεται στο πολύ μεγαλύτερο ιξώδες του βαρέος καυσίμου, παρά την προθέρμανσή του. Αντίθετα, η επιφανειακή τάση των δύο καυσίμων είναι σχεδόν ίδια, γεγονός που δικαιολογεί τις παραπλήσιες τιμές του αριθμού Weber.

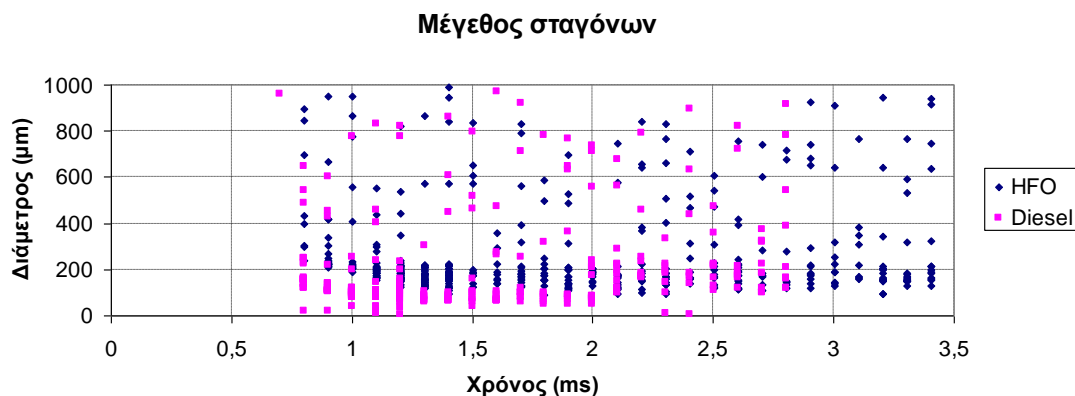


Διάγραμμα 23: Ταξινόμηση των σταγονιδίων του spray βαρέος καυσίμου και καυσίμου Diesel στις περιοχές διάσπασης.

5.1.2.4 Ταξινόμηση μεγέθους σταγόνων Diesel και βαρέος καυσίμου

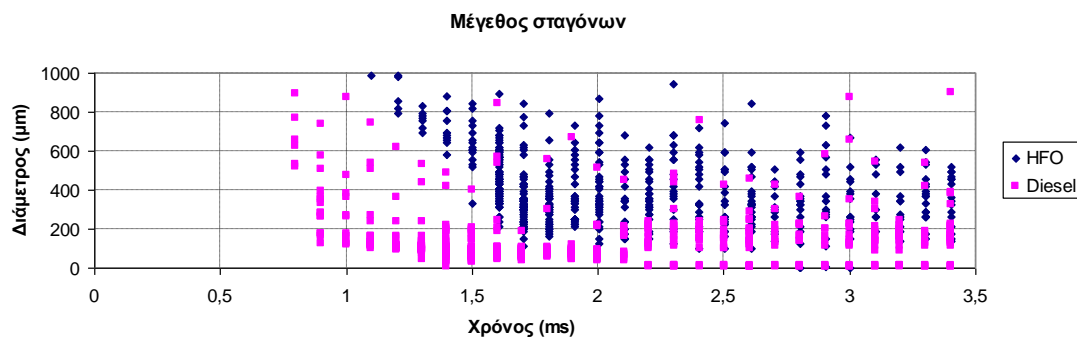
Το μοντέλο USB προσφέρει τη δυνατότητα ανάλυσης του μεγέθους των σταγόνων τη στιγμή της δημιουργίας τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκρίσεις του μεγέθους των σταγονιδίων καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου.

A) Ακροφύσιο A, p=30 bar



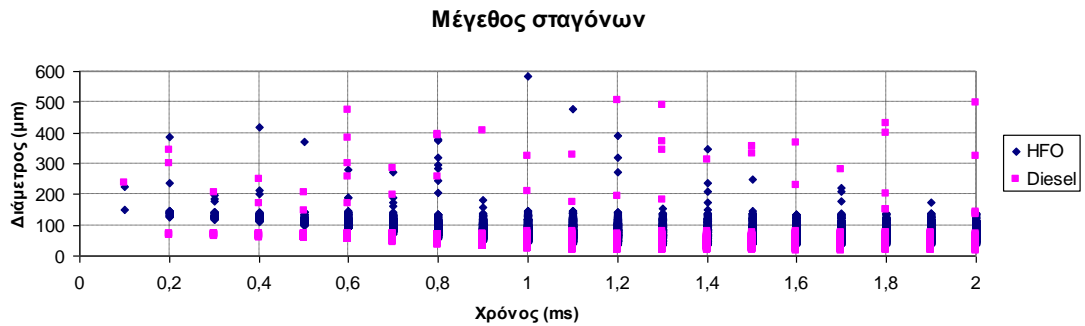
Διάγραμμα 24: Κατανομή της μέσης διαμέτρου (SMD) των σταγονιδίων καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για το ακροφύσιο A και πίεση 30 bar. Η στατιστική αφορά στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.

B) Ακροφύσιο A, p=100 bar



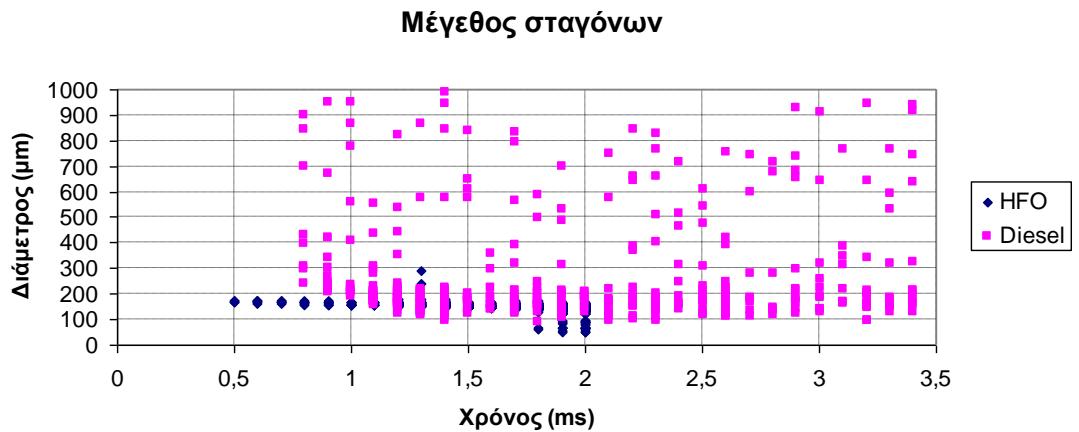
Διάγραμμα 25: Κατανομή της μέσης διαμέτρου (SMD) των σταγονιδίων καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για το ακροφύσιο A και πίεση 100 bar. Η στατιστική αφορά στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.

Γ) Ακροφύσιο Β, p=30 bar



Διάγραμμα 26: Κατανομή της μέσης διαμέτρου (SMD) των σταγονιδίων καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για το ακροφύσιο Β και πίεση 30 bar. Η στατιστική αφορά στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.

Δ) Ακροφύσιο Β, p=100 bar

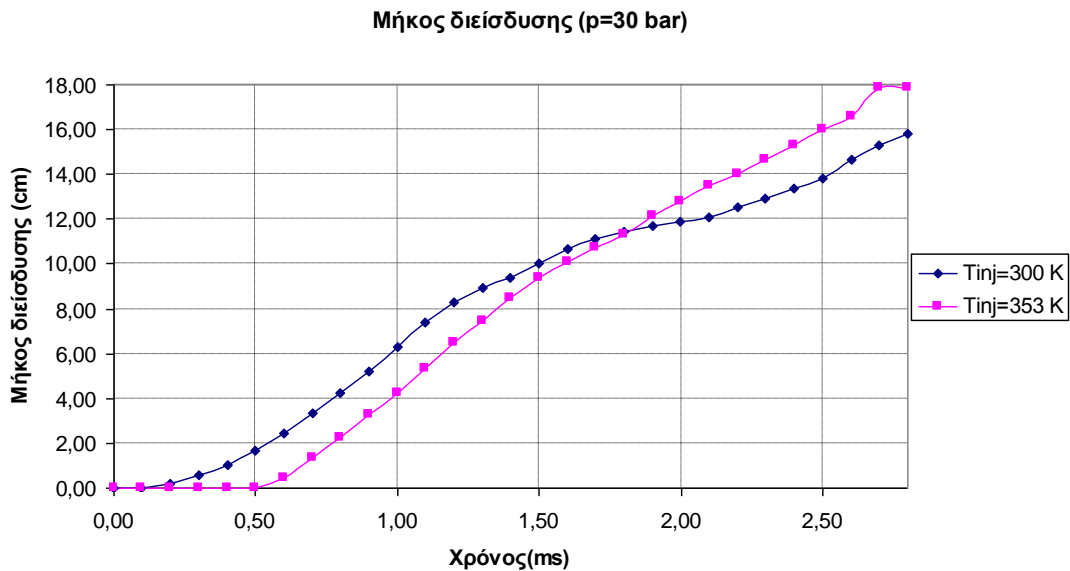


Διάγραμμα 27: Κατανομή της μέσης διαμέτρου (SMD) των σταγονιδίων καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για το ακροφύσιο Β και πίεση 100 bar. Η στατιστική αφορά στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.

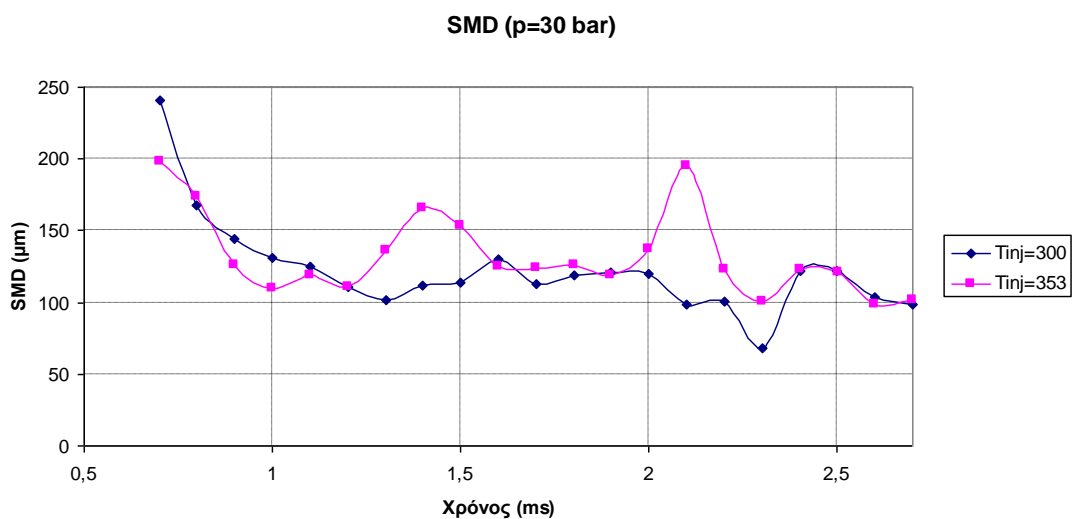
Τα Διαγράμματα 24-27 παρουσιάζουν την κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων των δύο spray σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η στατιστική ανάλυση γίνεται για τον όγκο ελέγχου, όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.3 (Σχήμα 14). Από τα παραπάνω Διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα σταγονίδια του βαρέος καυσίμου έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από αυτά του καυσίμου Diesel, και κατά συνέπεια η διάσπασή τους είναι δυσχερέστερη. Τα παρόντα αποτελέσματα συνεπώς επιβεβαιώνουν τις διαπιστώσεις της ερευνητικής ομάδας του Πανεπιστημίου του Rostock, δηλαδή προβλέπουν μεγαλύτερο μέγεθος για τα σταγονίδια του βαρέος καυσίμου [13]. Μόνο στην περίπτωση Δ τα σταγονίδια του Diesel προβλέπεται να έχουν ίδιο ή και μεγαλύτερο μέγεθος από αυτά του βαρέος καυσίμου, διαπίστωση που δεν μπορούμε επί του παρόντος να ερμηνεύσουμε.

5.1.2.5 Επίδραση της θερμοκρασίας έγχυσης του βαρέος καυσίμου στα χαρακτηριστικά του spray

Προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της θερμοκρασίας έγχυσης του βαρέος καυσίμου στα χαρακτηριστικά του spray, πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις με το μοντέλο USB για το ακροφύσιο A. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε η ροή του spray βαρέος καυσίμου με θερμοκρασία έγχυσης 300 και 353 K. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 28-31.

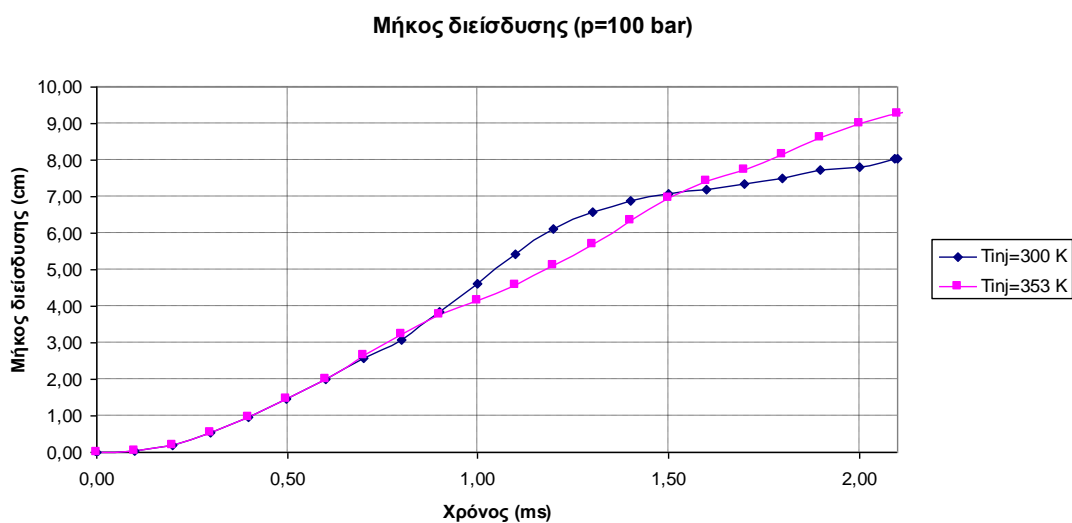


Διάγραμμα 28: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές θερμοκρασίες έγχυσης του βαρέος καυσίμου, για το ακροφύσιο A. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar. Τα αποτελέσματα προέκυψαν με χρήση του μοντέλου USB.

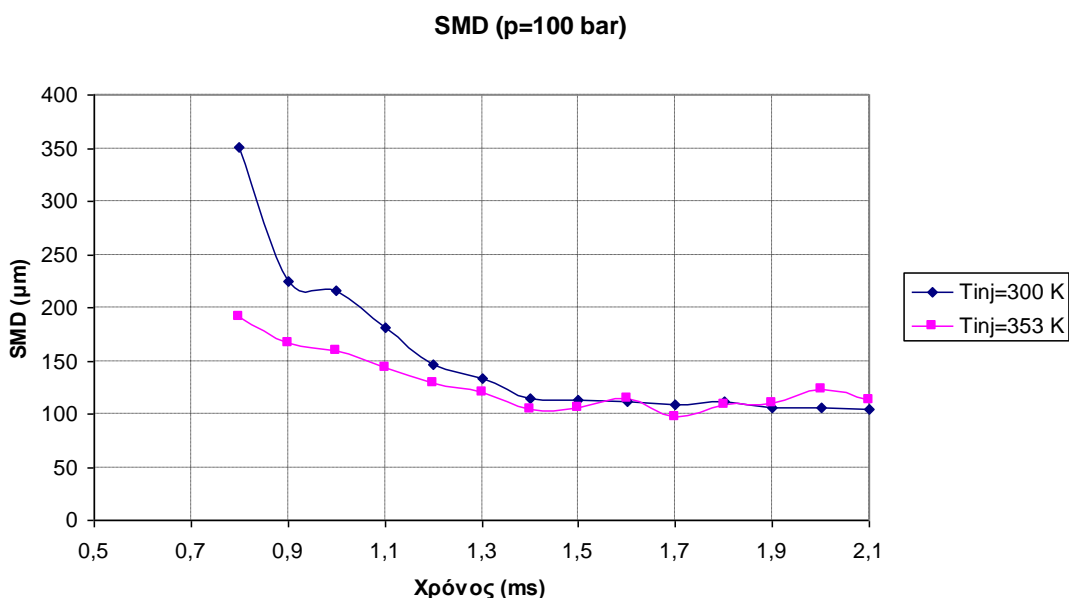


Διάγραμμα 29: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές θερμοκρασίες έγχυσης του βαρέος καυσίμου, για το ακροφύσιο A. Η

πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar. Τα αποτελέσματα προέκυψαν με χρήση του μοντέλου USB.



Διάγραμμα 30: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές θερμοκρασίες έγχυσης του βαρέος καυσίμου, για το ακροφύσιο A. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar. Τα αποτελέσματα προέκυψαν με χρήση του μοντέλου USB.



Διάγραμμα 31: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές θερμοκρασίες έγχυσης του βαρέος καυσίμου, για το ακροφύσιο A. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar. Τα αποτελέσματα προέκυψαν με χρήση του μοντέλου USB.

Στο Διάγραμμα 28 παρουσιάζεται το μήκος διείσδυσης spray βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, σε πίεση 30 bar, για δύο διαφορετικές

θερμοκρασίες ψεκασμού του καυσίμου. Στο Διάγραμμα 29 φαίνεται η μέση διάμετρος (SMD) των σταγονιδίων του spray βαρέος καυσίμου για την ίδια περίπτωση. Τα Διαγράμματα 30 και 31 παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για πίεση ψεκασμού ίση με 100 bar.

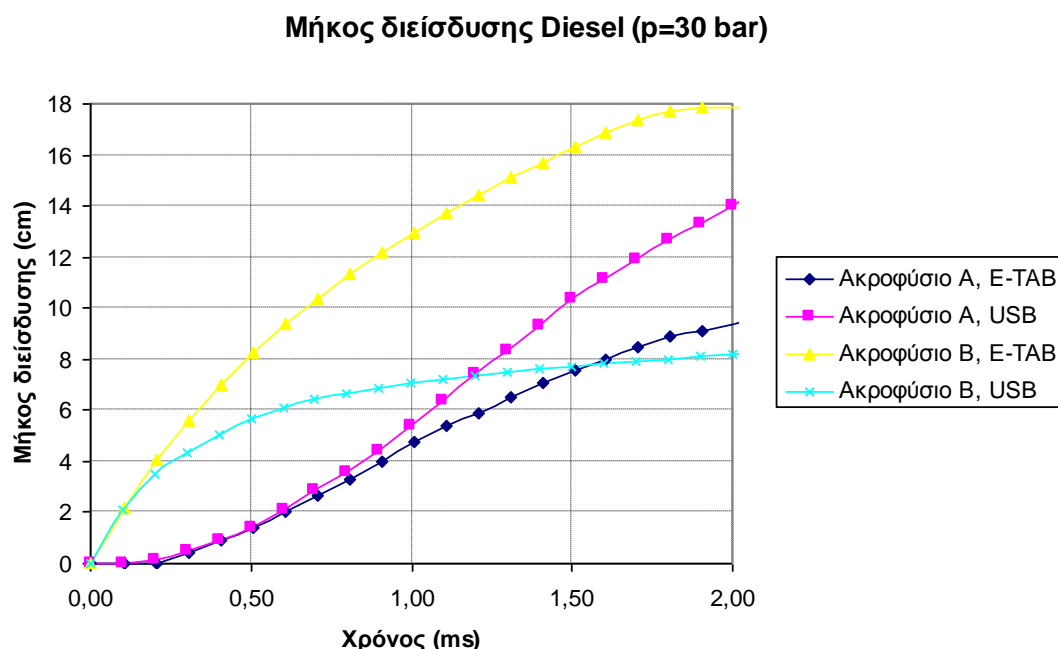
Από τα Διαγράμματα 28-31 προκύπτει το συμπέρασμα πως η μεταβολή της θερμοκρασίας έγχυσης του spray καυσίμου έχει μικρή μόνο επίδραση στο μέγεθος των σταγονιδίων του βαρέος καυσίμου. Αρχικά προπορεύεται το καύσιμο χαμηλής θερμοκρασίας ψεκασμού ($T=300\text{ K}$), ενώ στη συνέχεια αυτό επιβραδύνεται. Αυτό οφείλεται πιθανώς στην απότομη διάσπαση των σταγόνων μετά από κάποια χρονική στιγμή.

5.1.3 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης για spray καυσίμου Diesel

Προκειμένου να ελεγχθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων spray, γίνεται στη συνέχεια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων τους, για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Αξίζει στο αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι, σε προγενέστερες μελέτες της βιβλιογραφίας, το μοντέλο E-TAB έχει ρυθμιστεί ώστε να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για καύσιμο Diesel με εγχυτήρες παρόμοιου μεγέθους με τον εγχυτήρα A, ενώ το μοντέλο USB έχει ρυθμιστεί επίσης για spray καυσίμου Diesel, αλλά για εγχυτήρες παρόμοιους με τον εγχυτήρα B [9, 11].

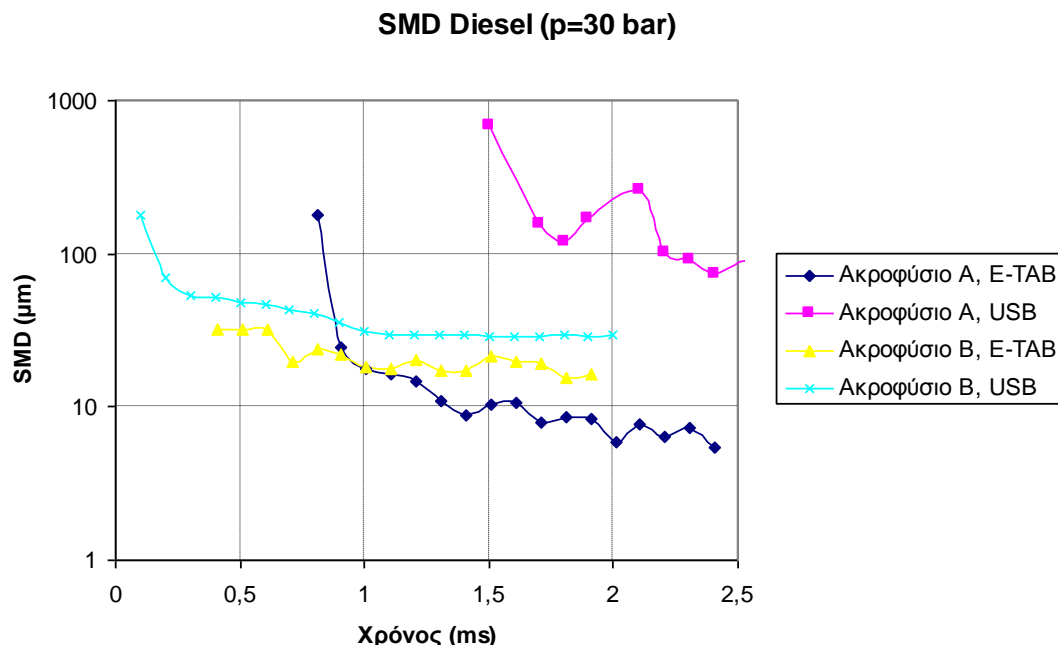
5.1.3.1 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης με πίεση θαλάμου καύσης 30 bar

A) Μήκος διείσδυσης spray καυσίμου Diesel



Διάγραμμα 32: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσεϊ του χρόνου, για καύσιμο Diesel, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

B) SMD spray Diesel



Διάγραμμα 33: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

Στο Διάγραμμα 32 παρουσιάζεται το μήκος διείδυσης spray καυσίμου Diesel για τα δύο ακροφύσια και τα δύο μοντέλα, για πίεση 30 bar, ενώ στο Διάγραμμα 33 παρουσιάζεται το μέγεθος των σταγονιδίων στην ίδια περίπτωση.

Από το Διάγραμμα 32 φαίνεται πως τα δύο μοντέλα καταλήγουν σε παρόμοια αποτελέσματα για το καύσιμο Diesel, όσον αφορά στο ακροφύσιο A. Το μοντέλο USB προβλέπει μήκος διείδυσης περίπου 20% μεγαλύτερο από το μοντέλο E-TAB. Αυτό εν μέρει εξηγείται από το κατά 10 φορές μεγαλύτερο μέγεθος σταγονιδίων που προβλέπει το μοντέλο USB σε σχέση με το E-TAB (Διάγραμμα 33).

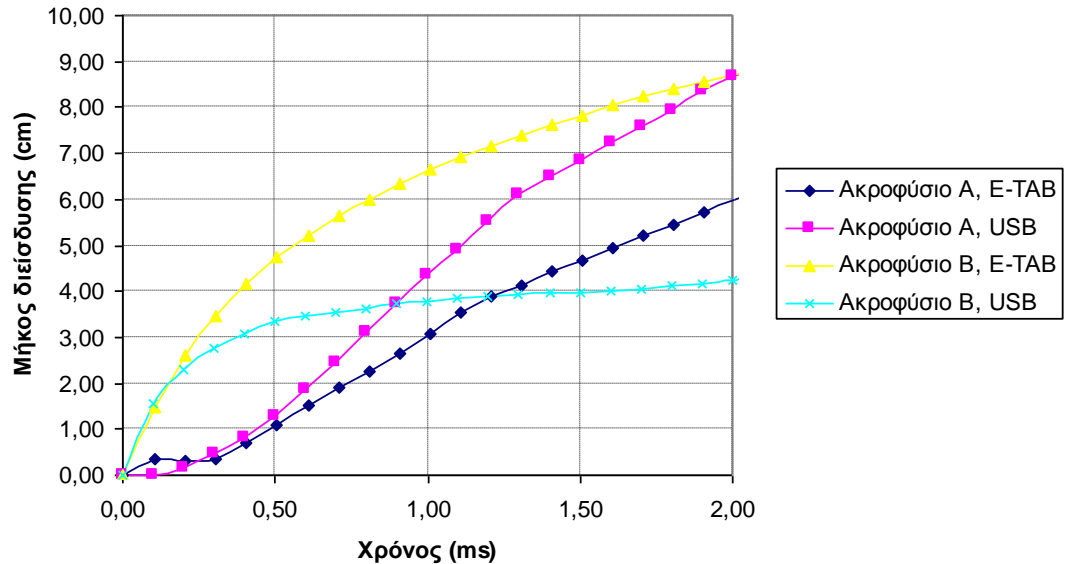
Αντίθετα, όσον αφορά στο ακροφύσιο B, το μοντέλο E-TAB προβλέπει πολύ μεγαλύτερο μήκος διείδυσης του spray. Μάλιστα, φαίνεται πως το μήκος διείδυσης ξεπερνάει και το αντίστοιχο του ακροφυσίου A. Το γεγονός αυτό δεν μπορεί να συμβαίνει στην πράξη, καθώς το spray από το μεγαλύτερο ακροφύσιο (ακροφύσιο A) εγχύεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, οπότε αναμένεται να διανύσει και μεγαλύτερη απόσταση.

Παρόλα αυτά, η διαφοροποίηση μεταξύ των μοντέλων για την περίπτωση των διαμέτρων SMD (Διάγραμμα 33) δεν είναι μεγάλη. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο USB προβλέπει σχεδόν διπλάσιου μεγέθους σταγονίδια σε σχέση με το μοντέλο E-TAB. Έτσι, θα περίμενε κανείς το προβλεπόμενο μήκος διείδυσης με βάση το μοντέλο USB να είναι μεγαλύτερο και για το ακροφύσιο B, πράγμα που όμως δεν παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη (βλ. Διάγραμμα 32).

5.1.3.2 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης με πίεση θαλάμου καύσης 100 bar

A) Μήκος διείσδυσης spray Diesel

Μήκος διείσδυσης Diesel (p=100 bar)



Διάγραμμα 34: Μήκος διείσδυσης του spray συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Στο Διάγραμμα 34 παρουσιάζεται το μήκος διείσδυσης spray καυσίμου Diesel για τα δύο ακροφύσια και τα δύο μοντέλα σε πίεση 100 bar, ενώ στο Διάγραμμα 35 παρουσιάζεται η διάμετρος SMD των σταγονιδίων στις ίδιες περιπτώσεις.

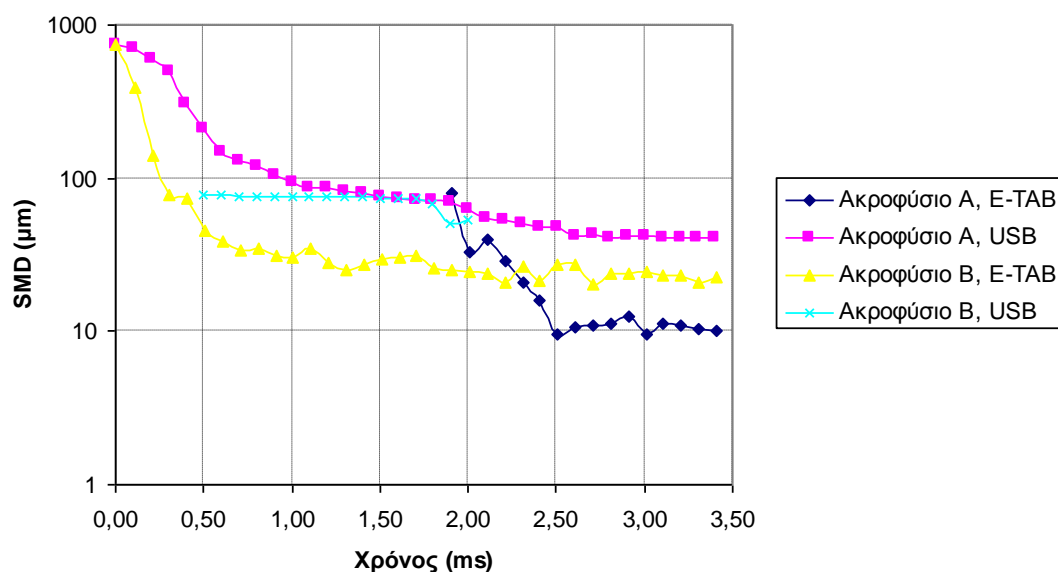
Από το Διάγραμμα 34 προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο USB προβλέπει μεγαλύτερο μήκος διείσδυσης του spray καυσίμου Diesel για το ακροφύσιο A, ενώ για το ακροφύσιο B προβλέπει μικρότερο μήκος διείσδυσης από το μοντέλο E-TAB. Επίσης, το προβλεπόμενο μήκος διείσδυσης από το μοντέλο E-TAB για το ακροφύσιο B είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για το ακροφύσιο A, γεγονός που όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο δεν είναι αναμενόμενο.

Όσον αφορά στο Διάγραμμα 35 (SMD), το μοντέλο USB προβλέπει μεγαλύτερα σταγονίδια από το E-TAB, γεγονός που δικαιολογεί και το μεγαλύτερο μήκος διείσδυσης. Αντίθετα, οι προβλέψεις για τη διάμετρο SMD από το μοντέλο USB για το ακροφύσιο B είναι υψηλότερες από ό,τι του μοντέλου E-TAB, παρά το μικρότερο προβλεπόμενο μήκος διείσδυσης από το πρώτο μοντέλο.

Γενικά, το μοντέλο E-TAB επιτρέπει πολύ μεγάλη διείσδυση σε ορισμένες περιπτώσεις. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο σφάλμα που εισάγεται στον υπολογισμό της αεροδυναμικής αντίστασης.

B) SMD spray Diesel

SMD Diesel (p=100 bar)



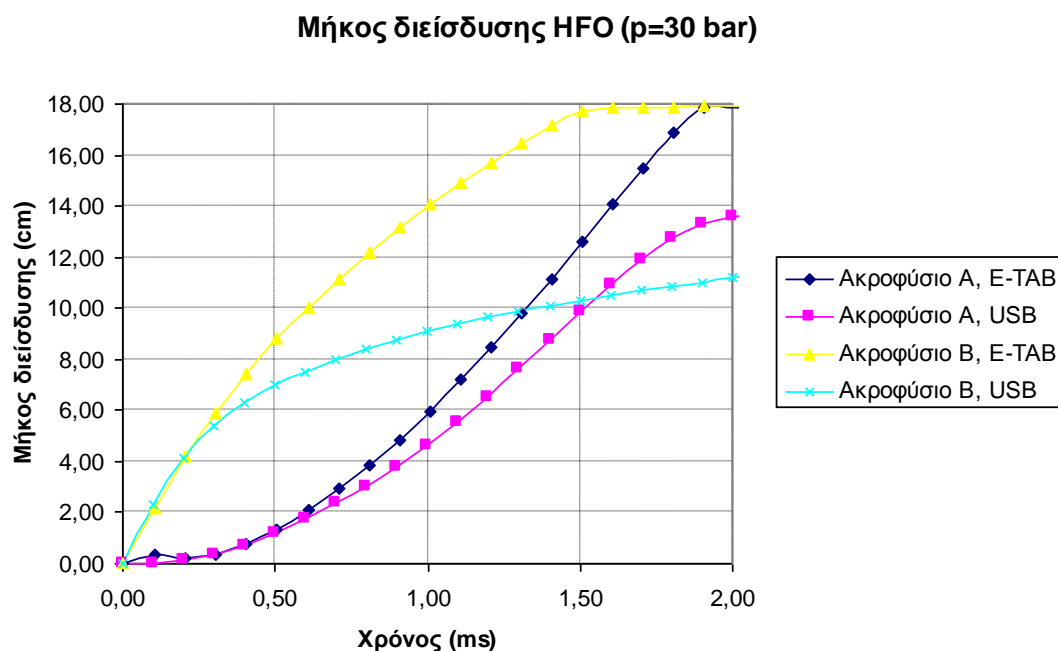
Διάγραμμα 35: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

5.1.4 Σύγκριση μοντέλων διάσπασης για spray βαρέος καυσίμου

5.1.4.1 Σύγκριση μοντέλων για πίεση θαλάμου καύσης 30 bar

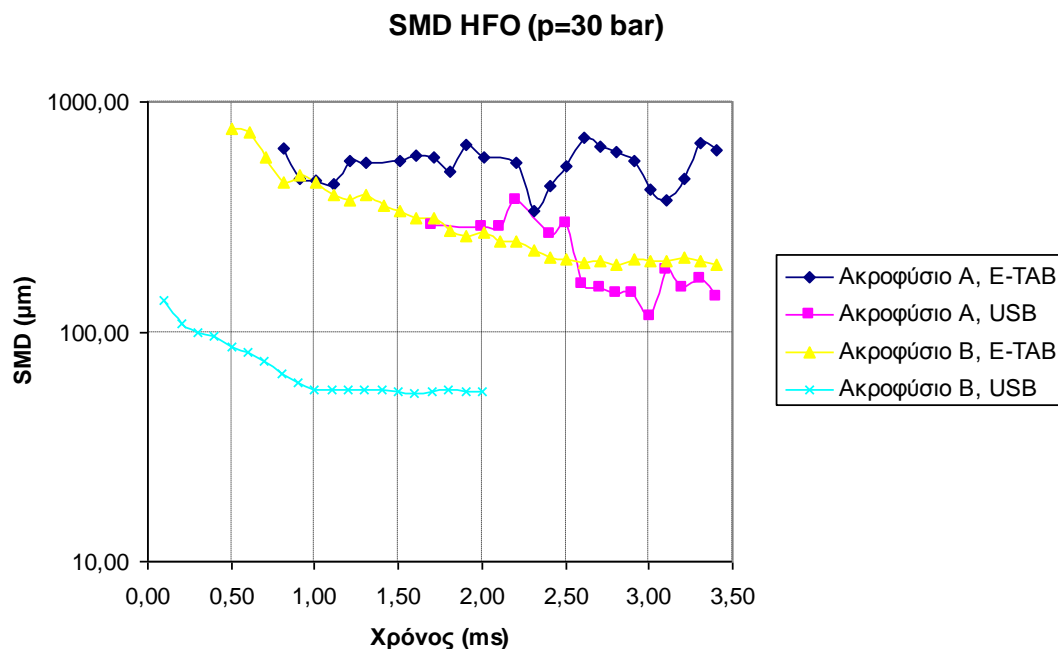
Στο Διάγραμμα 36 παρουσιάζεται το μήκος διείδυσης spray βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για τα δύο ακροφύσια και τα δύο μοντέλα spray, σε πίεση 30 bar, ενώ στο Διάγραμμα 37 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες που αφορούν στη διάμετρο SMD. Από το Διάγραμμα 36 προκύπτει ότι το μοντέλο E-TAB προβλέπει μήκος διείδυσης του spray βαρέος καυσίμου μεγαλύτερο κατά περίπου 35% σε σχέση με το μοντέλο USB. Σχετικά με τη διάμετρο SMD, παρατηρούνται αισθητά χαμηλές τιμές και για τα δύο ακροφύσια, με χρήση του μοντέλου USB. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος των σταγονιδίων που προέκυψε από το μοντέλο USB είναι περίπου τέσσερις φορές μικρότερο από το αντίστοιχο του μοντέλου E-TAB. Το γεγονός αυτό μαρτυρά τη δυσκολία διάσπασης του spray βαρέος καυσίμου που αντιμετωπίζει το μοντέλο E-TAB.

A) Μήκος διείσδυσης HFO



Διάγραμμα 36: Μήκος διείσδυσης του spray βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

B) SMD spray HFO



Διάγραμμα 37: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

5.1.4.2 Σύγκριση μοντέλων για πίεση θαλάμου καύσης 100 bar

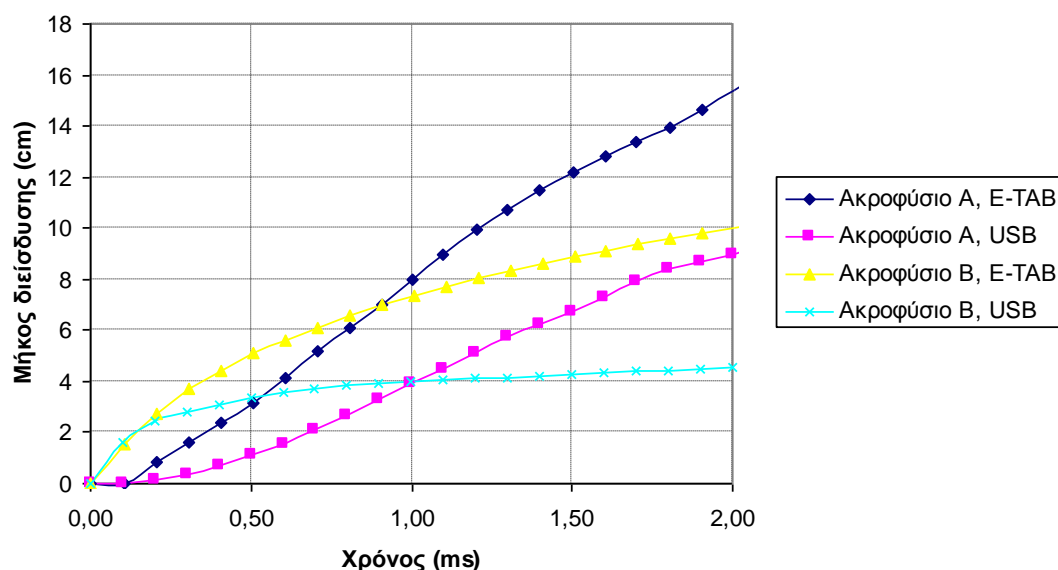
Στο Διάγραμμα 38 παρουσιάζεται το μήκος διείδυσης spray βαρέος, για τα δύο ακροφύσια και τα δύο μοντέλα spray, σε πίεση 100 bar, ενώ στο Διάγραμμα 39 δίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες για τη διάμετρο SMD. Από το Διάγραμμα 38 προκύπτει ότι το μέγεθος του ακροφυσίου επηρεάζει το προβλεπόμενο μήκος διείδυσης του spray. Καί στην παρούσα περίπτωση ($p = 100$ bar) το μοντέλο E-TAB προβλέπει μεγαλύτερο μήκος διείδυσης (εδώ, σχεδόν διπλάσιο) σε σύγκριση με το μοντέλο USB. Οι μεγάλες τιμές του μήκους διείδυσης μπορούν να αποδοθούν στην αντίστοιχη περιορισμένη διάσπαση των σταγονιδίων του βαρέος καυσίμου, γεγονός που αποτυπώνεται στις μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου SMD (Διάγραμμα 39). Σε σύγκριση με το αντίστοιχο μήκος διείδυσης σε πίεση 30 bar (Διάγραμμα 36), το προβλεπόμενο μήκος διείδυσης σε πίεση 100 bar είναι μικρότερο, εξαιτίας της αύξησης στην τιμή της πυκνότητας του αέρα. Η αύξηση αυτή επιδρά ευθέως ανάλογα στις δυνάμεις αεροδυναμικής αντίστασης, προκαλώντας μεγαλύτερη επιβράδυνση των σταγονιδίων του βαρέος καυσίμου, μειώνοντας έτσι το μήκος διείδυσης.

Το αυξημένο μήκος διείδυσης στην περίπτωση του μοντέλου E-TAB είναι απόρροια της αντίστοιχης περιορισμένης διάσπασης των σταγονιδίων, η οποία οδηγεί σε σταγονίδια μεγαλύτερου μεγέθους (βλ. Διάγραμμα 39).

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι, καί για τα δύο καύσιμα της παρούσας μελέτης, το μοντέλο E-TAB προβλέπει αισθητά μεγαλύτερο μέγεθος σταγονιδίων από ό,τι το μοντέλο USB, με αποτέλεσμα το προβλεπόμενο μήκος διείδυσης του μοντέλου E-TAB να είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Για τον λόγο αυτό, επιχειρήθηκε μία περαιτέρω μελέτη του μοντέλου E-TAB, συγκεκριμένα της επίδρασης των παραμέτρων του στη διάσπαση του spray.

A) Μήκος διείσδυσης HFO

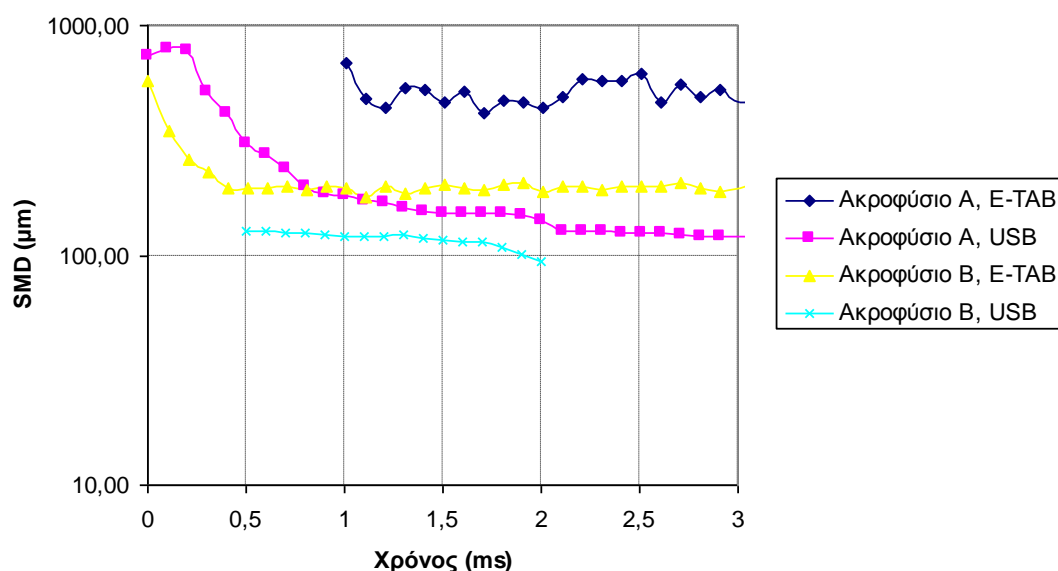
Μήκος διείσδυσης HFO ($p=100$ bar)



Διάγραμμα 38: Μήκος διείσδυσης του spray βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

B) SMD spray HFO

SMD HFO ($p=100$ bar)



Διάγραμμα 39: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο, για τα δύο ακροφύσια της παρούσας μελέτης, με χρήση των μοντέλων E-TAB και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

5.2 Έλεγχος της επίδρασης των παραμέτρων του μοντέλου E-TAB στη διάσπαση του spray

Προκειμένου να κατανοηθεί ο τρόπος επίδρασης των διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών στη διάσπαση ενός spray καυσίμου, απομονώθηκαν και μελετήθηκαν (σε περιβάλλον Excel) διεξοδικά οι ακόλουθες σχέσεις του μοντέλου E-TAB, οι οποίες έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.3.1:

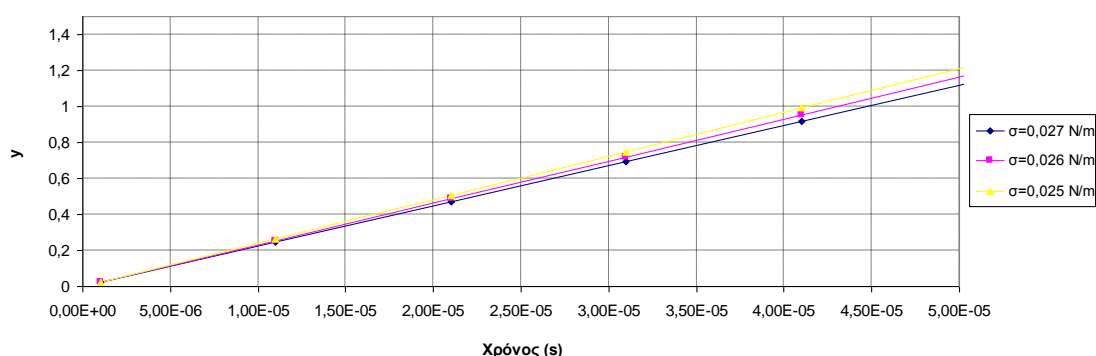
$$y(t) = We_c + e^{-\left(\frac{t}{t_d}\right)} * [(y_0 - We_c) * \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega} \left(\frac{dy_0}{dt} + \frac{y_0 - We_c}{t_d} \right) * \sin(\omega t)]$$

$$t_d = \frac{2 * \rho_1 * \alpha^2}{5 * \mu_1} \quad \text{και} \quad \omega^2 = \frac{8 * \sigma}{\rho_1 * \alpha^3} - \frac{1}{t_d^2} .$$

5.2.1. Επίδραση της επιφανειακής τάσης στην παραμόρφωση των σταγόνων

Διατηρώντας σταθερή την τιμή του δυναμικού ιξώδους του καυσίμου και για τρεις διαφορετικές τιμές της επιφανειακής του τάσης, προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 40 και 41. Στους συγκεκριμένες υπολογισμούς, η τιμή της πυκνότητας του αέρα ήταν 30 kg/m^3 , ενώ του καυσίμου Diesel 848 kg/m^3 . Η αρχική διάμετρος των σταγόνων θεωρήθηκε ίση με τη διάμετρο του ακροφυσίου, δηλαδή $0,9 \text{ mm}$, και η αρχική τους ταχύτητα ίση με 500 m/s . Τέλος, το ιξώδες του καυσίμου ήταν $0,0003 \text{ Pa*s}$. Με αυτά τα δεδομένα η τιμή του αριθμού Weber προκύπτει ίση με 250.000 , ενώ η τιμή του χρόνου t_d ίση με $0,916$. Εδώ, διερευνήθηκε η επίδραση της επιφανειακής τάσης στη διάσπαση των σταγόνων, για τιμές της επιφανειακής τάσης $0,025-0,027 \text{ N/m}$.

Ακροφύσιο A - Diesel ($\rho=100 \text{ bar}$, $\mu=0.0003 \text{ Pa*s}$)

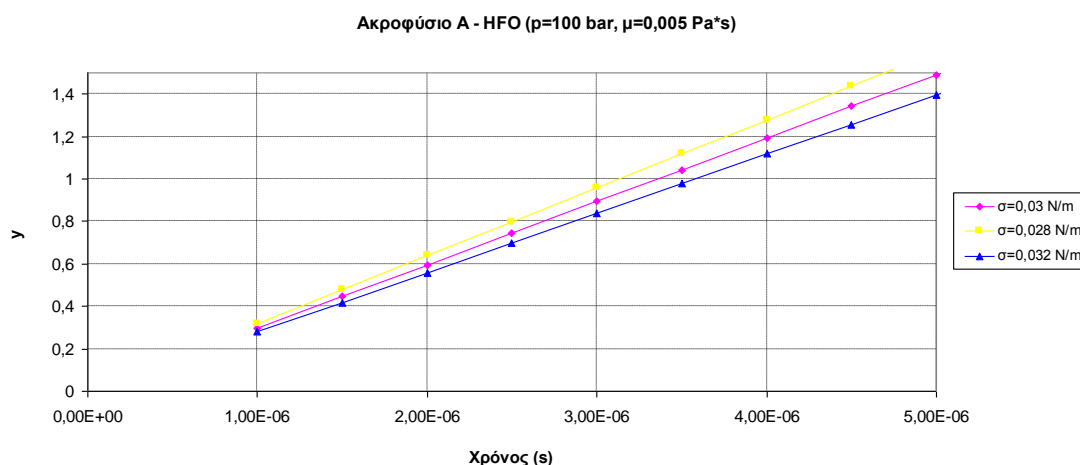


Διάγραμμα 40: Παραμόρφωση σταγόνων καυσίμου Diesel συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές της επιφανειακής τάσης του υγρού.

Στο Διάγραμμα 40 φαίνεται η επίδραση της επιφανειακής τάσης στην παραμόρφωση των σταγόνων καυσίμου Diesel για το ακροφύσιο A και πίεση ψεκασμού ίση με 100 bar.

Στην περίπτωση των αριθμητικών πειραμάτων με βαρύ καύσιμο, η πυκνότητα του αέρα και η αρχική διάμετρος των σταγόνων διατηρήθηκαν ίδιες με την περίπτωση χρήσης καυσίμου Diesel. Η ταχύτητα έγχυσης του spray ήταν 300 m/s, η πυκνότητα του καυσίμου 953,7 kg/m³ και το δυναμικό ιξώδες του ίσο με 0,005 Pa*s. Με αυτά τα δεδομένα ο αριθμός Weber προκύπτει ίσος με 81.000, και ο χρόνος t_d ίσος με 0,0618. Στο Διάγραμμα 41 φαίνεται η επίδραση της επιφανειακής τάσης στην παραμόρφωση των σταγόνων βαρέος καυσίμου για το ακροφύσιο A και πίεση ψεκασμού ίση με 100 bar.

Από τα Διαγράμματα 40 και 41 προκύπτει ότι η παραμόρφωση της σταγόνας ελαττώνεται με αύξηση της επιφανειακής τάσης του καυσίμου. Εντούτοις, η επίδραση της επιφανειακής τάσης στην παραμόρφωση είναι πολύ μικρή. Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.1, η τιμή της επιφανειακής τάσης του βαρέος καυσίμου στους 353 K είναι παρόμοια με αυτή του καυσίμου Diesel στους 300 K. Επομένως, η διαφοροποίηση στον τρόπο διάσπασης των σταγόνων δεν οφείλεται σε διαφορετικές τιμές της επιφανειακής τάσης.

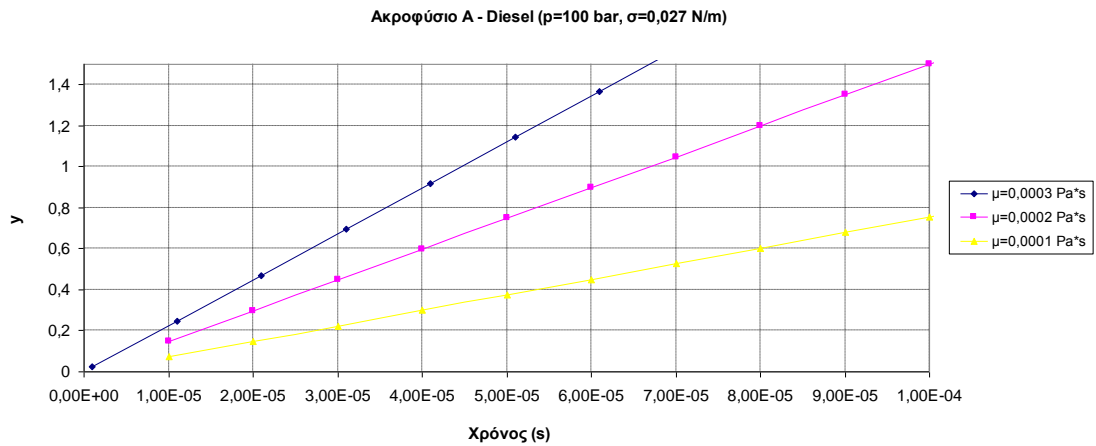


Διάγραμμα 41: Παραμόρφωση σταγόνων βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές της επιφανειακής τάσης του υγρού.

5.2.2. Επίδραση του δυναμικού ιξώδους στην παραμόρφωση των σταγόνων

Διατηρώντας την επιφανειακή τάση σταθερή για τα δύο καύσιμα, μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής του δυναμικού ιξώδους στην παραμόρφωση των σταγόνων.

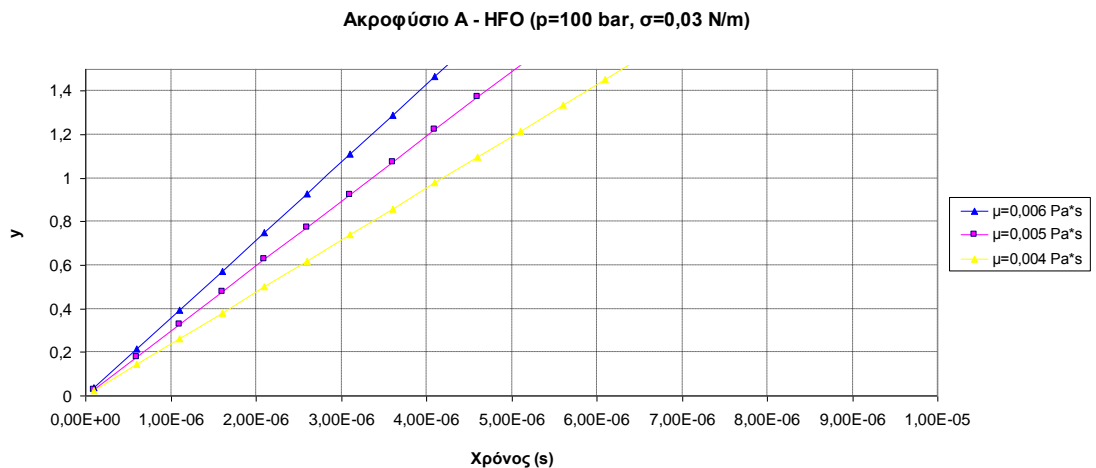
Στα αριθμητικά πειράματα με καύσιμο Diesel, λήφθηκε σταθερή η τιμή της επιφανειακής τάσης, και η τιμή της ορίστηκε ίση με 0,027 N/m. Ο αριθμός Weber που προέκυψε ήταν ίσος με 90.000 και ο χρόνος t_d ίσος με 2,747. Η παραμόρφωση των σταγόνων μελετήθηκε για τιμές ιξώδους 0,0001-0,0003 Pa*s. Στο Διάγραμμα 42 παρουσιάζεται η επίδραση του δυναμικού ιξώδους σε spray καυσίμου Diesel για το ακροφύσιο A και πίεση ψεκασμού ίση με 100 bar.



Διάγραμμα 42: Παραμόρφωση σταγόνων καυσίμου Diesel συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του δυναμικού ιξώδους του υγρού.

Στο Διάγραμμα 43 παρουσιάζεται η επίδραση του δυναμικού ιξώδους σε spray βαρέος καυσίμου για το ακροφύσιο A και πίεση ψεκασμού ίση με 100 bar. Εδώ, η επιφανειακή τάση του βαρέος καυσίμου διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 0,03 N/m, ενώ το δυναμικό ιξώδες έλαβε τιμές μεταξύ 0,004 και 0,006 Pa*s.

Στα Διαγράμματα 42 και 43 παρατηρείται ότι η ταχύτητα παραμόρφωσης της σταγόνας αυξάνεται με το δυναμικό ιξώδες του καυσίμου. Έτσι, οι σταγόνες βαρέος καυσίμου, λόγω του μεγαλύτερου ιξώδους του καυσίμου, αναμένεται να παραμορφώνονται ταχύτερα. Η αναμενόμενη ταχύτερη παραμόρφωση αντιστοιχεί και σε ταχύτερη διάσπαση.



Διάγραμμα 43: Παραμόρφωση σταγόνων βαρέος καυσίμου συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του δυναμικού ιξώδους του υγρού.

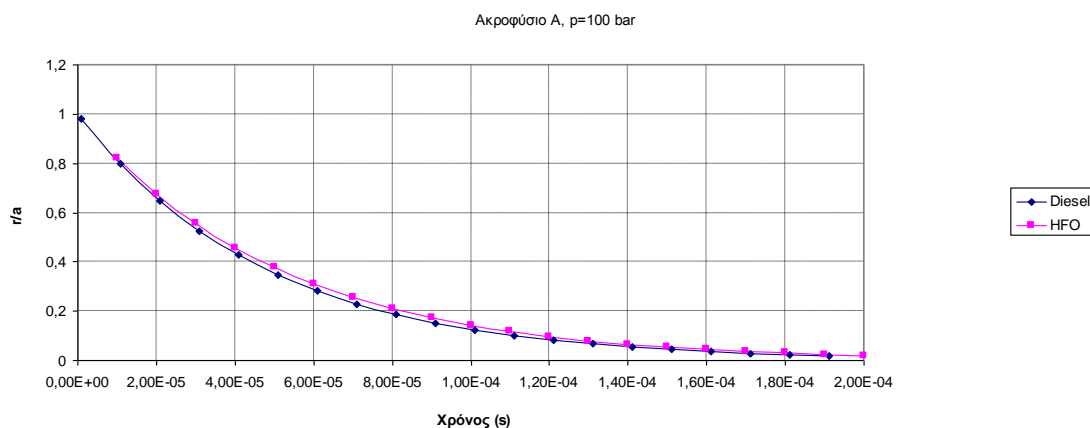
Στα Διαγράμματα 44 και 45 παρουσιάζεται ο λόγος της ακτίνας των θυγατρικών σταγόνων προς τις πατρικές (r/a), συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και για βαρύ καύσιμο.

Από το Διάγραμμα 44 προκύπτει ότι ο ρυθμός διάσπασης του spray των δύο καυσίμων είναι αντίστοιχος. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι σταγόνες βαρέος καυσίμου διασπώνται ταχύτερα από τις αντίστοιχες του spray Diesel. Με βάση το Διάγραμμα 44, η ταχύτερη διάσπαση του spray βαρέος καυσίμου οδηγεί και σε

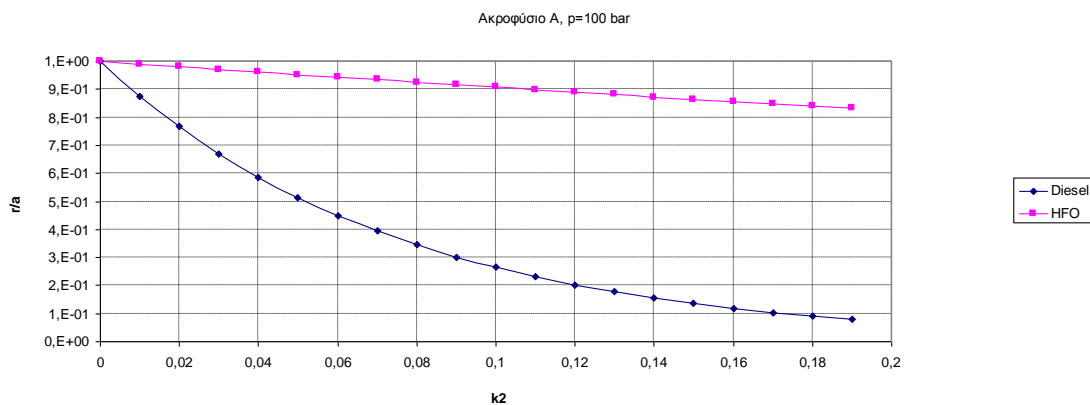
σταγονίδια μεγαλύτερου μεγέθους. Με αυτό τον τρόπο δικαιολογείται η μεγαλύτερη τιμή της διαμέτρου SMD που προβλέπει το μοντέλο E-TAB για το spray βαρέος καυσίμου.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα αναμένεται να εξαρτώνται από τη σταθερά k_2 , η οποία, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.3.2, επηρεάζει τον ρυθμό διάσπασης της σταγόνας (εξίσωση 3.16).

Τα αποτελέσματα, για το ακροφύσιο A και πίεση ψεκασμού ίση με 100 bar παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 45.



Διάγραμμα 44: Λόγος της ακτίνας των θυγατρικών σταγόνων προς τις πατρικές (r/a), συναρτήσεως του χρόνου. $T_{\text{Diesel}}=300 \text{ K}$, $T_{\text{HFO}}=353 \text{ K}$, $k_2=0.07$

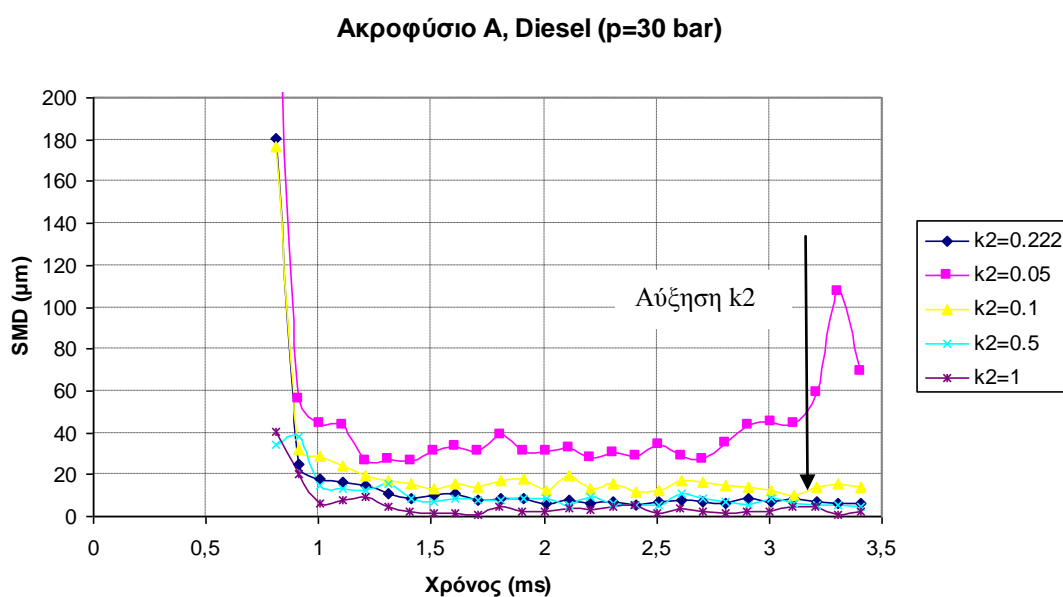


Διάγραμμα 45: Λόγος της ακτίνας των θυγατρικών σταγόνων προς τις πατρικές (r/a), συναρτήσεως της σταθεράς k_2 (εξίσωση 3.16). $T_{\text{Diesel}}=300 \text{ K}$, $T_{\text{HFO}}=353 \text{ K}$, $t_{\text{br,Diesel}}=4.5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$, $t_{\text{br,HFO}}=3.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$.

Από το Διαγράμμα 44 και 45 προκύπτει ότι η επίδραση της σταθεράς k_2 στον ρυθμό διάσπασης του spray βαρέος καυσίμου είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη επίδραση στο spray καυσίμου Diesel. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, αύξηση της τιμής της σταθεράς k_2 οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού διάσπασης των σταγόνων. Για να ποσοτικοποιηθεί αυτή η επίδραση, εκτελέστηκαν αριθμητικά πειράματα, στα οποία μεταβλήθηκε η τιμή της σταθεράς k_2 . Τα αποτελέσματα αυτής της παραμετρικής ανάλυσης παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

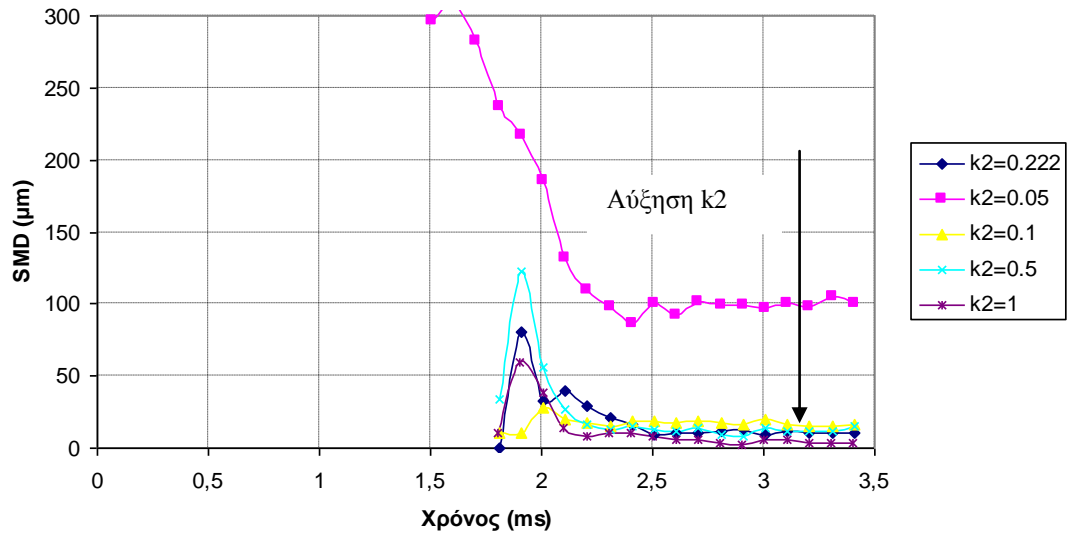
5.3 Παραμετρική Ανάλυση

Η επίδραση της σταθεράς k_2 στον ρυθμό διάσπασης των σταγόνων εξετάστηκε στο πλαίσιο αριθμητικών πειραμάτων (με χρήση του κώδικα KIVA3) για τα δύο καύσιμα της παρούσας μελέτης. Παρατηρήθηκε πως η επίδραση στο μήκος διείσδυσης ήταν πολύ μικρότερη από την επίδραση στο μέγεθος των σταγόνων. Τα αποτελέσματα αναφορικά με τη διάμετρο SMD παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 46-49. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ βασίζονται σε επεξεργασία των αποτελεσμάτων του κώδικα KIVA3 στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.



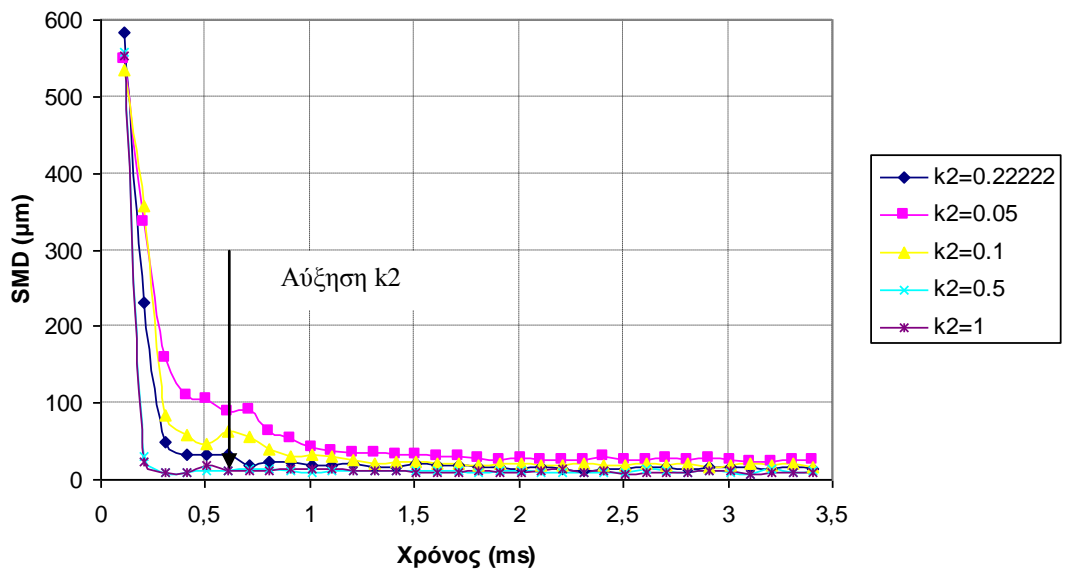
Διάγραμμα 46: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου A, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

Ακροφύσιο A, Diesel ($\rho=100$ bar)



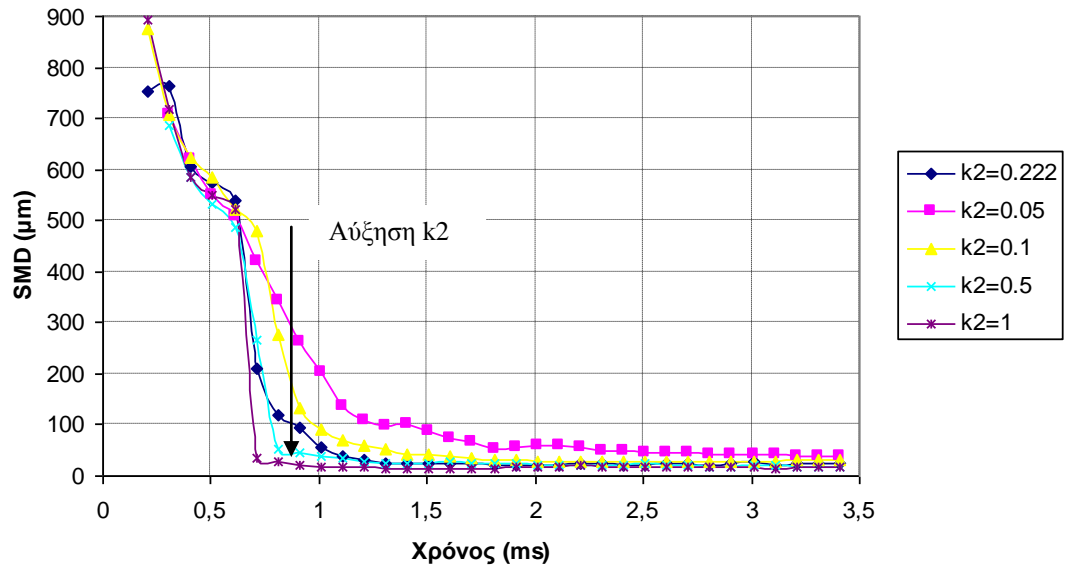
Διάγραμμα 47: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου A, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Ακροφύσιο B, Diesel ($\rho=30$ bar)



Διάγραμμα 48: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου B, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

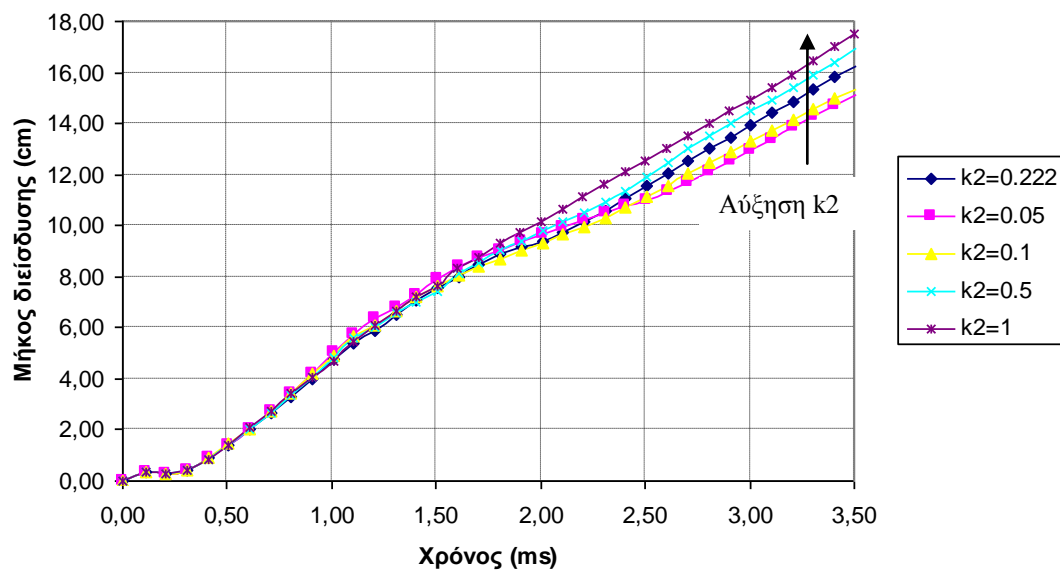
Ακροφύσιο Β, Diesel (p=100 bar)



Διάγραμμα 49: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου Β, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

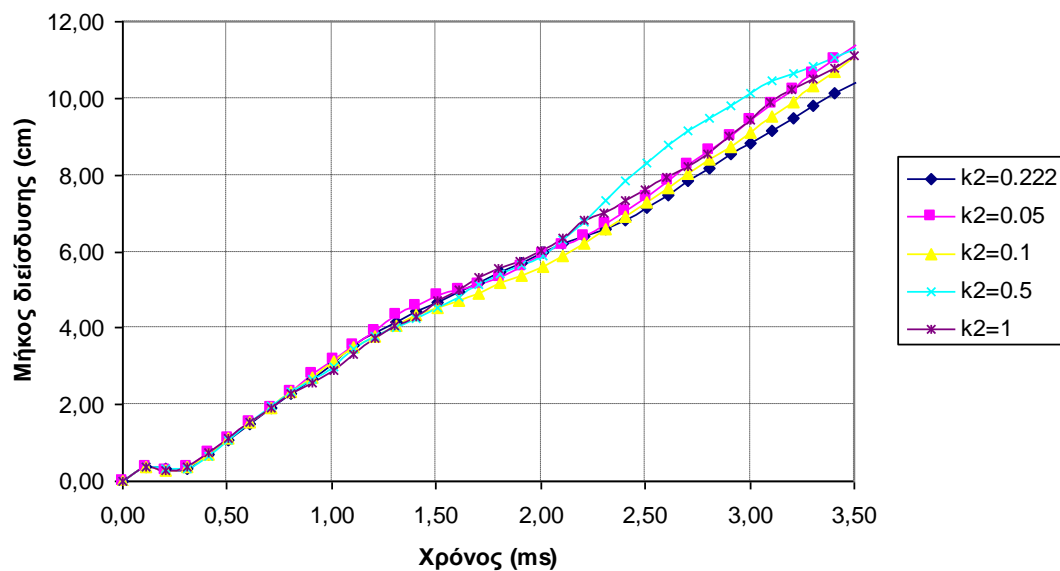
Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα Διαγράμματα 45-49 είναι σε συμφωνία με την ανάλυση της ενότητας 5.2. Συγκεκριμένα, αύξηση της σταθεράς k_2 οδηγεί σε μικρότερου μεγέθους σταγονίδια (ισοδύναμα, σε ταχύτερο ρυθμό διάσπασης των σταγονιδίων). Παρατηρείται πως η απόκλιση μεταξύ των καμπυλών είναι αρκετά μικρή, γεγονός που οδηγεί σε μικρή απόκλιση στις τιμές του μήκους διεύθυνσης του spray καυσίμου Diesel (Διαγράμματα 50-53).

Ακροφύσιο A, Diesel ($p=30$ bar)



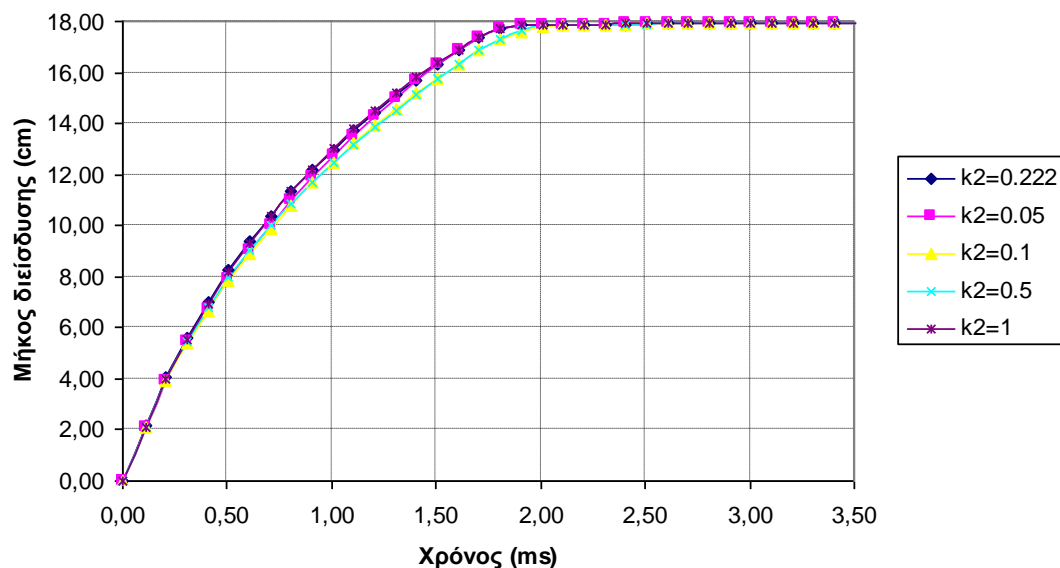
Διάγραμμα 50: Μήκος διείσδυσης συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου A, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

Ακροφύσιο A, Diesel ($p=100$ bar)



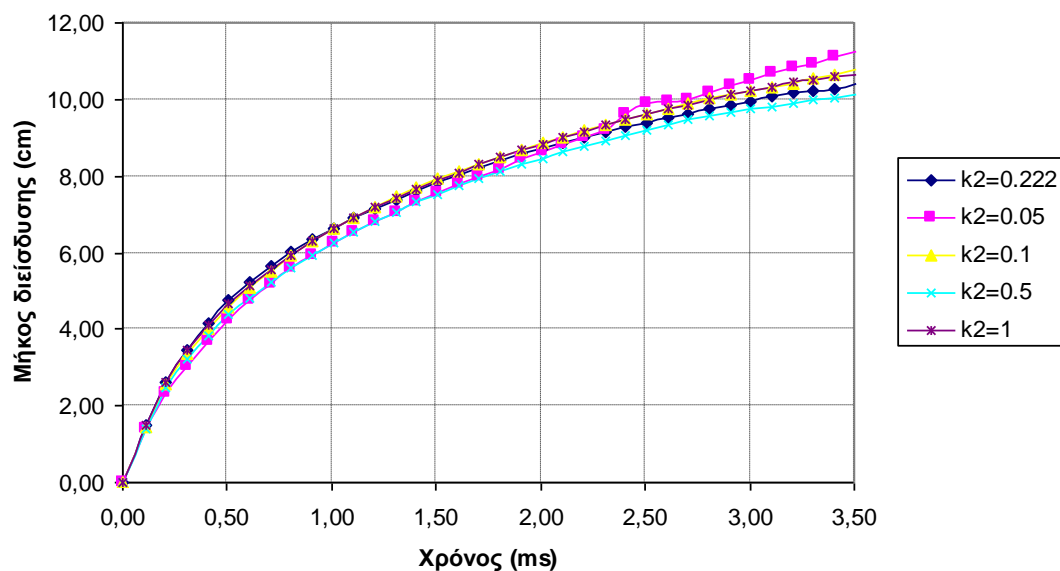
Διάγραμμα 51: Μήκος διείσδυσης συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου A, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Ακροφύσιο Β, Diesel ($p=30$ bar)



Διάγραμμα 52: Μήκος διείσδυσης συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου Β για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

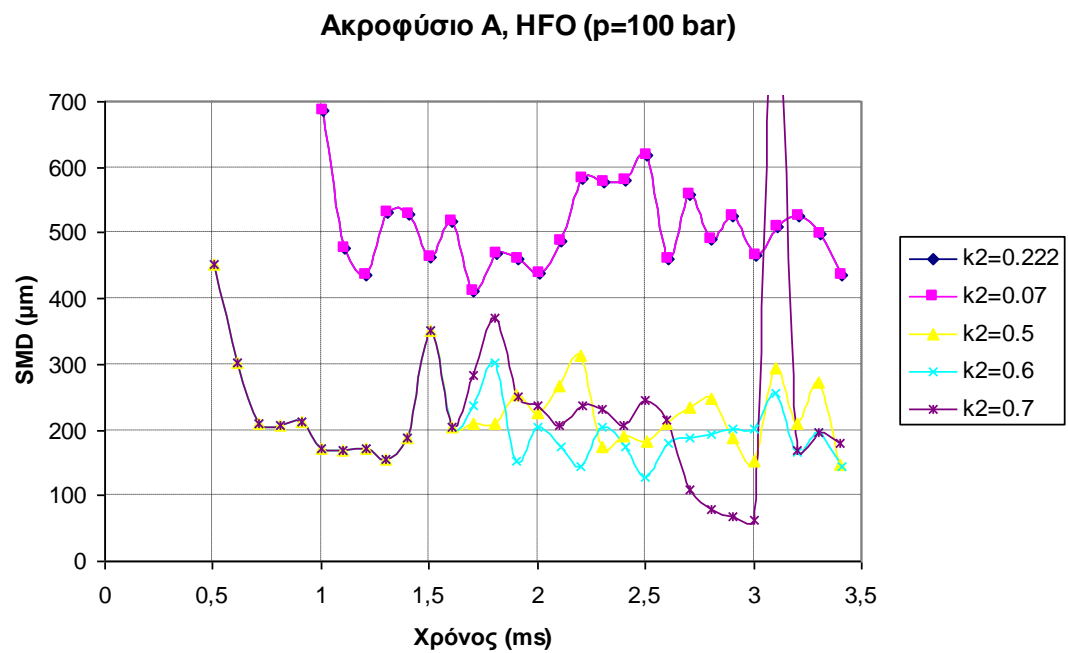
Ακροφύσιο Β, Diesel ($p=100$ bar)



Διάγραμμα 53: Μήκος διείσδυσης συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου Β για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

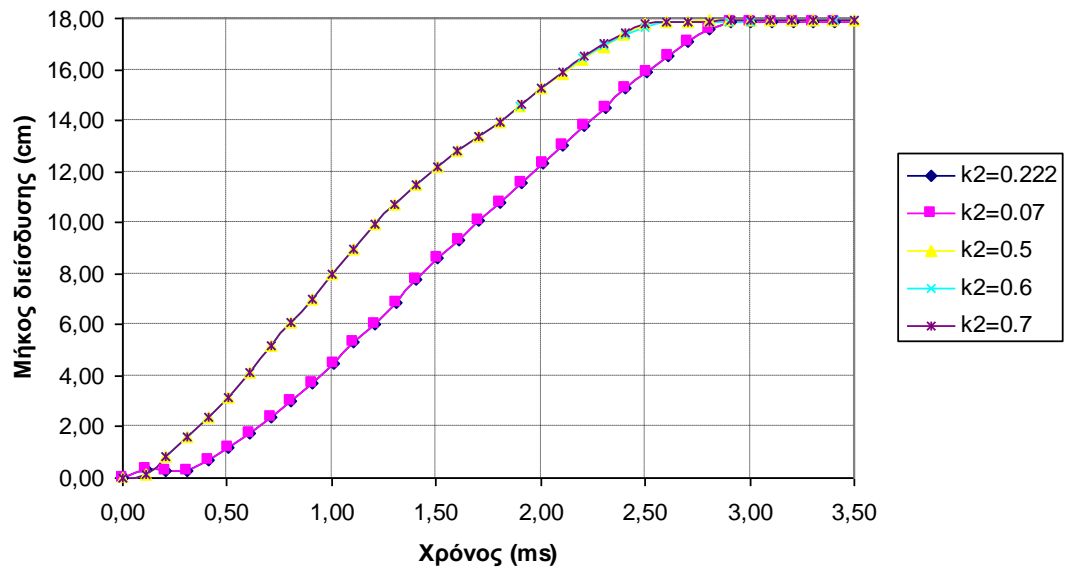
Από τα Διαγράμματα 50-53 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η σταθερά k_2 επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό στις περιπτώσεις που αντιστοιχούν στο ακροφύσιο A, σε σύγκριση με αυτές του ακροφυσίου B. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι η τιμή της σταθεράς k_2 που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μέγεθος σταγονιδίων ($k_2=0.05$) δεν αντιστοιχεί σε όλες τις περιπτώσεις και στο μεγαλύτερο μήκος διείδυσης (όπως θα ήταν αναμενόμενο).

Σημειώνεται επίσης ότι η μεταβολή της σταθεράς k_2 δεν επηρέασε καθόλου το μήκος διείδυσης και το μέγεθος των σταγόνων του βαρέος καυσίμου. Εξαιρέση αποτέλεσε μόνο η περίπτωση του ακροφυσίου A για πίεση 100 bar. Τα αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 54-55. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται βασίζονται σε επεξεργασία των αποτελεσμάτων του κώδικα KIVA3 στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.



Διάγραμμα 54: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο και χρήση του ακροφυσίου A, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Ακροφύσιο A,HFO (p=100 bar)



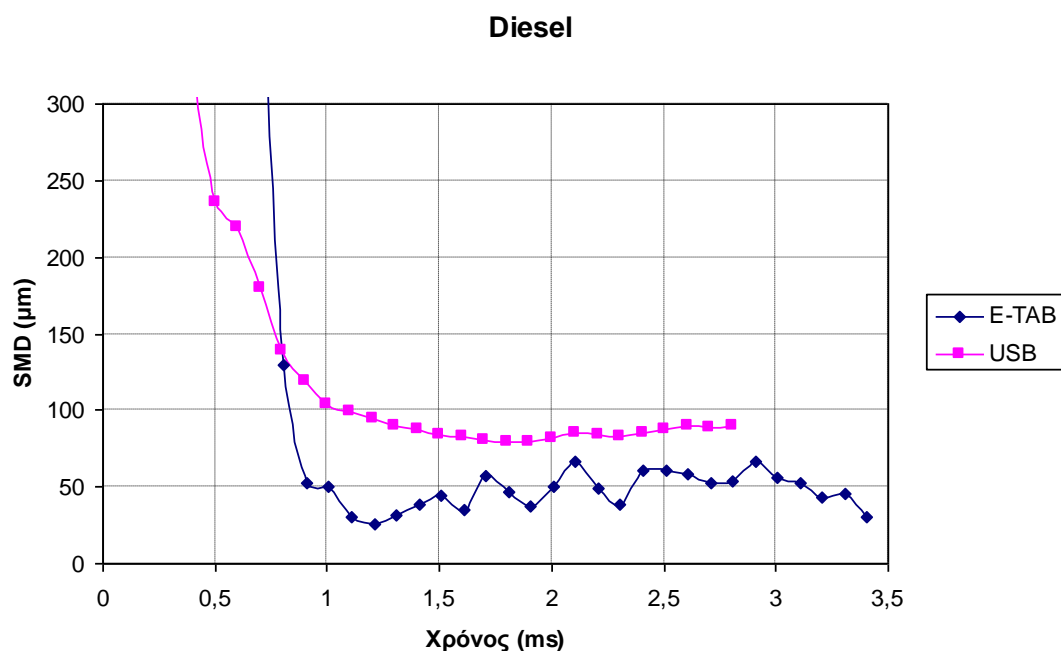
Διάγραμμα 55: Μήκος διείδυσης συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο και χρήση του ακροφυσίου A, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k_2 (βλ. εξίσωση 3.16). Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

Με βάση το Διάγραμμα 54 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η σταθερά k_2 επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος των σταγόνων του spray. Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε τιμή $k_2=0.07$ πρακτικά ταυτίζεται με αυτή για $k_2=0.222$. (Αντίστοιχα, ταυτίζονται οι καμπύλες του μήκους διείδυσης, βλ. Διάγραμμα 55). Όπως είναι αναμενόμενο, αύξηση της τιμής της k_2 οδηγεί σε μείωση του μεγέθους των σταγόνων, δηλαδή σε ταχύτερη διάσπασή τους. Αξίζει επίσης να τονιστεί ότι η καμπύλη του Διαγράμματος 54 που αντιστοιχεί σε $k_2=0.7$ παρουσιάζει μία ξαφνική αύξηση στα 3.1 ms. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανώς σε κάποια σταγόνα που δεν διασπάστηκε, και διατηρεί το αρχικό της μέγεθος, αυξάνοντας έτσι την τιμή της διαμέτρου SMD του spray βαρέος καυσίμου. Σημειώνεται, τέλος, ότι, ενώ οι τιμές της διαμέτρου SMD μπορεί να διαφέρουν αισθητά (Διάγραμμα 54), οι αντίστοιχες σχετικές διαφορές στο μήκος διείδυσης είναι σαφώς μικρότερες (Διάγραμμα 55).

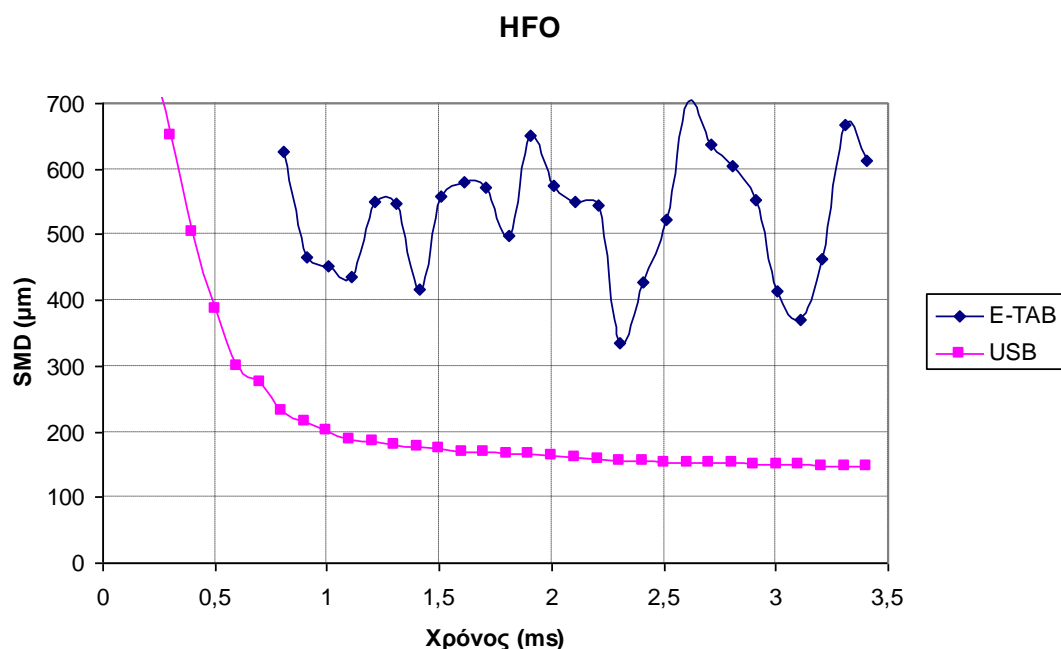
5.4 Σύγκριση μεγέθους σταγονιδίων των μοντέλων E-TAB και USB

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται σύγκριση των τιμών της διαμέτρου SMD για τα δύο μοντέλα spray της παρούσας εργασίας, για περιπτώσεις χρήσης των ακροφυσίων A και B. Η τιμή της σταθεράς k_2 που υιοθετήθηκε σε κάθε περίπτωση είναι αυτή που προέβλεπε σταγονίδια παρόμοιου μεγέθους με αυτά του μοντέλου USB.

Ακροφύσιο A:

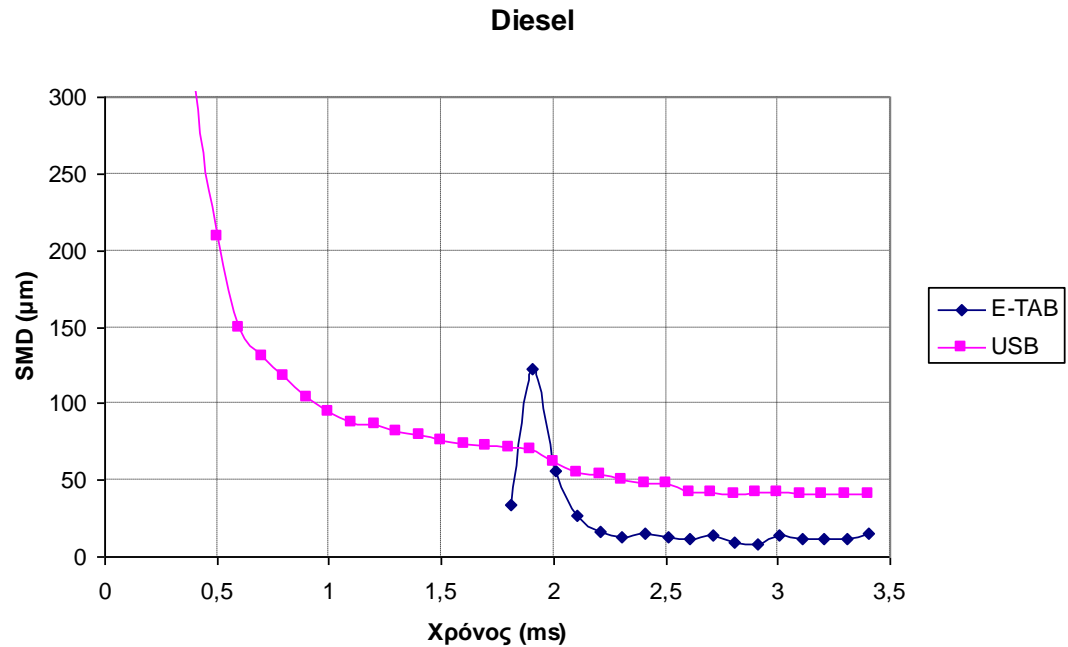


Διάγραμμα 56: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου A, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.05$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.



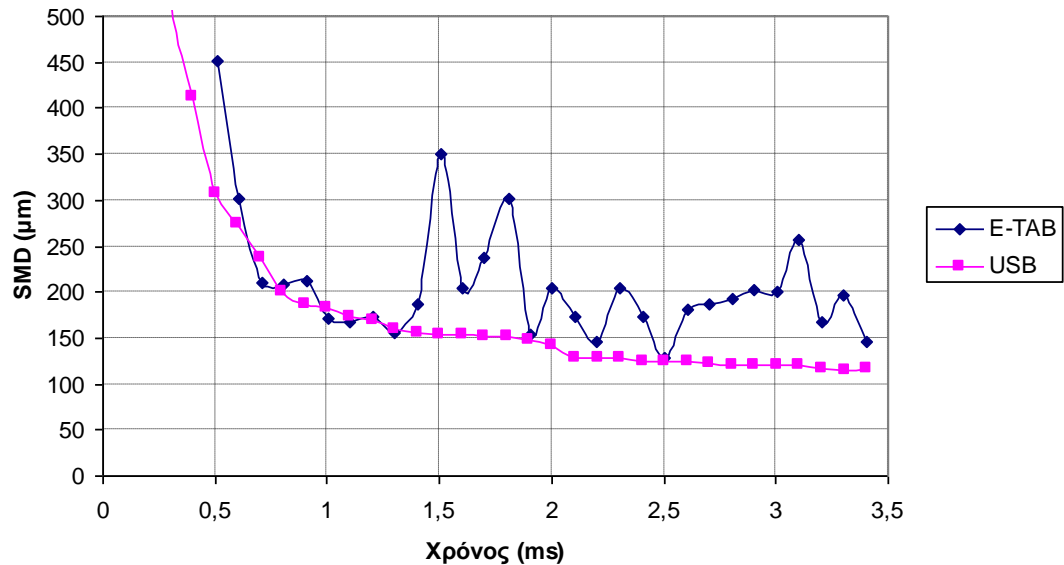
Διάγραμμα 57: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο και χρήση του ακροφυσίου A, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.05$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.

Στο Διάγραμμα 56 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων spray για τη διάμετρο SMD του spray καυσίμου Diesel για το ακροφύσιο A και πίεση 30 bar, ενώ στο Διάγραμμα 57 απεικονίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το spray βαρέος καυσίμου, στις ίδιες συνθήκες. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αντιστοιχούν στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.



Διάγραμμα 58: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου A, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.5$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

HFO

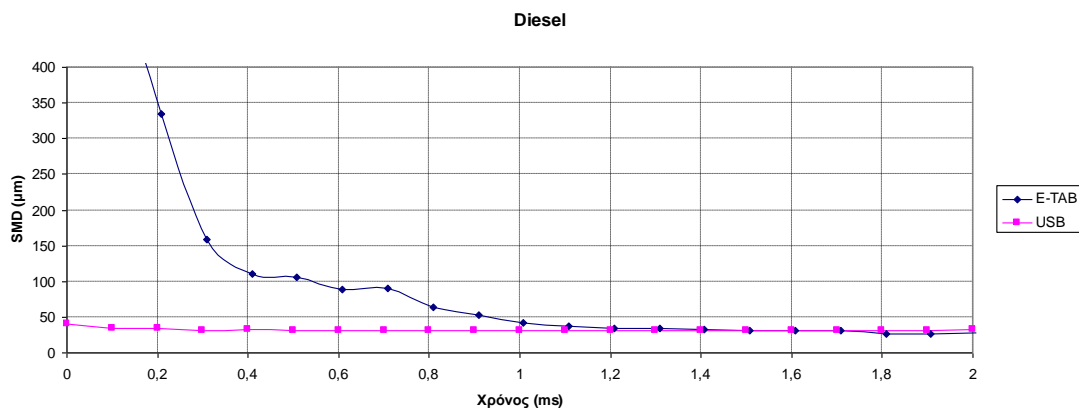


Διάγραμμα 59: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο και χρήση του ακροφυσίου A, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.6$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

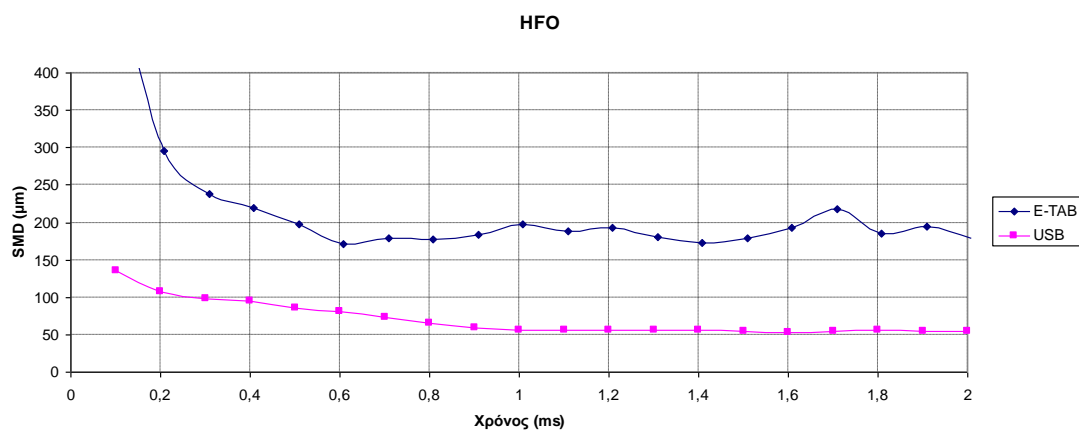
Στο Διάγραμμα 58 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων για το μέγεθος των σταγονιδίων (διάμετρος SMD) του spray Diesel για το ακροφύσιο A και πίεση 100 bar, ενώ στο Διάγραμμα 59 απεικονίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το spray βαρέος καυσίμου, στις ίδιες συνθήκες. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται βασίζονται σε επεξεργασία για τον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14.

Τα Διαγράμματα 60-63 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση των δύο μοντέλων spray, για καύσιμο Diesel και βαρύ καύσιμο, στην περίπτωση χρήσης του ακροφυσίου B. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 14. Από τα Διαγράμματα 60-63 προκύπτει το συμπέρασμα ότι, για καύσιμο Diesel, η συμφωνία ανάμεσα στις προβλέψεις των δύο μοντέλων spray είναι σχετικά καλή. Για βαρύ καύσιμο, παρατηρείται σημαντική απόκλιση ανάμεσα στις προβλέψεις των δύο μοντέλων. Το μοντέλο E-TAB εξακολουθεί να προβλέπει σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος σταγόνων σε σχέση με το μοντέλο USB, γεγονός που καταδεικνύει τον χαμηλό προβλεπόμενο ρυθμό διάσπασης των σταγόνων του βαρέος καυσίμου.

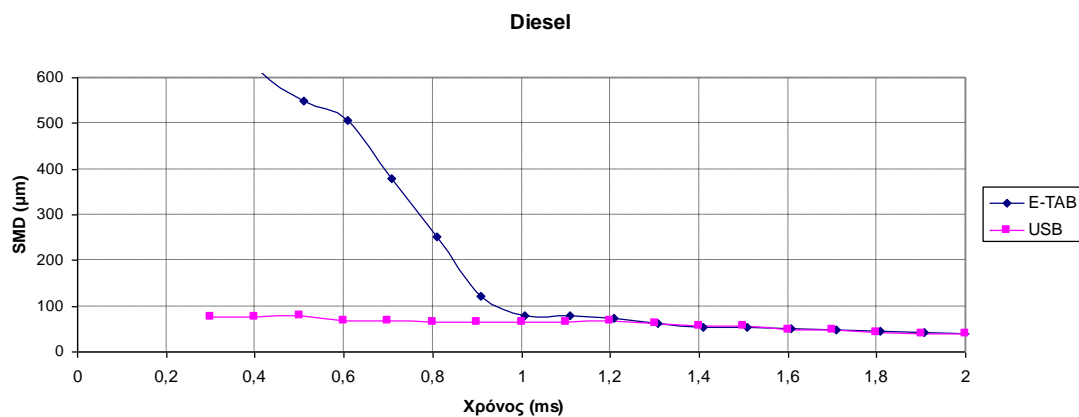
Ακροφύσιο Β:



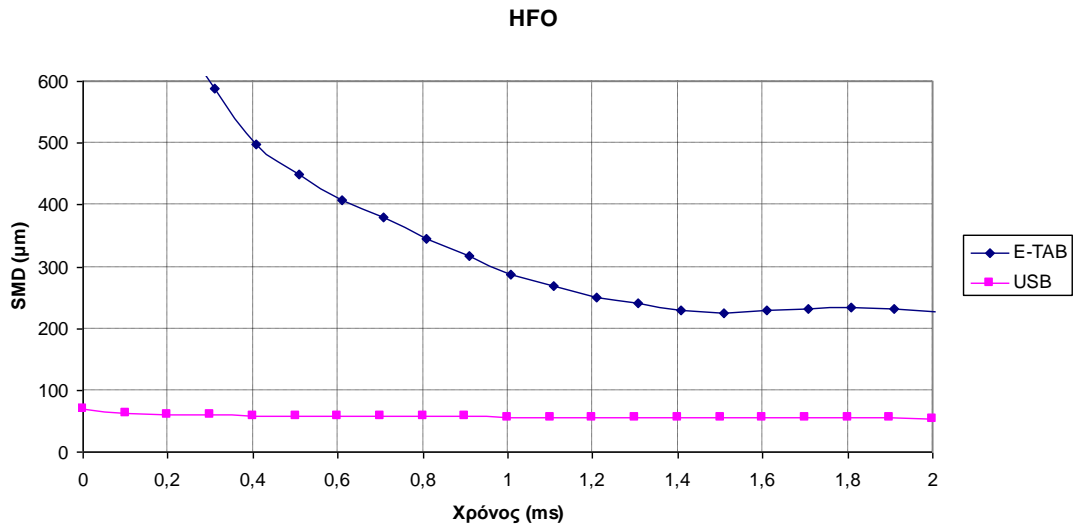
Διάγραμμα 60: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου Β, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.05$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.



Διάγραμμα 61: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο και χρήση του ακροφυσίου Β, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.05$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 30 bar.



Διάγραμμα 62: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για καύσιμο Diesel και χρήση του ακροφυσίου B, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.07$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.



Διάγραμμα 63: Μέση διάμετρος SMD συναρτήσει του χρόνου, για βαρύ καύσιμο και χρήση του ακροφυσίου B, για τα μοντέλα spray E-TAB ($k_2=0.07$) και USB. Η πίεση του θαλάμου είναι ίση με 100 bar.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε μοντέλο βαρέος καυσίμου, με απώτερο στόχο τη χρήση του σε υπολογισμούς υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για εφαρμογές ναυτικών κινητήρων Diesel. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος καυσίμου, και εισήχθη στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA3. Εν προκειμένω, έγινε χρήση δεδομένων που μάς παρασχέθηκαν από την εταιρεία “Motor Oil Hellas”, και αφορούσαν στο δυναμικό ιξώδες, στην πυκνότητα, στην επιφανειακή τάση, στην τάση ατμών, και στην ενθαλπία εξάτμισης του βαρέος καυσίμου. Με χρήση του τροποποιημένου κώδικα KIVA3, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου, για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές ναυτικών κινητήρων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο προφίλ έγχυσης: ένα αντιπροσωπευτικό μεγάλης, αργόστροφης ναυτικής μηχανής, και ένα αντιπροσωπευτικό μεσόστροφης ναυτικής μηχανής Diesel. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα διάσπασης του spray, το μοντέλο E-TAB και το μοντέλο USB. Εξετάστηκαν δύο καύσιμα, το βαρύ καύσιμο και το δεκατετράνιο, το οποίο έχει χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του καυσίμου Diesel. Εδώ, αναλύθηκαν και ποσοτικοποιήθηκαν ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά μεγέθη του spray, συγκεκριμένα το μήκος διείδυσης και το μέγεθος των σταγονιδίων του spray. Αναφορικά με το μέγεθος των σταγονιδίων του spray, αυτό ποσοτικοποιήθηκε με βάση τη διάμετρο SMD, η οποία είναι αντιπροσωπευτική της διαμέτρου μίας μέσης σταγόνας του spray.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών υπολογισμών συγκρίθηκαν με αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, για συνθήκες αντιπροσωπευτικές μεσόστροφων κινητήρων, τα παρόντα αποτελέσματα βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα του Πανεπιστημίου του Rostock [13].

Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμπεραίνεται ότι, για συνθήκες αντιπροσωπευτικές της λειτουργίας ναυτικών κινητήρων Diesel, το μήκος διείδυσης των spray των δύο καυσίμων είναι παρόμοιο, ενώ τα σταγονίδια του spray βαρέος καυσίμου είναι έως και δέκα φορές μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του spray καυσίμου Diesel. Το τελευταίο είναι απόρροια των πολύ διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων των δύο καυσίμων, και ειδικότερα της πολύ μεγαλύτερης τιμής της πυκνότητας και του ιξώδους του βαρέος καυσίμου.

Στη βιβλιογραφία των spray δεν αναφέρονται πειραματικά αποτελέσματα για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές αργόστροφων ναυτικών κινητήρων. Μόνο πολύ πρόσφατα ολοκληρώθηκε η ανάπτυξη μεγάλου θαλάμου καύσης σταθερού όγκου [17]. Έτσι, στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε, στο πλαίσιο παραμετρικής ανάλυσης, η επίδραση της σταθεράς k_2 του μοντέλου E-TAB στα χαρακτηριστικά των spray καυσίμου Diesel και βαρέος καυσίμου. Η συγκεκριμένη σταθερά επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό διάσπασης και το μέγεθος των σταγόνων. Η λεπτομερής διερεύνηση της επίδρασης της σταθεράς k_2 έγινε λόγω της ιδιαίτερης σημασίας που αυτή έχει για το μοντέλο E-TAB σε μεγάλες ταχύτητες έγχυσης. Βρέθηκε ότι η επίδραση της σταθεράς k_2 είναι πολύ εντονότερη στο καύσιμο Diesel, σε σύγκριση με

το βαρύ καύσιμο. Πιο συγκεκριμένα, με αύξηση της τιμής της σταθεράς k_2 , παρατηρήθηκε αύξηση του ρυθμού διάσπασης, και μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων. Από την παραμετρική ανάλυση παρατηρήθηκε, επίσης, ταχύτερη διάσπαση των σταγόνων βαρέος καυσίμου σε σχέση με τις σταγόνες καυσίμου Diesel. Με βάση και την ευρεθείσα μείωση του μεγέθους των θυγατρικών σταγόνων σε συνάρτηση με τον χρόνο διάσπασης, η ταχύτερη διάσπαση οδηγεί στη δημιουργία σταγονιδίων μεγαλύτερου μεγέθους για το spray βαρέος καυσίμου. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα της παραμετρικής ανάλυσης ερμηνεύει τις υπολογιζόμενες μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου SMD από το μοντέλο E-TAB. Με βάση προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για διαφορετικές τιμές της σταθεράς k_2 , υιοθετήθηκε, σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση, η τιμή για την οποία το προβλεπόμενο από το μοντέλο E-TAB μέγεθος των σταγονιδίων ήταν σε καλή συμφωνία με τις προβλέψεις του μοντέλου USB.

Υπογραμμίζεται, τέλος, ότι τα δύο μοντέλα spray που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία έχουν αναπτυχθεί για καύσιμο Diesel, για συνθήκες αντιπροσωπευτικές μικρών κινητήρων της αυτοκινητοβιομηχανίας. Είναι συνεπώς επιτακτική η ανάγκη περαιτέρω έρευνας για την πιστοποίηση των μοντέλων spray για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές των (μεγαλύτερων) ναυτικών κινητήρων.

6.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η πιστοποίηση των μοντέλων spray καυσίμου, και η χρήση τους σε συνδυασμό με το νέο μοντέλο βαρέος καυσίμου σε εφαρμογές ναυτικών κινητήρων Diesel αποτελούν τα λογικά επόμενα βήματα, σε συνέχεια της παρούσας εργασίας. Εν προκειμένω, είναι επιθυμητή η πλήρης κατανόηση του τρόπου επίδρασης όλων των σταθερών του μοντέλου E-TAB στα κύρια χαρακτηριστικά του spray βαρέος καυσίμου (μήκος διείσδυσης και μέγεθος σταγονιδίων).

Ο συνδυασμός των βελτιστοποιημένων μοντέλων διάσπασης δέσμης καυσίμου με μοντέλα ατμοποίησης και καύσης αποτελούν ένα επόμενο λογικό βήμα για μία βελτιωμένη περιγραφή της θερμορευστομηχανικής ναυτικών κινητήρων Diesel.

Τέλος, σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου, θα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και μεγάλη πρακτική σημασία η βελτιστοποίηση παραμέτρων έγχυσης βαρέος καυσίμου σε ναυτικούς κινητήρες, σε πλήρες και σε μερικό φορτίο, με χρήση συζευγμένων εργαλείων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και βελτιστοποίησης, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μελέτες για καύσιμο Diesel [20].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Commission Directorate General Environment, “Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments”, August 2005
2. International Maritime Organization, “MARPOL 73/78 Annex VI: Prevention of Air Pollution from Ships”, August 2004
3. Κυρτάτος Ν.Π., “Ναυτικοί Κινητήρες Diesel-Θέματα Σχεδίασης και Λειτουργίας”, Εκδόσεις Συμμετρία, 1993
4. Lloyds Register, “Marine Exhaust Emission Research Programme, Phase II Summary Report”, 1992
5. Καρώνης Δ., Ζαννίκος Φ., Λόης Ε., Στούρνας Σ., “Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών”, Ε.Μ.Π., 2007
6. Steernberg 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
7. Stiesch G., “Modeling Engine Spray and Combustion Processes”, Springer Verlag 2003
8. Κοντούλης Π. Ι., “Υπολογιστική Μελέτη Εναλλακτικών Στρατηγικών Έγχυσης σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2008
9. Chryssakis C., “A Unified Fuel Spray Breakup Model for Internal Combustion Engine Applications”, PhD Thesis, University of Michigan, 2005
10. Tanner F. X., “Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays”, SAE Paper 970050, 1997
11. Chryssakis C., Assanis D. “A Unified Fuel Spray Breakup Model for Internal Combustion Engine Applications”, “Atomization and Sprays”, vol. 18, pp. 1-52, 2008
12. Chryssakis C., Kaiktsis L., “Evaluation of Fuel Spray Atomization Models for Conditions Applicable to Large Marine Diesel Engines”, Technical Paper ILASS 08-P015, Lake Como, Italy, September 2008
13. 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
14. Pizza G., Wright Y.M., Weisser G., Boulouchos K., “Evaporating and non-evaporating Diesel Spray Simulation: Comparison between the E-TAB and WAVE Breakup Model”, Int. J. Vehicle Design, Vol. 45, Nos. 1-4, 2007
15. Schenk C., Stassen W. J. M., Lewis C., P., G., “Ignition Quality of Residual Fuel Oils” Proc. of the 22nd CIMAC Internat. Congress on Combustion Engines, Volume 2, Copenhagen, Denmark, May 18-21, 1998

16. Wauquier J.-P., “Crude Oil Petroleum Products Process Flowsheets”, p. 97, Editions Technip, IFP Publications, 1995
17. Herrmann K., Schulz R., Weisser G., “Development of a Reference Experiment for Large Diesel Engine Combustion System Optimization”, CIMAC Congress 2007, Vienna, May 2007
18. Struckmeier D., Goldsworthy L., Tajima H., Kawauchi S., Tsuru D., “Modelling of Ignition and Combustion Characteristics of Heavy Residual Fuel Oil on Two Component Approximation”, presented at 7th International Colloquium Fuels, Stuttgart, Germany, January 2009
19. Kontoulis P., Chryssakis C., Kaiktsis L., “Evaluation of Pilot Injections in a Large Two-Stroke Marine Diesel Engine, Using CFD and T-φ Mapping”, presented at COMODIA 2008, Sapporo, Japan, July 2008
20. Andreadis P., Chryssakis C., Kaiktsis L., “Optimization of Injection characteristics in a Large Marine Diesel Engine Using Evolutionary Algorithms”, SAE Technical Paper 2009-01-1448, Detroit, MI, April 2009
21. Ανδρεάδης Π., “Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Έγχυσης σε Ναυτικούς Κινητήρες Diesel”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2008
22. Amsden, A.A., KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries, Los Alamos National Laboratory LA-12503-MS, 1993
23. Amsden A.A., “KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves”, Los Alamos National Laboratory LA-13313-MS, July 1997
24. Larmi M., Rantanen P., Tiainen J., Kijjarvi J., Tanner F.X., Stalsberg-Zarling K., “Simulation of Non-Evaporating Diesel Sprays and Verification with Experimental Data”, presented at SAE World Congress 2002-01-0946, Detroit, MI, 2002
25. O’Rourke P.J., Amsden A.A., “The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup, SAE Technical Paper 872089”, 1987
26. Huh K.Y., Lee E., Koo J.-Y., “Diesel Spray Atomization Model Considering Nozzle Exit Turbulence Conditions”, *Atomization and Sprays*, vol. 8, pp. 453–469, 1998
27. Faeth G.M., Hsiang L.-P., Wu P.-K., “Structure and Breakup Properties of Sprays”, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, Suppl., 1995
28. Hsiang L.-P., Faeth G.M., “Drop Properties after Secondary Breakup, *Int. J. Multiphase Flow*”, Vol. 19, No. 5, pp. 721-735, 1993
29. Tanner F.X., “Development and Validation of a Cascade Atomization and Drop Breakup Model for High-Velocity Dense Sprays”, *Atomization and Sprays*, Vol. 14, No. 3, 2004
30. Kyriakides N., Chryssakis C., Kaiktsis L., “Influence of Heavy Fuel Properties on Spray Atomization for Marine Diesel Engine Applications”, SAE Technical Paper 2009-01-1858, Florence, Italy, June 2009

31. Goldsworthy L., "Computational Fluid Dynamics Modelling of Residual Fuel Oil Combustion in the Context of Marine Diesel Engines", *Int. J. Engine Research*, Vol. 7, pp. 181-199, 2006
32. Pilch M., Erdman C.A., "Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Breakup of a Liquid Drop", *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 13, No 6, pp. 741-757, 1987
33. Gelfand B.E., "Droplet Breakup Phenomena in Flows with Velocity Lag", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 22, pp. 201-265, 1996
34. <http://engineering.catalysis.gr/crudeOilRefining.html>
35. Arcoumanis C., Gavaises M., French B., "Effect of Fuel Injection Process on the Structure of Diesel Sprays", SAE Paper 970799, 1997
36. Helenbrook B.T., Edwards C.F., "Quasi-Steady Deformation and Drag of Uncontaminated Liquid Drops", *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 28, pp. 1631-1657, 2002
37. Hinze J.O., "Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes", *AIChE*, 1, pp.289-295, 1955
38. Ranger A.A., and Nichols, J.A., "Aerodynamic Shattering of Liquid Drops", *AIAA*, 7, pp. 285-290, 1969
39. Krzeczowski S.A., "Measurement of Liquid Droplet Disintegration Mechanisms", *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 6, pp.227-239, 1980
40. Gelfand B.E., "Droplet Breakup Phenomena in Flows with Velocity Lag", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 22, pp. 201-265, 1996

Παράρτημα 1: Τροποποιήσεις στον κώδικα KIVA για την εισαγωγή των ιδιοτήτων του βαρέος καυσίμου.

```
library of thermophysical properties of various substances
c   used as fuels or sprays:
c
c   paraffins (alkanes):
c
c       methane      (ch4)
c       ethane       (c2h6)
c       propane      (c3h8)
c       n-butane     (c4h10)
c       isobutane    (2-methylpropane) (c4h10)
c       n-pentane    (c5h12)
c       n-hexane     (c6h14)
c       n-heptane    (c7h16)
c       n-octane     (c8h18)
c       isooctane    (2,2,4-trimethylpentane) (c8h18)
c       n-nonane     (c9h20)
c       n-decane     (c10h22)
c       n-dodecane   (c12h26)
c       n-tridecane  (c13h28)
c       n-tetradecane (c14h30)
c       n-hexadecane (c16h34)
c
c   olefins (alkenes):
c
c       ethylene     (ethene) (c2h4)
c       propylene    (propene) (c3h6)
c       1-octene     (c8h16)
c
c   aromatics (alkyl benzenes):
c
c       benzene      (c6h6)
c       methylbenzene (toluene) (c7h8)
c       ethylbenzene (c8h10)
c
c   alcohols (alkanols):
c
c       methanol     (methyl alcohol) (ch3oh)
c       ethanol      (ethyl alcohol) (c2h5oh)
c
c   alkynes:
c
c       acetylene    (ethyne) (c2h2)
c   liquid fuel mixtures:
c
c       gasoline     (c8h17)
c       kerosene     (c12h23)
c       jet-a        (c12h23, univ. of south florida
model)
c       diesel #2    (df2) (c12h26, cummins model)
c       diesel #2    (di) (c13h23, univ. of illinois
model)
c       heavy fuel oil (hfo) (ntua)
c
c   hydrogen compounds:
```

```

c
c      hydrogen      (h2)
c      water         (h2o)
c
c      fuelib is used by:  fuel
c
c      fuelib is a block data subprogram
c
c
=====
=
c
  include 'comkiva.i'
  include 'comfuel.i'
  data (idfuel(n),n=1,nfuels)      /'      ch4','      c2h6',
1 '      c3h8','      c4h10','      ic4h10','      c5h12','      c6h14',
2 '      c7h16','      c8h18','      ic8h18','      c9h20','      c10h22',
3 '      c12h26','      c13h28','      c14h30','      c16h34',
4 '      c2h4','      c3h6','      c8h16',
5 '      c6h6','      c7h8','      c8h10',
6 '      ch3oh','      c2h5oh',
7 '      c2h2',
8 'gasoline','kerosene','      jet-a','      df2','      di',
9 '      hfo','      h2','      h2o'//
c
-----
c      mw      tcrit  htform liq  roliq npvap st350  aird0 airn
fuel
c -----
-----
,!      ch4      1  16.043,190.55,-15.91,0.,  0.      , 0.0, 0.      , 0.      ,0.
,!      c2h6      2  30.070,305.42,-16.30,0.,  0.      , 0.0, 0.      , 0.      ,0.
,!      c3h8      3  44.097,369.80,-19.69,0.,  0.      , 0.0, 0.      , 0.      ,0.
,!      c4h10     4  58.124,425.14,-23.55,0.,  0.      , 0.0, 0.      , 0.      ,0.
,!      ic4h10    5  58.124,407.85,-25.43,0.,  0.      , 0.0, 0.      , 0.      ,0.
,!      c5h12     6  72.151,469.69,-27.46,0.,  0.      , 0.0, 0.      , 0.      ,0.
7
31.08,1.,0.65933,52.0,12.60,0.0646,1.60,!      c6h14      86.178,507.50,-
8
34.87,1.,0.68375,56.0,14.66,0.0594,1.60,!      c7h16      100.205,540.30,-
9
38.70,1.,0.70267,58.0,16.22,0.0544,1.60,!      c8h18      114.232,543.9      ,-
x
41.01,1.,0.69195,56.0,13.77,0.0544,1.60,!      ic8h18     128.260,594.6      ,-
1
42.31,1.,0.71772,61.0,17.54,0.0490,1.60,!      c9h20      142.287,617.9      ,-
2
46.06,1.,0.73012,63.0,18.60,0.0461,1.60,!      c10h22     170.340,658.2      ,-
3
53.54,1.,0.74875,67.0,20.47,0.0416,1.60,!      c12h26     184.367,675.8      ,-57.28,1.,0.75610,69.0,21.16,0.04
,!      c13h28     198.394,691.9      ,-
4
61.02,1.,0.76255,71.0,21.78,0.0374,1.60,!      c14h30

```

```

        6                226.448,720.6                , -
68.50,1.,0.77353,74.0,22.84,0.0348,1.87/! c16h34
        data (fuelcon(n),n=145,297) /
c -----
c
fuel      c      mw      tcrit  htform liq  roliq npvap st350  aird0 airn
c -----
      1  28.054,282.34,+14.59,0.,  0.  , 0.0, 0.  ,  0.  ,0.
,!  c2h4
      2  42.081,365.57, +8.30,0.,  0.  , 0.0, 0.  ,  0.  ,0.
,!  c3h6
      3                                112.208,566.65,-10.23,1.,0.7149
,58.0,16.32,0.0544,1.60,!  c8h16
      4                                78.114,562.16,+23.99,1.,0.8789
,58.0,21.50,0.0783,1.89,!  c6h6
      5                                92.142,591.80,+17.53,1.,0.8669
,61.0,21.78,0.0709,1.90,!  c7h8
      6                                106.170,617.2                ,+13.95,1.,0.8669,
63.0,22.65,0.0709,1.90,!  c8h10
      7                                32.043,512.64,-
45.42,1.,0.79129,53.0,17.65,0.1336,1.80,!  ch3oh
      8                                46.070,513.92,-51.95,1.,0.78937,53.0,17.62,0.105
,1.77,! c2h5oh
      9  26.038,308.32,+54.67,0.,  0.  , 0.0, 0.  ,  0.  ,0.
,!  c2h2
      x                                113.228,548.0                ,-52.78,1.,0.751
,56.0,17.02,0.0790,1.87,! gasoln
      1                                167.315,700.0                ,-52.77,1.,0.819
,72.0,21.65,0.0416,1.60,! kerosn
      2                                167.315,668.0                ,-72.53,1.,0.808
,69.0,18.85,0.0416,1.60,! jet-a
      3                                170.340,720.6                ,-52.77,1.,0.848
,74.0,20.47,0.0416,1.60,! df2
      4                                179.327,736.0                ,-9.826,1.,0.848
,75.0,24.63,0.0416,1.60,! di
      5                                463.000,1033.                ,-52.77,1.,0.9537
,74.0,20.47,0.0416,1.60,! hfo
      6  2.016, 33.0 ,  0.  ,0.,  0.  , 0.0, 0.  ,  0.  ,0.
,!  h2
      7  18.016,647.0 , -57.10,1.,  1.  ,66.0,24.9 ,0.216
,1.80/! h2o
=====

```

```

c
c      e n t h a l p i e s :
c
=====
=
c
c  the enthalpies, in kcal/mole, at intervals t=100(n-1). in
most
c  cases, we linearly extrapolated the data beyond 1500k or
3000k.
c  except where noted otherwise below, the data is shifted so
that
c  the value of 0. coincides with 0 kelvin; however, this
shift is
c  immaterial, as it is only the differences between adjacent
values

```

```

c      that matters.  the dataset selected below by subroutine
fuel will
c      be converted to ergs/gm later on in subroutine rinput.
.....
.....
c +++ heavy fuel oil (hfo)
c +++
      data                      (hkhfo(n),n=1,51)          /
2*0.,7.28,15.59,23.9,32.21,40.52,
      1 48.83,57.14,65.45,73.76,82.07,90.38,98.69,37*107/
.....
.....
=====
=====
c      l a t e n t   h e a t s   o f   v a p o r i z a t i o
n :
c
=====
=
c
c      the liquid latent heats of vaporization, in ergs/gm, at
intervals
c      t=100(n-1).  except where noted otherwise, values are
taken from
c      n.b. vargaftik 'tables on the thermophysical properties of
liquids
c      and gases,' and are linearly extrapolated back to t=0 k:
c
c -----
-----
c +++ heavy fuel oil (hfo)
c +++
      data                      (hlathfo(n),n=1,51)
/8.0e+9,7.65e9,7.28e9,6.9e9,6.53e9,
      1
6.16e9,2.8e9,2.0e9,1.20e9,4.00e8,41*0./
c
=====
=
c
c      v a p o r   p r e s s u r e s :
c
=====
=
c
c      the liquid vapor pressures, in dynes/sq. cm., at intervals
c      t=10(n-1), from vargaftik except as noted.  note that each
table
c      must contain values beyond tcrit of the fuel to protect
against
c      over-reaching in subroutine evap.  also note that pvap is
c      dimensioned at lvap words in common /lek/ in comdeck
comkiva;
c      lvap must be adequate for all fuels in the library.
c      for heptane, dodecane, tridecane and
c      hexadecane, the vapor pressure is scaled with temperature
c      using eqn (see reid, prop. of liq. and gas. eqn 6-2.4,2.5)
c       $\ln(pv) - \ln(pv0) = (\ln(pv1) - \ln(pv0)) ((t-t0)/(t1-t0)) * t1/t$ 
c      w/ t1=tcrit, t0=520k (dodecane), t0=510k (tridecane)
c -----
-----

```

```

c +++ heavyfuel oil (hfo)
c +++
      data (pvaphfo(n),n=1,75) /20*0.,
1
2*0.01,0.02,0.04,0.07,0.13,0.24,0.45,0.81,1.48,2.71,4.94,
2
9.00,16.42,29.95,54.63,99.64,181.75,331.5,604.63,1.10e3,
3
2.01e3,3.67e3,6.69e3,1.22e4,2.23e4,4.06e4,7.41e4,1.35e5,
4
2.46e5,4.49e5,8.20e5,1.49e6,2.73e6,4.97e6,9.07e6,1.65e7,
5      3.02e7,5.50e7,1.00e8,1.83e8/
=====
=====
c          l i q u i d   v i s c o s i t i e s :
c
=====
=
c
c   the liquid viscosities, in gm/(cm sec).  as in the vapor
pressures
c   above, the intervals are t=10(n-1), and the tables contain
values
c   beyond tcrit of the fuel.  note that visliq is dimensioned
at lvap
c   words in common /lek/ in comdeck comkiva.  visual
extrapolation was
c   required for most of these tables due to lack of tabular
data, and
c   warrants improvement, especially around tcrit.
c
c -----
-----
c +++ heavy fuel oil (hfo)
c +++
      data          (vislqhfo(n),n=1,75)          /
28*489.4,94.68,48.39,25.31,13.52,7.36,
1 4.09,2.31,1.33,0.77,0.46,0.28,0.17,0.10,0.06,0.04,8*0. /

```