



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

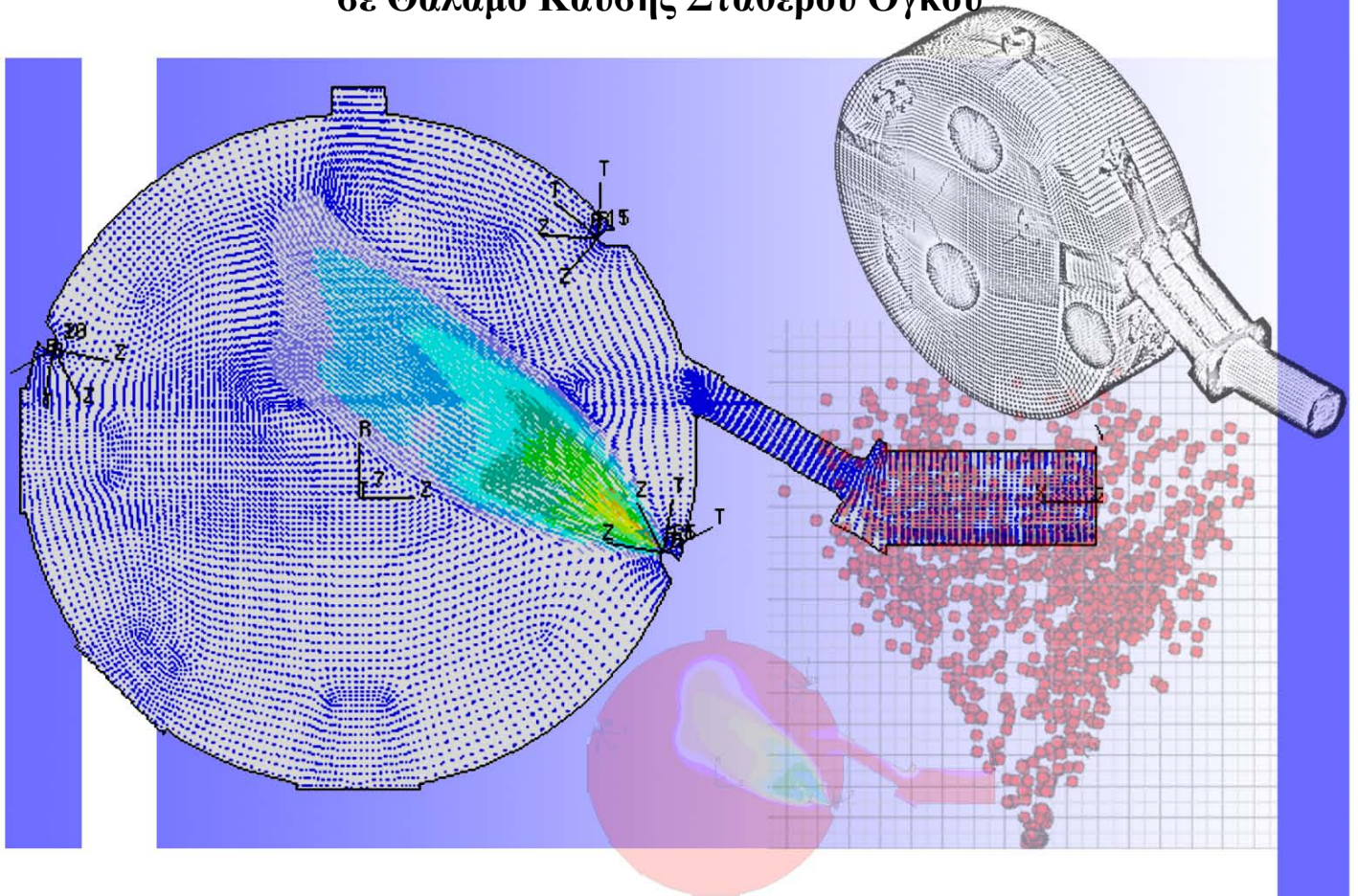
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κουτρούμπας

Αριθμητική Προσομοίωση Φαινομένων Έγχυσης  
σε Θάλαμο Καύσης Σταθερού Όγκου



Εξεταστική επιτροπή:

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

Μέλη: Ν. Κυρτάτος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. Φραγκόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Γεώργιος Κουτρούμπας**

**Αριθμητική Προσομοίωση Φαινομένων Έγχυσης  
σε Θάλαμο Καύσης Σταθερού Όγκου**

**Εξεταστική επιτροπή:**

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

**Μέλη: Ν. Κυρτάτος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Χ. Φραγκόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2010**



## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, η οποία σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο Ε.Μ.Π., στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους μου συμπαραστάθηκαν στην υλοποίησή της. Έτσι, ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή και τον Επιστημονικό Συνεργάτη κ. Χ. Χρυσάκη για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά τους στην πορεία αυτής της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Ν. Κυρτάτο και κ. Χ. Φραγκόπουλο ως διδάσκοντες και μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, καθώς επίσης και τους φίλους μου, και ιδιαίτερα τη Μαρία.



## Σύνοψη

Η συστηματική μελέτη και κατανόηση του σχηματισμού του μίγματος αέρα-καυσίμου στις σύγχρονες εγκαταστάσεις πρόωσης, οι οποίες κάνουν χρήση συστημάτων έγχυσης υψηλής πίεσης, είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την περαιτέρω βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας τους. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι σήμερα ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο. Στα συστήματα πρόωσης, η περιγραφή της θερμορευστομηχανικής του spray καυσίμου επηρεάζει σημαντικά τη συνολική ακρίβεια των υπολογισμών. Λόγω της πολυπλοκότητας των διεργασιών της ροής του spray, η προσομοίωσή της είναι ιδιαίτερα σύνθετη και δυσχερής.

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ροής κατά την έγχυση καυσίμου σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου, για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές μεγάλων ναυτικών κινητήρων Diesel. Αρχικά, γίνεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση αναφορικά με τις διεργασίες διάσπασης (πρωτογενούς και δευτερογενούς) του spray, και τη μοντελοποίησή τους. Στη συνέχεια, με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Star-CD, έγινε προσομοίωση της ροής κατά την έγχυση καυσίμου σε μεγάλο θάλαμο καύσης σταθερού όγκου. Η αντίστοιχη πειραματική διάταξη αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος HERCULES. Η προσομοίωση έγινε για διαφορετικούς τύπους καυσίμου (επτάνιο,  $C_7H_{16}$ , και δωδεκάνιο,  $C_{12}H_{26}$ ), σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης (65, 90 και 130 bar) εντός του θαλάμου.

Από την προσομοίωση προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με το μέγεθος των σταγονιδίων (διάμετρος SMD – Sauter Mean Diameter), και το μήκος διείδυσης του spray. Λόγω των διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων, τα spray του δωδεκανίου ( $C_{12}H_{26}$ ) χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο μέγεθος σταγονιδίων και μεγαλύτερες τιμές του μήκους διείδυσης, σε σύγκριση με τα spray του επτανίου ( $C_7H_{16}$ ).





## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	v
Σύνοψη.....	vii
Περιεχόμενα .....	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Γενικά για τα φαινόμενα ψεκασμού .....	1
1.2 Προσομοίωση φαινομένων ψεκασμού.....	2
1.3 Σχηματισμός και διάσπαση του spray.....	4
1.4 Μελλοντικές απαιτήσεις .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Έγχυση καυσίμου στους κινητήρες Diesel.....	9
2.1 Συστήματα έγχυσης καυσίμου .....	9
2.1.1 Γενικά.....	9
2.1.2 Σύστημα έγχυσης κοινού συλλέκτη (common rail) .....	10
2.1.3 Σύστημα έγχυσης μονάδας εγχυτήρα (unit injector).....	12
2.2 Διεργασίες spray .....	17
2.2.1 Γενικά.....	17
2.2.2 Ροή εντός του ακροφυσίου και εμφάνιση φαινομένων σπηλαιώσης.....	19
2.2.3 Πρωτογενής διάσπαση .....	21
2.2.3.1 Μηχανισμοί πρωτογενούς διάσπασης .....	21
2.2.3.2 Το μοντέλο wave-breakup .....	26
2.2.4 Δευτερογενής διάσπαση.....	30
2.2.4.1 Μηχανισμοί δευτερογενούς διάσπασης.....	30
2.2.4.2 Χρόνοι διάσπασης σταγονιδίου .....	33
2.2.4.3 Μεγέθη των σταγονιδίων.....	35
2.2.5 Δομή της πυκνής περιοχής του spray.....	36
2.2.6 Αλληλεπίδραση δέσμης καυσίμου - τοιχώματος .....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η πειραματική διάταξη του ερευνητικού προγράμματος HERCULES.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43

3.2 Προδιαγραφές .....	45
3.3 Περιγραφή της διάταξης .....	46
3.4 Λειτουργία της διάταξης .....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Προσομοίωση φαινομένων έγχυσης καυσίμου .....	57
4.1 Εισαγωγή.....	57
4.2 Καθορισμός οριακών συνθηκών.....	58
4.3 Ρυθμίσεις έγχυσης.....	60
4.4 Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης .....	66
4.4.1 Έγχυση επτανίου, με χρήση τριών εγχυτήρων.....	66
4.4.2 Σύγκριση έγχυσης επτανίου και δωδεκανίου, με χρήση δύο εγχυτήρων..	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα - Προτάσεις .....	97
5.1 Συμπεράσματα .....	97
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	97
Πηγές .....	99

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

---

### 1.1 Γενικά για τα φαινόμενα ψεκασμού

Τα φαινόμενα ψεκασμού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλά τεχνικά συστήματα και βιομηχανικές εφαρμογές. Μερικά μόνο παραδείγματα είναι η ψύξη με ψεκασμό ψυκτικού υγρού, η βαφή με ψεκασμό, καθώς και η καύση με ψεκασμό καυσίμου στους κινητήρες Diesel και βενζίνης. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των σχηματιζόμενων σταγονιδίων ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή.

Στις μηχανές εσωτερικής καύσης η διεργασία του ψεκασμού χρησιμοποιείται προκειμένου να αναμιχθεί πλήρως το υγρό καύσιμο με τον συμπιεσμένο αέρα της καύσης. Ο κύριος στόχος της διεργασίας του ψεκασμού είναι η διάσπαση του καυσίμου σε μικρά σταγονίδια, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η επιθυμητή διασπορά και διείδυση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας επαφής του καυσίμου με τον συμπιεσμένο αέρα. Με την παρουσία αυτής της αυξημένης επιφάνειας επαφής επιτυγχάνεται έντονη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα προς το καύσιμο, διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται η γρήγορη ατμοποίηση του καυσίμου, η πλήρης ανάμιξη με τον αέρα, η αυτανάφλεξη του μίγματος και τελικά η καύση του [1], [2]. Ο ρυθμός ατμοποίησης είναι ανάλογος με την επιφάνεια του υγρού καυσίμου, και έτσι, θεωρώντας, παραδείγματος χάριν, μια σταγόνα καυσίμου των 2 mm διασπώμενη σε περίπου οκτώ εκατομμύρια σταγονίδια των 10 $\mu$ m, επιτυγχάνεται ρυθμός ατμοποίησης 200 φορές μεγαλύτερος [1]. Επιπλέον, στις μηχανές άμεσης έγχυσης (Diesel και Otto), όπου το καύσιμο εγχύεται άμεσα στον θάλαμο καύσης προκειμένου να διαμορφωθεί ένα αναφλέξιμο μίγμα με τον αέρα, το προφίλ και οι ταχύτητες έγχυσης του καυσίμου επηρεάζουν τις διεργασίες της έναυσης, της καύσης (ρυθμός έκλυσης θερμότητας), καθώς και τον σχηματισμό των κύριων ρύπων. Η προκύπτουσα χρονική μεταβολή της πίεσης επιδρά στα επίπεδα του θορύβου, και στην ειδική κατανάλωση του καυσίμου. Η κινητική ενέργεια της δέσμης του καυσίμου αντιπροσωπεύει την κύρια πηγή για την παραγωγή τύρβης μέσα στον θάλαμο καύσης, και επομένως ελέγχει την μικρο-αναλογία ανάμιξης αέρα-καυσίμου, μέσω τυρβώδους διάχυσης, και συνεπώς τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Συνεπώς, η

λεπτομερής κατανόηση των διεργασιών ψεκασμού του καυσίμου είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό των σύγχρονων μηχανών εσωτερικής καύσης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ολοένα περισσότερο ευέλικτες στρατηγικές εγχύσεως.

Ωστόσο, τα φαινόμενα ψεκασμού είναι εξαιρετικά σύνθετα, καθώς τα υγρά σταγονίδια καυσίμου αλληλεπιδρούν με πολλαπλούς τρόπους με την τυρβώδη αέρια φάση του αερίου αλλά και με την ίδια τη φλόγα [1]. Επιπλέον, οι θάλαμοι καύσης των μηχανών, στους οποίους σχηματίζεται η δομή της δέσμης και των σταγονιδίων καυσίμου (spray), αντιπροσωπεύουν ένα “εχθρικό” περιβάλλον, στο οποίο είναι δύσκολο να υπάρξει πρόσβαση με κατάλληλες τεχνικές μέτρησης, χωρίς αλλαγή των γεωμετρικών και θερμικών χαρακτηριστικών που πρακτικά υφίστανται σε μια μηχανή παραγωγής. Αυτό καθιστά δύσκολη την αξιολόγηση των μοντέλων spray. Ωστόσο, η αριθμητική προσομοίωση είναι σήμερα ένα ισχυρό ερευνητικό εργαλείο που μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τις διεργασίες ψεκασμού και τη μελέτη της θερμορευστομηχανικής των μηχανών. Κατά συνέπεια, τα μοντέλα ψεκασμού, αφού επαληθευτούν από πειραματικά δεδομένα σε ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο συνθηκών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ερμηνεία διαθέσιμων πειραματικών στοιχείων, καθώς και για την προσομοίωση διεργασιών έγχυσης καυσίμου.

Το βάθος της ανάλυσης που είναι δυνατό να επιτευχθεί με χρήση μοντέλων ψεκασμού έχει αυξηθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, εν μέρει λόγω της μεγάλης προόδου στην τεχνολογία των υπολογιστών. Αυτή η τάση αναμένεται να συνεχιστεί, ώστε η προσομοίωση των διεργασιών ψεκασμού καυσίμου με χρήση κωδίκων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) να χρησιμοποιείται σε επίπεδα ρουτίνας για την ανάπτυξη νέων μηχανών και συστημάτων καύσης στο εγγύς μέλλον [1].

## 1.2 Προσομοίωση φαινομένων ψεκασμού

Λόγω της αυξανόμενης σημασίας της προστασίας του περιβάλλοντος, οι κατασκευαστές των μηχανών εσωτερικής καύσης αναγκάζονται να βελτιώνουν συνεχώς τον σχεδιασμό των μηχανών, με στόχο τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Στο μέλλον, για πολλές εφαρμογές, θα καταστεί αναγκαία πρόσθετη μείωση των εκπομπών με διατάξεις όπως οι καταλύτες και οι παγίδες σωματιδίων αιθάλης [3].

Σε αυτό το πλαίσιο, η αριθμητική προσομοίωση και η βελτιστοποίηση των διεργασιών σχηματισμού και καύσης του μίγματος αέρα-καυσίμου αποκτά πρωταρχική σημασία. Ένα βασικό πλεονέκτημα της αριθμητικής προσομοίωσης είναι ότι, σε αντίθεση με τα πειράματα, οι υπολογισμοί μπορούν συχνά να

πραγματοποιούνται γρήγορα και με χαμηλό κόστος. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι παρά την αβεβαιότητα σε σχέση με τα πειράματα, η αριθμητική προσομοίωση των διεργασιών σχηματισμού μίγματος αέρα-καυσίμου και καύσης μπορεί να δώσει πιο εκτενείς πληροφορίες αναφορικά με τη θερμορευστομηχανική, σε σχέση με τα πειράματα. Με χρήση προσομοίωσης, είναι δυνατό να υπολογιστεί η χρονική συμπεριφορά κάθε μεταβλητής ενδιαφέροντος σε οποιαδήποτε θέση μέσα στον υπολογιστικό όγκο ελέγχου. Αυτό επιτρέπει την απόκτηση λεπτομερούς γνώσης των σχετικών διεργασιών, και είναι προϋπόθεση για την περαιτέρω βελτίωσή τους.

Επιπλέον, η αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιείται για να ερευνηθούν διεργασίες που πραγματοποιούνται σε κλίμακες χρόνου και μήκους ή σε θέσεις που δεν είναι προσιτές, και συνεπώς δεν μπορούν ακόμη να μελετηθούν πειραματικά. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της έγχυσης σε μηχανή Diesel υψηλής πίεσης, η διάσπαση του ψεκασμού κοντά στο ακροφύσιο επηρεάζεται κυρίως από τις συνθήκες ροής εντός του εγχυτήρα. Εντούτοις, λόγω και των μικρών διαμέτρων των οπών (μικρότερες από 200  $\mu\text{m}$  στους μικρούς κινητήρες) και των υψηλών ταχυτήτων ροής (300 – 600 m/s), η μελέτη της τρισδιάστατης τυρβώδους ροής δεν είναι εφικτή με χρήση πειραματικών τεχνικών. Μια πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα λύση στο πρόβλημα θα ήταν να κατασκευαστεί ακροφύσιο από γυαλί με γεωμετρία πραγματικού μεγέθους, και να χρησιμοποιηθούν οπτικές τεχνικές μέτρησης λέιζερ. Επιπρόσθετα, έξω από το ακροφύσιο, στις πολύ πυκνές περιοχές του spray οι μετρήσεις της τρισδιάστατης δομής (μεγέθη σταγονιδίων, ταχύτητες κλπ) είναι ακόμη πιο δυσχερείς, επειδή η πυκνή περιοχή δεν επιτρέπει ικανοποιητική οπτική πρόσβαση του εσωτερικού πυρήνα της [3]. Σε αυτές και άλλες παρόμοιες περιπτώσεις, η χρήση αριθμητικής προσομοίωσης μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες, και να βοηθήσει στη βελτίωση και βελτιστοποίηση των διεργασιών ψεκασμού.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση των διεργασιών εντός του κυλίνδρου. Εάν απαιτούνται σύντομοι χρόνοι υπολογισμού, χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα “θερμοδυναμικά μοντέλα”. Πρόκειται για μοντέλα μηδενικής διάστασης, που δεν περιλαμβάνουν οποιαδήποτε εξάρτηση από τον χώρο, βασιζόμενα στη διατήρηση μάζας και ενέργειας. Στο πλαίσιο των θερμοδυναμικών μοντέλων, χρησιμοποιούνται συνήθως απλά επιμέρους μοντέλα, χωρίς μοντελοποίηση σχηματισμού ρύπων. Η δεύτερη κατηγορία μοντέλων περιλαμβάνει τα “φαινομενολογικά μοντέλα”, τα οποία χρησιμοποιούν περισσότερο λεπτομερή επιμέρους μοντέλα για την περιγραφή των σχετικών διεργασιών όπως ο σχηματισμός, η ανάφλεξη και η καύση των μιγμάτων. Τα φαινομενολογικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν με ακρίβεια μεγέθη όπως ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και οι συγκεντρώσεις των σχηματιζόμενων οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ). Η τρίτη κατηγορία μοντέλων περιλαμβάνει τα “μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής” (CFD), τα οποία

αποτελούν βασικό στοιχείο της παρούσας εργασίας. Στους κώδικες CFD, επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις της ροής, και χρησιμοποιούνται περισσότερο λεπτομερή επιμέρους μοντέλα, σε σχέση με τις άλλες δύο γενικές κατηγορίες μοντέλων. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση του σχηματισμού μίγματος αέρα-καυσίμου, οι επιμέρους διεργασίες έγχυσης, η διάσπαση και η εξάτμιση των ενιαίων υγρών σταγονιδίων, οι συγκρούσεις των σταγονιδίων, η πρόσκρουση των σταγονιδίων στα τοιχώματα κλπ διαμορφώνονται και υπολογίζονται για κάθε μεμονωμένο σταγονίδιο, εξαρτώμενο από τη θέση του μέσα στον τρισδιάστατο θάλαμο καύσης. Κατά συνέπεια, αυτή η κατηγορία μοντέλων είναι η πλέον δαπανηρή σε σχέση με την κατανάλωση υπολογιστικής ισχύος και χρόνου. Στο πλαίσιο της χρήσης ενός κώδικα CFD, η τυρβώδης τρισδιάστατη ροή προσομοιώνεται με επίλυση των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας, σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο μοντέλο τύρβης [3]. Οι κώδικες CFD είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για τη μελέτη της επίδρασης τρισδιάστατων γεωμετρικών παραμέτρων και φαινομένων στις διεργασίες εντός του κυλίνδρου, όπως η εγκάρσια συστρόφη, η γεωμετρία του θαλάμου καύσης, η θέση του ακροφυσίου εγχύσεως, η γωνία ψεκασμού, ο αριθμός των οπών εγχύσεως, κλπ.

Παρά το γεγονός ότι και οι τρεις προαναφερθείσες κατηγορίες μοντέλων είναι απαραίτητες και χρησιμοποιούνται σήμερα, η προσδοκώμενη περαιτέρω αύξηση της υπολογιστικής ισχύος θα δώσει ώθηση στη χρήση περισσότερο λεπτομερών μοντέλων CFD στο μέλλον. Το μεγαλύτερο μέρος της ερευνητικής εργασίας σήμερα, όσον αφορά στη μοντελοποίηση των διεργασιών εντός του κυλίνδρου, επικεντρώνεται στην ανάπτυξη επιμέρους φυσικών μοντέλων για εφαρμογές CFD [3].

Συνοψίζοντας την παρούσα κατάσταση, πρέπει να επισημανθεί ότι οι κώδικες CFD μπορούν να προσομοιώσουν τη θερμορυστομηχανική των μηχανών εσωτερικής καύσης με αρκετά καλή ακρίβεια. Η χρήση της υπολογιστικής ρυστοδυναμικής στις δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης των μηχανών είναι όχι μόνο χρήσιμη αλλά ήδη απαραίτητη. Σήμερα, ο σύνθετος στόχος της βελτιστοποίησης των διεργασιών σχηματισμού μίγματος αέρα-καυσίμου και καύσης μπορεί μόνο να επιτευχθεί με συνδυασμό της πειραματικής και της υπολογιστικής έρευνας [3].

### **1.3 Σχηματισμός και διάσπαση του spray**

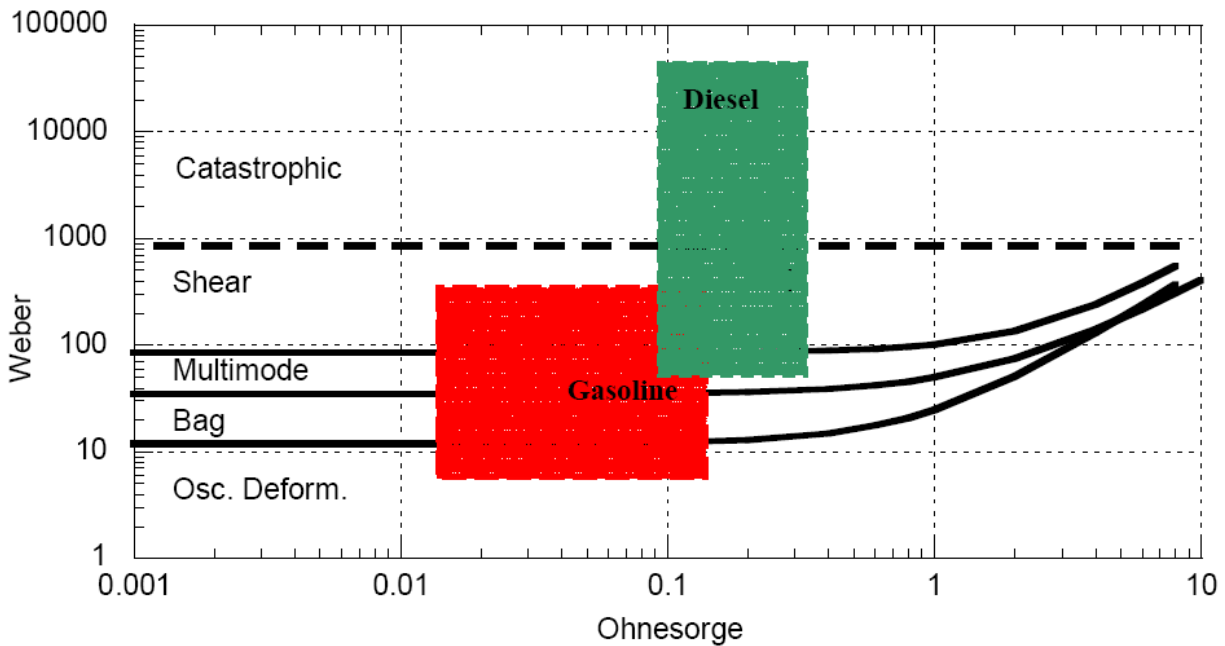
Στις μηχανές εσωτερικής καύσης η δομή του spray δημιουργείται με πολλούς τρόπους, ανάλογα με τη χρήση και τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Υπάρχουν τρεις βασικές διεργασίες που επηρεάζουν τη δημιουργία του spray: η εσωτερική ροή

στο ακροφύσιο, η πρωτογενής διάσπαση (διάσπαση της δέσμης καυσίμου σε σταγονίδια) και η δευτερογενής διάσπαση (διάσπαση των σταγονιδίων σε μικρότερα). Τα χαρακτηριστικά του spray εξαρτώνται από την εσωτερική γεωμετρία του ακροφυσίου, την πίεση εγχύσεως και τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης.

Η εσωτερική ροή στο ακροφύσιο περιλαμβάνει φαινόμενα αποκόλλησης και επανακόλλησης. Σε συνθήκες κοντά στο όριο σπηλαίωσης, τα φαινόμενα αυτά ενισχύουν έντονα τα επίπεδα τύρβης, και την αλληλεπίδραση αερίου/υγρού στην έξοδο του ακροφυσίου, η οποία στη συνέχεια επηρεάζει τη διάσπαση σε σταγονίδια. Επιπλέον, ο σχεδιασμός του ακροφυσίου έχει σημαντική επίδραση στη δομή της δέσμης του υγρού και τα χαρακτηριστικά της. Τα ακροφύσια εγχύσεως τα οποία χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μηχανών Diesel, παρόλο που είναι πολλαπλών οπών, οδηγούν σε πυκνές δομές spray πλήρους κώνου (solid-cone sprays), οδηγώντας στη δημιουργία στρωματοποιημένης πλήρωσης. Από την άλλη μεριά, εγχυτήρες εγκάρσιας συστροφής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις μηχανές άμεσης έγχυσης με σπινθηριστή (Direct-Injection Spark-Ignition, DISI), οδηγούν σε περισσότερο διασκορπισμένο ψεκασμό, κατάλληλο για ομοιογενή ή λιγότερο στρωματοποιημένη πλήρωση [4].

Η πρωτογενής διάσπαση της δέσμης καυσίμου σε σταγονίδια εξαρτάται άμεσα από την εσωτερική γεωμετρία του ακροφυσίου και τα εσωτερικά φαινόμενα ροής, τα οποία καθορίζουν τη δομή της δέσμης που δημιουργείται. Λόγω των αεροδυναμικών δυνάμεων από την αέρια φάση, η δομή της υγρής δέσμης αλληλεπιδρά με το αέριο περιβάλλον, με αποτέλεσμα αρχικά την αποκοπή μεγάλων τμημάτων υγρού, τα οποία στη συνέχεια διασπώνται σε σφαιρικά σταγονίδια [4].

Με την ολοκλήρωση της πρωτογενούς διάσπασης (δημιουργία σφαιρικών σωματιδίων), αρχίζει η φάση της δευτερογενούς διάσπασης, οι μηχανισμοί της οποίας είναι κοινοί για κάθε τύπο spray. Η δευτερογενής διάσπαση (διάσπαση των σταγονιδίων σε μικρότερα) εξαρτάται από τα αρχικά μεγέθη των σταγονιδίων, τις ταχύτητές τους και τις θερμοφυσικές ιδιότητες της υγρής και της αέριας φάσης. Τα παραπάνω μεγέθη συνδυάζονται στους αριθμούς Weber και Ohnesorge, όπως θα εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 2. Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν τον μηχανισμό διάσπασης με τον οποίο τα σταγονίδια θα διασπαστούν περαιτέρω. Ακόμα κι αν σε ένα spray ένας ορισμένος μηχανισμός είναι κυρίαρχος, είναι πιθανό και άλλοι μηχανισμοί να συμβάλλουν στη δευτερογενή διάσπαση, συνεπώς όλοι πρέπει να μοντελοποιηθούν επιτυχώς [4]. Στο σχήμα 1.1, παρουσιάζονται οι περιοχές των τεσσάρων μηχανισμών δευτερογενούς διάσπασης, συναρτήσει των αριθμών Weber και Ohnesorge. Περαιτέρω ανάλυση δίνεται στο Κεφάλαιο 2. Το γεγονός ότι οι μηχανισμοί δευτερογενούς διάσπασης είναι ανεξάρτητοι από την πρωτογενή διάσπαση προσφέρει ευελιξία στην ανάπτυξη των μοντέλων δευτερογενούς διάσπασης.



**Σχήμα 1.1.** Περιοχές των τεσσάρων μηχανισμών δευτερογενούς διάσπασης, συναρτήσεως των αριθμών Weber και Ohnesorge [4].

#### 1.4 Μελλοντικές απαιτήσεις

Η ικανοποίηση των περιορισμών εκπομπής ρύπων θα είναι αυξανόμενης σπουδαιότητας στο μέλλον, και αναμένεται να γίνει ο κύριος στόχος της μελλοντικής ανάπτυξης των μηχανών. Η ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου (fuel cells), η οποία προτείνεται συχνά ως πιθανή μελλοντική εναλλακτική λύση της μηχανής εσωτερικής καύσης, θα διαρκέσει τουλάχιστον για τις επόμενες δύο ή τρεις δεκαετίες. Κατά συνέπεια, η μηχανή εσωτερικής καύσης θα διατηρήσει την κυρίαρχη θέση της, και θα βελτιώνεται συνεχώς προκειμένου να ικανοποιηθούν οι μελλοντικές απαιτήσεις [3].

Επειδή ο συστηματικός έλεγχος του σχηματισμού του μίγματος αέρα-καυσίμου με σύγχρονα συστήματα εγχύσεως υψηλών πιέσεων επιτρέπει σημαντικές βελτιώσεις στη διεργασία της καύσης, με απόρροια τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπεμπόμενων ρύπων, η βελτιστοποίηση της έγχυσης του καυσίμου καθίσταται ολοένα σημαντικότερη. Έτσι, η ανάπτυξη και βελτίωση ιδιαίτερα ευέλικτων συστημάτων άμεσης έγχυσης (DI) για κινητήρες Diesel, καθώς επίσης και για βενζινοκινητήρες, αποτελεί βασικό αντικείμενο έρευνας.



Ένα σημαντικό τμήμα της σύγχρονης έρευνας περιλαμβάνει την ανάπτυξη μοντέλων CFD για την περιγραφή της δημιουργίας του spray και του μίγματος αέρα-καυσίμου στην περίπτωση της άμεσης έγχυσης της βενζίνης και του καυσίμου Diesel. Εν προκειμένω, απαιτούνται μοντέλα που περιγράφουν τις σχετικές επιμέρους διεργασίες, καθώς επίσης τις αλληλεπιδράσεις και τις αλληλεξαρτήσεις τους. Συνήθως, τα εξαγόμενα αποτελέσματα ενός επιμέρους μοντέλου χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για την επόμενη διεργασία. Για αυτόν τον λόγο, είναι απολύτως απαραίτητη η λεπτομερής και η ακριβής περιγραφή των σχετικών μηχανισμών και διεργασιών, προκειμένου να επιτευχθεί ένα υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας πρόβλεψης στο τελικό αποτέλεσμα. Παραδείγματος χάριν, η λεπτομερής και η ακριβής περιγραφή της διάσπασης του υγρού καυσίμου σε εκατομμύρια μικρά σταγονίδια στον θάλαμο καύσης είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον σωστό υπολογισμό των επόμενων διεργασιών όπως η ατμοποίηση, η ανάφλεξη, η καύση, και ο σχηματισμός ρύπων. Επειδή, στην περίπτωση υψηλής πίεσης έγχυσης, οι συνθήκες ροής εντός των εγχυτήρων (π.χ. τύρβη, σπηλαιώση) είναι αυξημένης σπουδαιότητας για τη διάσπαση του spray, τα προηγμένα μοντέλα spray πρέπει να λαμβάνουν επίσης υπόψη και την επίδραση του συστήματος εγχύσεως.

Συνοψίζοντας, η σχεδίαση ισχυρότερων, οικονομικότερης κατανάλωσης καυσίμου, και φιλικών προς το περιβάλλον μηχανών εσωτερικής καύσης είναι σήμερα στο επίκεντρο της έρευνας των κατασκευαστών μηχανών. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων της αγοράς και των όλο και περισσότερο αυστηρών ορίων ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και εκπεμπόμενων ρύπων, οι κατασκευαστές μηχανών αντιμετωπίζουν την πρόκληση της σχεδίασης μηχανών που πληρούν ή υπερπληρούν, τους εν λόγω κανονισμούς και προσδοκίες [4]. Αναφορικά με τη χρήση προσομοίωσης, η προσπάθεια υποστήριξης της διαδικασίας εξέλιξης των κινητήρων εστιάζεται κυρίως στην ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων CFD, καθώς και στην υιοθέτηση νέων τρόπων χρήσης τους (π.χ. σύζευξη με λογισμικά βελτιστοποίησης), ώστε τα εν λόγω μοντέλα να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό βέλτιστων συστημάτων έγχυσης, καθώς και για την ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών έγχυσης. Όλοι αυτοί οι στόχοι πρόκειται να αποτελέσουν βασικό αντικείμενο έρευνας στο εγγύς μέλλον.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη του spray καυσίμου για αντιπροσωπευτικές συνθήκες μεγάλων ναυτικών κινητήρων Diesel. Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των φαινομένων έγχυσης καυσίμου (Κεφάλαιο 2). Η υπολογιστική μελέτη φαινομένων έγχυσης αναφέρεται στη διάταξη του θαλάμου καύσης σταθερού όγκου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος HERCULES, της οποίας γίνεται λεπτομερής περιγραφή στο Κεφάλαιο 3. Η προσομοίωση των φαινομένων έγχυσης πραγματοποιείται με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Star-CD,

και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται και αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 4. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# Έγχυση καυσίμου στους κινητήρες Diesel

---

### 2.1 Συστήματα έγχυσης καυσίμου

#### 2.1.1 Γενικά

Ο στόχος του συστήματος έγχυσης είναι να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα διάσπασης του καυσίμου, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ικανοποιητική ατμοποίηση σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και η ικανοποιητική διεύθυνση του spray, ώστε να πληρωθεί ικανοποιητικά ένα μεγάλο τμήμα του θαλάμου καύσης [3]. Το σύστημα έγχυσης καυσίμου πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει την επιθυμητή μάζα καυσίμου, ανάλογα με την ταχύτητα και το φορτίο της μηχανής, με κατάλληλο χρονικό προφίλ.

Συνήθως, μία τροφοδοτική αντλία αντλεί το καύσιμο από τη δεξαμενή καυσίμου, και το μεταφέρει διαμέσου ενός φίλτρου στην αντλία υψηλής πίεσης. Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής της μηχανής και το μέγεθός της, δημιουργούνται πιέσεις μεταξύ 1000 και 2000 bar [3]. Η αντλία υψηλής πίεσης μεταφέρει το καύσιμο μέσω σωληνώσεων υψηλής πίεσης, στα ακροφύσια εγχύσεως, που βρίσκονται στην περιοχή της κυλινδροκεφαλής. Το επιπλέον καύσιμο μεταφέρεται πίσω στη δεξαμενή καυσίμου.

Η έγχυση του καυσίμου αρχίζει προς το τέλος της φάσης συμπίεσης, ώστε οι συνθήκες του αέρα πλήρωσης να είναι ευνοϊκές για την έναυση και διατήρηση της καύσης.

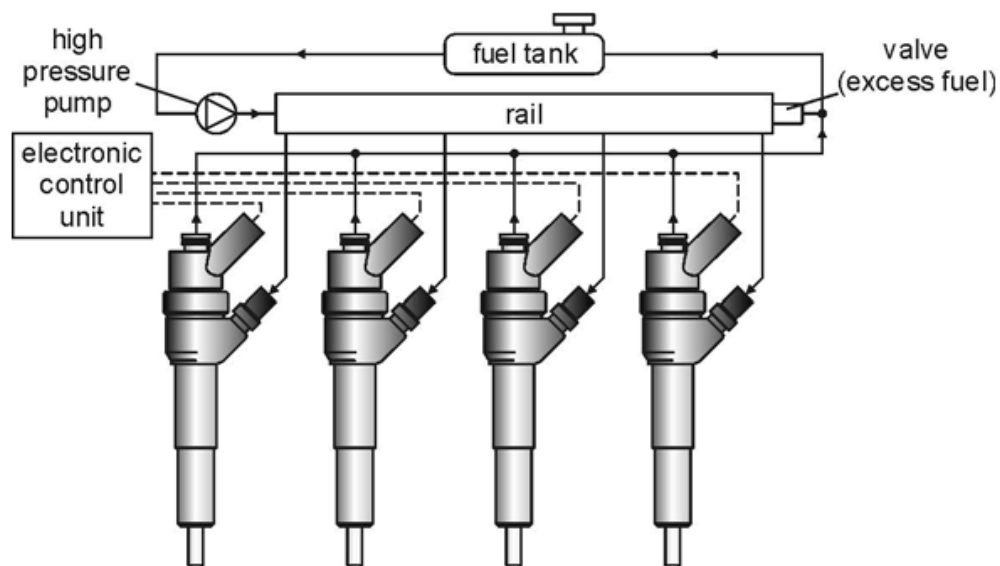
Οι κύριες απαιτήσεις για το σύστημα έγχυσης είναι [5]:

- ακριβής έλεγχος της μάζας καυσίμου που εγχύεται σε συνάρτηση με την απαιτούμενη ισχύ
- ακριβής χρονικά στιγμή έναρξης της έγχυσης, ελεγχόμενος ρυθμός έγχυσης και απότομη και πλήρης διακοπή χωρίς επίσταξη

- λεπτός διασκορπισμός και ατμοποίηση του καυσίμου σε όλη την περίοδο της έγχυσης εντός του θαλάμου καύσης. Αποφυγή πρόσκρουσης της δέσμης καυσίμου στα τοιχώματα (εκτός αν προβλέπεται στη σχεδίαση του κινητήρα).

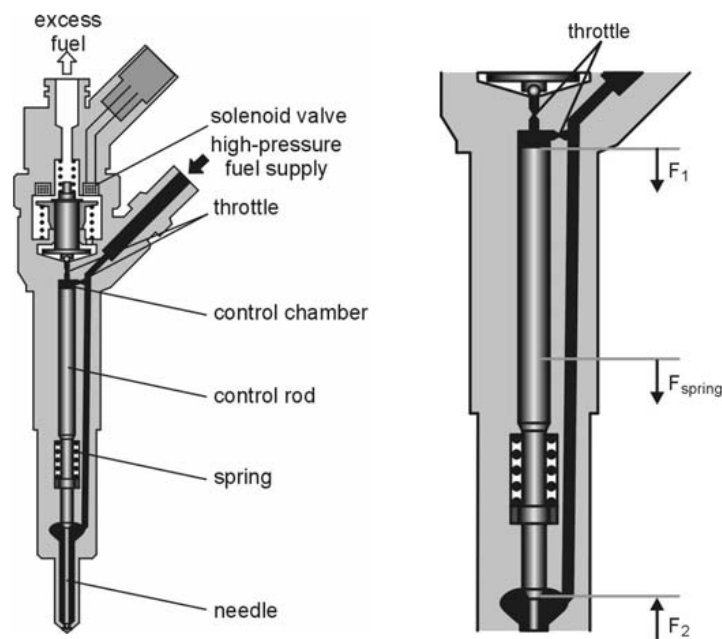
### 2.1.2 Σύστημα έγχυσης κοινού συλλέκτη (common rail)

Στις μέρες μας, υπάρχουν δύο κύριες ομάδες συστημάτων έγχυσης υψηλής πίεσης. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν τα αποκαλούμενα συστήματα εγχύσεως κοινού συλλέκτη (common rail injection systems), σχήμα 2.1. Στα συστήματα κοινού συλλέκτη, η δημιουργία υψηλής πίεσης και η διαδικασία της έγχυσης είναι ανεξάρτητες, ενώ η πίεση έγχυσης δεν εξαρτάται από την ταχύτητα της μηχανής [3]. Το γεγονός αυτό επιτρέπει μια σημαντικά μεγαλύτερη ευελιξία έγχυσης και σχηματισμού μίγματος σε σύγκριση με τα συστήματα εγχύσεως που χρησιμοποιούν τον εκκεντροφόρο άξονα. Το υπό υψηλή πίεση καύσιμο αποθηκεύεται στον κοινό συλλέκτη, ο οποίος συνήθως είναι ένας κλειστός αγωγός μεγάλου πάχους τοιχώματος. Μια αντλία υψηλής πίεσης τροφοδοτεί συνεχώς τον κοινό συλλέκτη. Ένας αισθητήρας πίεσης ρυθμίζει την επιθυμητή πίεση του συλλέκτη μέσω μιας πρόσθετης βαλβίδας, η οποία εξασφαλίζει τη ροή του επιπλέον καυσίμου πίσω στη δεξαμενή καυσίμου [3]. Ως εκ τούτου, η πίεση στον κοινό συλλέκτη δεν εξαρτάται από την ταχύτητα της μηχανής. Αγωγοί μικρού μήκους συνδέουν τον κοινό συλλέκτη με τους εγχυτήρες.



**Σχήμα 2.1.** Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος εγχύσεως κοινού συλλέκτη (common rail) [3].

Ο όγκος του κοινού συλλέκτη είναι αρκετά μεγάλος ώστε να αποτρέπονται οι διακυμάνσεις πίεσης λόγω της έγχυσης. Ο χρονισμός και η διάρκεια της εγχύσεως ελέγχονται από σωληνοειδείς βαλβίδες, και οι αντίστοιχες διαδικασίες είναι ανεξάρτητες από τη δημιουργία υψηλής πίεσης. Ως εκ τούτου, το σύστημα εγχύσεως κοινού συλλέκτη είναι ικανό να διατηρεί την πίεση εγχύσεως στο επιθυμητό επίπεδο, και να εκτελεί προ-εγχύσεις (μείωση του θορύβου και των οξειδίων του αζώτου), κύριες εγχύσεις, και μετα-εγχύσεις (μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης) με μεταβλητή διάρκεια και χρονισμό, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κάθε σημείου λειτουργίας [3].



**Σχήμα 2.2.** Τυπικός εγχυτήρας σε μηχανή με σύστημα κοινού συλλέκτη (common rail injector) [3].

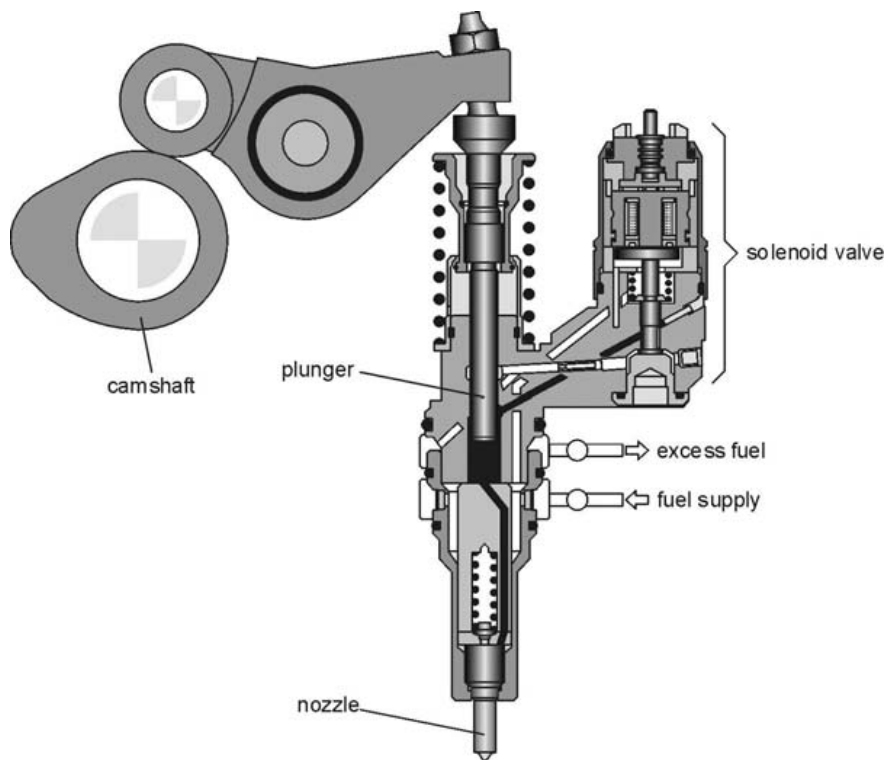
Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει έναν τυπικό εγχυτήρα σε μηχανή με σύστημα κοινού συλλέκτη. Η μετακίνηση της βελόνας (needle) ελέγχεται από μια σωληνοειδή βαλβίδα (solenoid valve). Στο σχήμα 2.2, η βελόνα είναι κλειστή. Η συνισταμένη δύναμη της δύναμης του ελατηρίου (spring)  $F_{\text{spring}}$  και της υδραυλικής δύναμης  $F_1$  του καυσίμου υψηλής πίεσης που ασκούνται στη ράβδο ελέγχου (control rod) είναι μεγαλύτερη από την υδραυλική δύναμη  $F_2$  στην κυκλική περιοχή του δακτυλίου, και η βελόνα παραμένει κλειστή. Μόλις η σωληνοειδής βαλβίδα (solenoid valve) ανοίξει, μειώνεται η πίεση στον θάλαμο ελέγχου (control chamber), πάνω από τη ράβδο ελέγχου, και η βελόνα αρχίζει να ανοίγει, επειδή η αποφρακτική βαλβίδα (throttle) εισαγωγής, που συνδέει τον θάλαμο ελέγχου με την παροχή καυσίμου

υψηλής πίεσης (high-pressure fuel supply) είναι μικρότερη από την αποφρακτική βαλβίδα εξαγωγής. Το επιπλέον καύσιμο (excess fuel) απομακρύνεται μέσω της αποφρακτικής βαλβίδας εξαγωγής, και στη συνέχεια καταλήγει πίσω στη δεξαμενή καυσίμου. Ως εκ τούτου, η κίνηση της βελόνας είναι μία υδραυλικά ελεγχόμενη διαδικασία. Η ταχύτητα με την οποία ανοίγει η βελόνα καθορίζεται από την αναλογία μεγέθους των δύο αποφρακτικών βαλβίδων. Η διαδικασία κατά την οποία η βελόνα κλείνει, ξεκινά με το κλείσιμο της σωληνοειδούς βαλβίδας. Η πίεση στον θάλαμο ελέγχου αυξάνεται, και η ράβδος ελέγχου κλείνει τη βελόνα. Η ταχύτητα με την οποία κλείνει η βελόνα επηρεάζεται και αυτή από το μέγεθος της αποφρακτικής βαλβίδας [3].

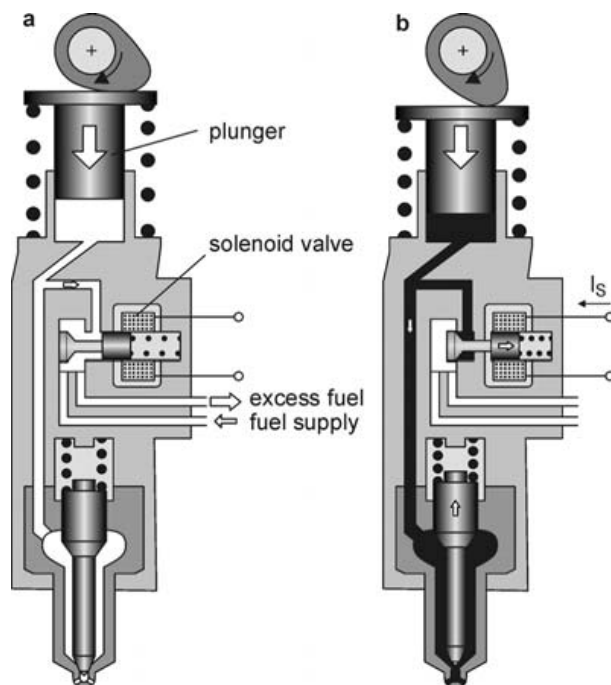
### **2.1.3 Σύστημα έγχυσης μονάδας εγχυτήρα (unit injector)**

Η δεύτερη κύρια ομάδα συστημάτων έγχυσης υψηλής πίεσης είναι εκείνη στην οποία η δημιουργία υψηλής πίεσης έγχυσης και η ίδια η έγχυση εμφανίζονται συγχρόνως. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν με χρήση ενός εκκεντροφόρου άξονα, ο οποίος συνδέεται μηχανικά με τη μηχανή. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι ότι η μονάδα ενός εγχυτήρα περιλαμβάνει (εμβολοφόρο) αντλία, ελεγχόμενη υδραυλικά, και ανεξάρτητη από μηχανική ζεύξη με τον κινητήρα, η οποία παρέχει μεταβαλλόμενη πίεση εγχύσεως [6]. Έτσι, υψηλή πίεση είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια διαστήματος μικρής διαφοράς γωνίας στροφάλου.

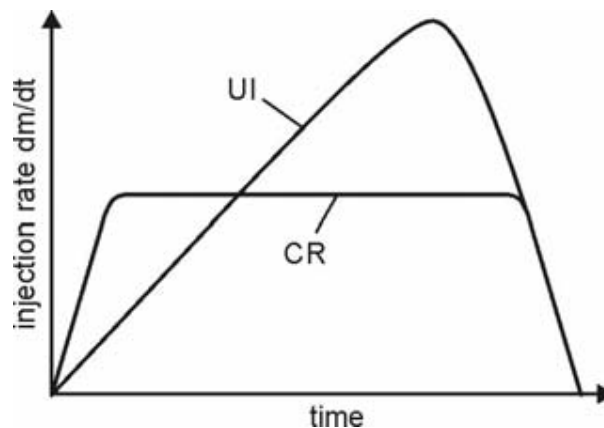
Στην περίπτωση του αποκαλούμενου συστήματος έγχυσης μονάδας εγχυτήρα (Unit Injector System, UIS), η αντλία και το ακροφύσιο εγχύσεως συνδυάζονται σε μια ενιαία μονάδα, σχήμα 2.3. Κάθε κύλινδρος της μηχανής είναι εξοπλισμένος με μια τέτοια μονάδα. Η έλλειψη αγωγών υψηλών πιέσεων μεταξύ της αντλίας και του εγχυτήρα επιτρέπει σημαντικά υψηλότερες μέγιστες πιέσεις εγχύσεως (περίπου 2000 bar και υψηλότερες) [3]. Η μορφή του εκκέντρου καθορίζει την κίνηση του εμβόλου, και έτσι τη δημιουργία της πίεσης ως συνάρτηση της γωνίας στροφάλου. Το ελατήριο στο πάνω μέρος του εγχυτήρα πιέζει το έμβολο ενάντια στο ζυγό της βαλβίδας, και ο ζυγός της βαλβίδας ενάντια στο έκκεντρο, βλ. σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3. Τυπικός εγχυτήρας συστήματος unit injector [3].



Σχήμα 2.4. Σύστημα ελέγχου ενός unit injector [3].



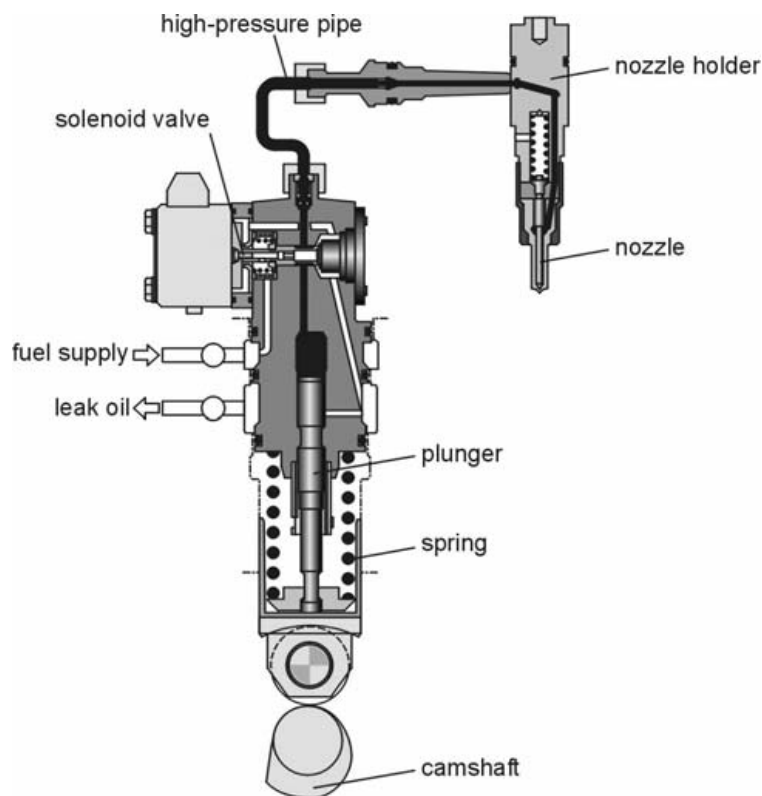
**Σχήμα 2.5.** Τυπικά προφίλ έγχυσης συστημάτων unit injector (UI) και common rail (CR) [3].

Το σχήμα 2.4a παρουσιάζει μια σχηματική απεικόνιση του εγχυτήρα συστήματος unit injection με κλειστή βελόνα. Με το άνοιγμα της σωληνοειδούς βαλβίδας, και με το έμβολο ωθούμενο προς τα κάτω, το επιπλέον καύσιμο μεταφέρεται στη γραμμή καθαρισμού. Ανάλογα με την επιθυμητή έναρξη της έγχυσης, η μονάδα ελέγχου της μηχανής κλείνει τη σωληνοειδή βαλβίδα, και το έμβολο συμπιέζει το καύσιμο. Όταν η πίεση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να ανυψώσει την πιεζόμενη από το ελατήριο βελόνα, η έγχυση ξεκινά, σχήμα 2.4b. Η πίεση έγχυσης αυξάνεται έντονα κατά τη διάρκεια της έγχυσης, με συνέπεια να παρουσιάζεται τριγωνικής μορφής προφίλ έγχυσης, σχήμα 2.5. Σε αντίθεση με το σύστημα κοινού συλλέκτη, στο οποίο η μέγιστη πίεση εγχύσεως παρουσιάζεται ήδη στην έναρξη της έγχυσης (με συνέπεια ένα ορθογωνικής μορφής προφίλ εγχύσεως), η διάσπαση σε σταγονίδια του προ-εγχυμένου spray είναι αρκετά πιο αργή, και εντείνεται κατά τη διάρκεια της έγχυσης [3]. Στο τέλος της έγχυσης, η σωληνοειδής βαλβίδα ανοίγει εκ νέου, το επιπλέον καύσιμο οδηγείται στην γραμμή καθαρισμού, και η πίεση εγχύσεως μειώνεται. Μόλις το ελατήριο είναι σε θέση να κλείσει τη βελόνα, η έγχυση σταματά. Τέλος, το έμβολο κινείται προς τα πάνω, και ο θάλαμος κάτω από το έμβολο πληρώνεται εκ νέου με καύσιμο από την χαμηλής πίεσης τροφοδοσία.

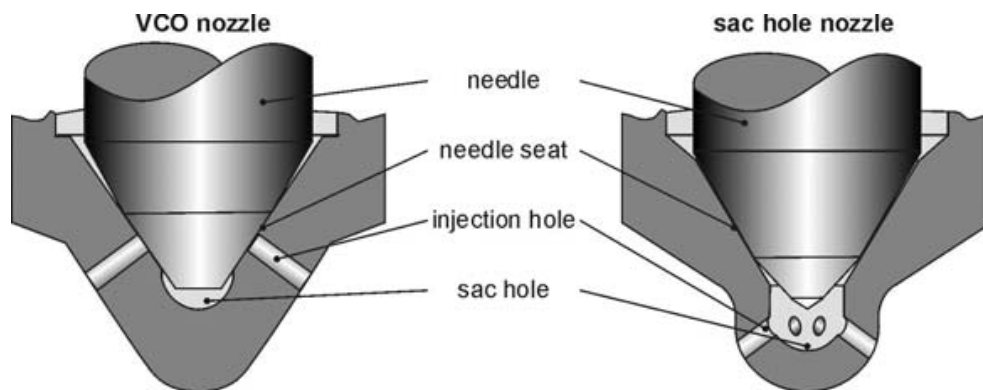
Επειδή η κίνηση του εμβόλου συνδέεται άμεσα με τη μηχανή, η μέγιστη πίεση εγχύσεως αυξάνεται με την ταχύτητα της μηχανής. Σε υψηλές ταχύτητες μηχανής, ο όγκος καυσίμου κάτω από το έμβολο ωθείται πολύ γρηγορότερα προς το ακροφύσιο, με αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερες πιέσεις εγχύσεως από ό,τι στην περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων της μηχανής. Επιπλέον, οι υψηλές πιέσεις εγχύσεως δεν είναι διαθέσιμες σε οποιαδήποτε γωνία στροφάλου, δυσχεραίνοντας τη δημιουργία προ-εγχύσεων και μετα-εγχύσεων [3].



Είναι προφανές ότι, λόγω της παραγωγής μεταβαλλόμενης πίεσης, η ευελιξία των συστημάτων υψηλών πιέσεων εγχύσεως unit injector είναι περιορισμένη, σε σύγκριση με τα συστήματα κοινού συλλέκτη. Εντούτοις, ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η αύξηση της πίεσης εγχύσεως κατά τη διάρκεια της έγχυσης, και οι πολύ υψηλές μέγιστες πιέσεις εγχύσεως στο τέλος της έγχυσης, οι οποίες δεν μπορούν να επιτευχθούν από τα σημερινά συστήματα κοινού συλλέκτη. Επίσης, τα συστήματα εγχύσεως unit injector είναι γνωστά για την πολύ θετική επίδρασή τους στον σχηματισμό μίγματος, την καύση και τη μείωση των ρύπων. Ωστόσο, η ανεπαρκής διάσπαση σε σταγονίδια λόγω των χαμηλών πιέσεων εγχύσεως στην περίπτωση των προ-εγχύσεων, προκαλεί προβλήματα και αποτελεί μειονέκτημα για τα εν λόγω συστήματα [3].



Σχήμα 2.6. Σύστημα unit pump [3].



**Σχήμα 2.7.** Τύποι ακροφυσίων [3].

Η λειτουργία του αποκαλούμενου συστήματος μονάδας αντλίας (Unit Pump System, UPS) είναι σχεδόν ίδια με αυτή του συστήματος unit injector, και παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Εντούτοις, η αντλία και το ακροφύσιο δεν συνδυάζονται σε μία μονάδα. Η αντλία υψηλής πίεσης ελέγχεται και πάλι από έναν εκκεντροφόρο άξονα, και έτσι συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα της μηχανής, σχήμα 2.6. Το ακροφύσιο εγχύσεως βρίσκεται μέσα στην υποδοχή ακροφυσίου (nozzle holder) στην κυλινδροκεφαλή, και συνδέεται με την αντλία μέσω ενός αγωγού υψηλής πίεσης. Ένα πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι η αντλία και το ακροφύσιο δεν απαιτείται να εγκατασταθούν στο ίδιο μέρος. Αυτό μειώνει το μέγεθος των επιμέρους συστημάτων που πρέπει να ενσωματωθούν στην κυλινδροκεφαλή, και απλοποιεί τη συναρμολόγηση του συστήματος εγχύσεως. Οι μέγιστες εφικτές πιέσεις εγχύσεως του UPS είναι μικρότερες από εκείνες του UIS [3].

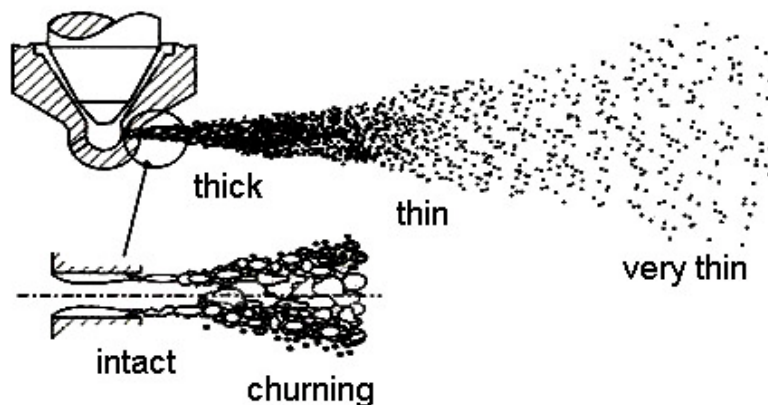
Το πιο σημαντικό τμήμα του συστήματος έγχυσης είναι το ακροφύσιο. Τα καύσιμα εγχύονται μέσω των οπών του ακροφυσίου στον θάλαμο καύσης. Ο αριθμός και το μέγεθος των οπών εξαρτάται από τη μάζα του καυσίμου που πρέπει να εγχυθεί, τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης, και την κίνηση του αέρα (εγκάρσια συστολή) μέσα στον κύλινδρο. Σε μηχανές Diesel χρησιμοποιούνται δύο κύριοι τύποι ακροφυσίων, το ακροφύσιο οπής θύλακα και το ακροφύσιο καλυμμένης οπής με βαλβίδα (Valve Covered Orifice, VCO), σχήμα 2.7. Σε σχέση με το ακροφύσιο VCO, το ακροφύσιο οπής θύλακα έχει έναν πρόσθετο όγκο κάτω από την έδρα της βελόνας (needle seat). Λόγω της αυξημένης απόστασης μεταξύ της έδρας της βελόνας και της οπής έγχυσης (injection hole), η μετατόπιση της αιχμής της βελόνας δεν επηρεάζει τη ροή διαμέσου των διαφορετικών οπών, και έτσι παράγεται γενικά πολύ συμμετρικό spray. Ωστόσο, ο μεγάλος όγκος υγρού μεταξύ της έδρας της βελόνας και του θαλάμου καύσης προκαλεί προβλήματα αναφορικά με τις αυξημένες εκπομπές υδρογονανθράκων. Συνεπώς, είναι σημαντικό να διατηρηθεί ο

όγκος αυτός κατά το δυνατόν μικρός, ειδάλλως τμήμα του καυσίμου μπορεί να εισέλθει στον κύλινδρο μετά το τέλος της έγχυσης. Αυτό το καύσιμο δεν είναι συνήθως καλά διασκορπισμένο, και αυξάνει τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης. Παρατεταμένη εξάτμιση του καυσίμου μέσα στον θύλακα της οπής (βλ. σχήμα 2.7) αυξάνει τις εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων της μηχανής. Από αυτήν την άποψη, το ακροφύσιο VCO κρίνεται ανώτερο από το ακροφύσιο οπής θύλακα. Εντούτοις, είναι αναγκαίες ανοχές υψηλότερης ακρίβειας προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε αξονική εκκεντρότητα της άκρης της βελόνας, η οποία θα είχε ως άμεσο αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη μεταβολή της πλήρωσης μέσω των διαφορετικών οπών του ακροφυσίου, και τη δυσμενή επίδραση στην εν γένει ποιότητα του spray [3].

## 2.2 Διεργασίες spray

### 2.2.1 Γενικά

Μια τυπική διφασική ροή από έναν εγχυτήρα υψηλής πίεσης μπορεί να διαιρεθεί σε διαφορετικές περιοχές, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.8. Πολύ κοντά στο στόμιο του ακροφυσίου μπορεί να προσδιοριστεί ο άθικτος πυρήνας (intact core) της υγρής φάσης. Ο πυρήνας αυτός αποσυντίθεται ταχέως σε επιμέρους πυρήνες (churning flow) και περαιτέρω σε σταγονίδια, αλλά η υγρή φάση εξακολουθεί να καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος του όγκου της δομής του spray. Λόγω της πυκνότητάς της, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα της αέριας φάσης, η συμβολή της υγρής φάσης στη συνολική μάζα είναι ακόμα μεγαλύτερη. Αυτή η περιοχή του spray αναφέρεται γενικά ως παχειά (thick) ή πυκνή (dense) περιοχή του spray [1].



**Σχήμα 2.8.** Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών περιοχών της ροής spray [1].

Λόγω της κωνικής μορφής του spray και της ατμοποίησης των σταγονιδίων, το μέσο διάστημα μεταξύ των σταγονιδίων αυξάνεται περαιτέρω στην περιοχή κατάντι του ακροφυσίου, και συνεπώς αυξάνεται το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνεται από την αέρια φάση. Εντούτοις, λόγω της αναλογίας πυκνότητας υγρού και αερίου, το ποσοστό μάζας της υγρής φάσης εξακολουθεί να είναι σημαντικό. Αυτή η ενδιάμεση περιοχή του spray ονομάζεται λεπτή (thin). Τέλος, η πολύ λεπτή (very thin) ή αραιή (dilute) περιοχή του spray χαρακτηρίζεται και από ποσοστά όγκου και μάζας της υγρής φάσης τα οποία είναι αμελητέα έναντι αυτών της αέριας φάσης [1].

Η συμπεριφορά των σταγονιδίων μέσα στις διαφορετικές περιοχές ενός spray είναι αρκετά διαφορετική. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σταγονιδίων όπως η σύγκρουση και η συνένωσή τους μπορούν να είναι σημαντικές κοντά στο στόμιο του ακροφυσίου. Επιπλέον, όταν το διάστημα μεταξύ των σταγονιδίων είναι μικρό, το οριακό στρώμα γύρω από ένα σταγονίδιο μπορεί να επηρεαστεί από ένα παρακείμενο σταγονίδιο. Συνεπώς, προκειμένου να υπολογιστούν οι ενεργειακές διαδικασίες μεταξύ του υγρού και του αερίου, δεν μπορεί να θεωρείται ότι υπάρχει μια αδιατάρακτη αέρια φάση γύρω από το σταγονίδιο. Από την άλλη πλευρά, στην αραιή περιοχή του spray η συμπεριφορά των σταγονιδίων μπορεί να υπολογιστεί με καλή ακρίβεια με βάση τις σχέσεις για ένα μεμονωμένο σταγονίδιο. Επίσης, μεταξύ των σταγονιδίων και της αέριας φάσης υπάρχει μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας [1].

Στην ενδιάμεση λεπτή περιοχή του spray, η υγρή φάση εξακολουθεί να αποτελεί μια εμφανή ποσότητα μάζας, όπως αναφέρεται παραπάνω. Κατά συνέπεια, υπάρχει έντονη μεταφορά ορμής από τα σταγονίδια προς την αέρια φάση, η οποία έχει επιπτώσεις στη συνέχεια σε άλλα σταγονίδια. Μια απόρροια είναι οι μειωμένες δυνάμεις αντίστασης στα σταγονίδια που βρίσκονται αμέσως μετά την άκρη του spray. Τα συγκεκριμένα σταγονίδια επιβραδύνονται από το αέριο λιγότερο γρήγορα, και επομένως μπορούν να προσπεράσουν τα σταγονίδια που έχουν εγχυθεί σε ένα προηγούμενο χρονικό σημείο [1].

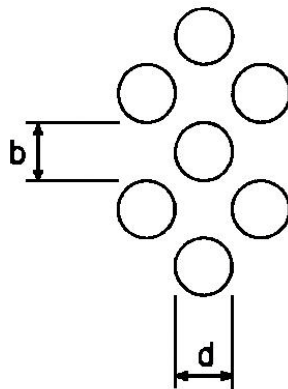
Ενώ η ποιοτική διαφορά στη συμπεριφορά της διφασικής ροής είναι ευκρινής μεταξύ των διαφορετικών περιοχών του spray, οι μεταβάσεις μεταξύ των περιοχών αυτών είναι συνεχείς, και οι προσδιορισμοί τους κάπως αυθαίρετοι. Τυπικά, οι μεταβάσεις καθορίζονται σε σχέση με το κενό τμήμα όγκου που ορίζεται ως

$$\theta = 1 - \iiint f \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot dr \cdot d\vec{u} \cdot dT_d \quad (2.1)$$

όπου  $f$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του αριθμού των σταγονιδίων ανά μονάδα όγκου του spray [1]. Ο αριθμός  $f$  στον χρόνο  $t$ , εξαρτάται από την ακτίνα  $r$  των σταγονιδίων, από τη θερμοκρασία  $T_d$  των σταγονιδίων, από τη θέση  $\vec{x}$

(τρεις συντεταγμένες) των σταγονιδίων, καθώς επίσης και από τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας  $\vec{u}$  των σταγονιδίων.

Για μια κανονική διάταξη σφαιρικών σταγονιδίων με κενό διάστημα ίσο προς τη διάμετρό τους, βλ. σχήμα 2.9, μπορεί να αποδειχθεί ότι το τμήμα του κενού όγκου είναι  $\theta \approx 0.92$ . Συνεπώς, συχνά γίνεται η υπόθεση ότι μια περιοχή του spray θεωρείται ως παχειά εάν το κενό μέρος όγκου είναι μικρότερο από περίπου 0.9. Ο O'Rourke [7] μελέτησε επίσης μια ενδιάμεση περιοχή του spray μεταξύ του άθικτου πυρήνα και της παχειάς περιοχής του spray, καλούμενη ροή churning, η οποία αντιστοιχεί σε τιμές κενού όγκου μικρότερες από 0.5. Η προσέγγιση του O'Rourke βασίζεται στο ότι, για ποσοστό όγκου της υγρής φάσης μεγαλύτερο από 50 τοις εκατό, το υγρό δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί ότι διασκορπίστηκε πλήρως μέσα σε μία συνεχή φάση αερίου, και επομένως ένα διαφορετικό σύνολο εξισώσεων είναι απαραίτητο για να περιγράψει το πρόβλημα. Εντούτοις, υπάρχουν ακόμα αμφιβολίες για την καταλληλότητα των εξισώσεων του O'Rourke. Έτσι, η περιοχή αυτή του spray, η οποία υφίσταται μόνο για έναν εξαιρετικά μικρό όγκο κοντά στο στόμιο του ακροφυσίου, συχνά αγνοείται [1].



**Σχήμα 2.9.** Διάταξη σταγονιδίων με την μεταξύ τους απόσταση ίση με τη διάμετρό τους ( $b=d$ ) [1].

### 2.2.2 Ροή εντός του ακροφυσίου και εμφάνιση φαινομένων σπηλαιώσης

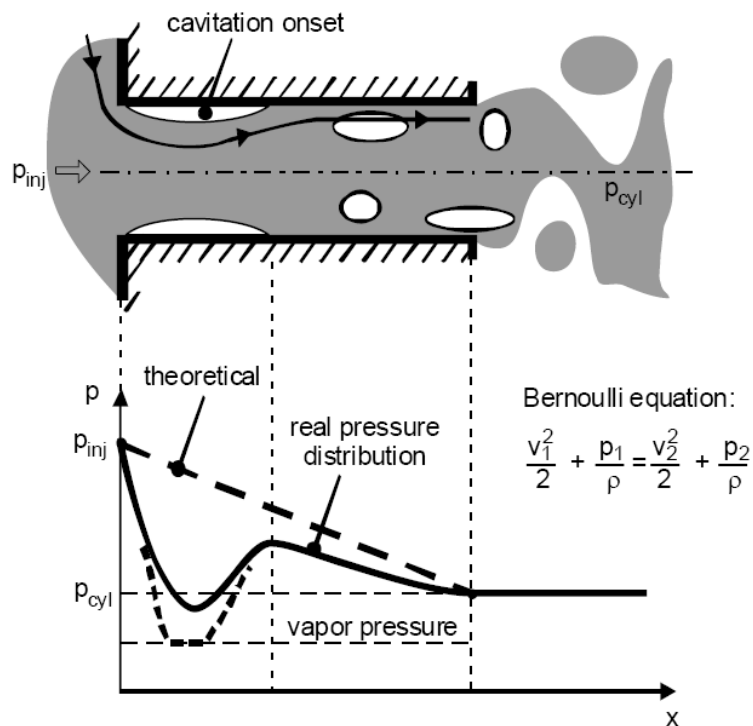
Τα χαρακτηριστικά της ροής μέσα στο ακροφύσιο του εγχυτήρα και η γεωμετρία του ακροφυσίου έχουν σημαντική επίδραση στον υγρό πυρήνα που σχηματίζεται αμέσως μετά το ακροφύσιο. Ανάλογα με την εσωτερική γεωμετρία του ακροφυσίου, τα επίπεδα τύρβης μπορούν να αυξηθούν σημαντικά, συμβάλλοντας ως εκ τούτου στην ταχύτερη αρχική διάσπαση σε σταγονίδια. Πειραματικές και υπολογιστικές

μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για χαρακτηριστικά ακροφύσια εγχυτήρων Diesel προκειμένου να μελετηθούν τα φαινόμενα που οδηγούν στην πρωτογενή διάσπαση σε σταγονίδια. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στα φαινόμενα που εμφανίζονται σε χαρακτηριστικά ακροφύσια σε εγχυτήρες κινητήρων Diesel, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας του φαινομένου της σπηλαίωσης, η οποία είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των υψηλών πιέσεων έγχυσης και της απότομης μεταβολής της γεωμετρίας μέσα στο ακροφύσιο [4].

Μια από τις κύριες δυσκολίες για τη μελέτη της εσωτερικής ροής σε ένα ακροφύσιο πηγάζει από το γεγονός ότι οι γεωμετρικές διαστάσεις είναι πολύ μικρές, και η οπτική πρόσβαση το στόμιο δυσχερής. Μεγαλύτερα, γεωμετρικά όμοια, ακροφύσια έχουν κατασκευαστεί για τη μελέτη της ροής του ρευστού, ωστόσο η φύση του προβλήματος δεν επιτρέπει την κατάλληλη μετατροπή όλων των σημαντικών μεταβλητών. Η αλλαγή του μεγέθους της συσκευής θα αλλάξει όχι μόνο τον αριθμό Reynolds, αλλά επίσης και την κλίμακα χρόνου του προβλήματος. Επιπλέον, οι πυρήνες σπηλαίωσης θα είναι διαφορετικού μεγέθους έναντι αυτών της μοντελοποιημένης συσκευής. Αλλαγή της ταχύτητας, προκειμένου να διατηρηθεί αμετάβλητη η τιμή του αριθμού Reynolds, μπορεί να περιπλέξει το πρόβλημα, με περαιτέρω αλλαγή στη χρονική κλίμακα, καθώς επίσης και στα επίπεδα απόλυτης πίεσης, με συνέπεια διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Ένα τελευταίο ζήτημα που αυξάνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι το πώς θα γίνει πρόβλεψη των φαινομένων σπηλαίωσης σε ένα υγρό, βασισμένη στα στοιχεία που λαμβάνονται από ένα άλλο (τα περισσότερα πειράματα εκτελούνται με νερό ως υγρό δοκιμής, ενώ στη μηχανή χρησιμοποιείται καύσιμο Diesel). Οι διαφορές στις ιδιότητες των καυσίμων, ιδιαίτερα στην επιφανειακή τάση, μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, από το χρονικό σημείο της εμφάνισης της σπηλαίωσης και ακολούθως, τα φαινόμενα που εμφανίζονται είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητα σε πρόσθετους παράγοντες [4].

Παρά τις δυσκολίες που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, ιδιαίτερες προσπάθειες έχουν γίνει για να γίνουν κατανοητές και να μοντελοποιηθούν η σπηλαίωση και οι επιδράσεις της στην τύρβη και στην πρωτογενή διάσπαση της δέσμης καυσίμου σε σταγονίδια. Όπως είναι γνωστό, τα υγρά υπόκεινται σε σπηλαίωση στις κρίσιμες περιοχές χαμηλής πίεσης. Σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli, η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί πτώση της στατικής πίεσης, με ενδεχόμενο η τοπική στατική πίεση να πέσει χαμηλότερα και από την πίεση ατμοποίησης του καυσίμου. Συνέπεια αυτού είναι η δημιουργία φυσαλίδων αερίου μέσα στο ακροφύσιο, οι οποίες όταν επανυγροποιούνται απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας, και επομένως αυξάνουν τη στατική πίεση και τα επίπεδα έντασης της τύρβης. Στο σχήμα 2.10 απεικονίζεται το παραπάνω φαινόμενο, όπου η κατανομή της θεωρητικής (γραμμικής) στατικής πίεσης, που επικρατεί μέσα στο

ακροφύσιο συγκρίνεται με μια αντίστοιχη πραγματική κατανομή στατικής πίεσης κατά μήκος μίας ροϊκής γραμμής [2]. Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί που μπορούν να οδηγήσουν στη σπηλαιώση στα ακροφύσια εγχυτήρων Diesel: η δυναμικά και η γεωμετρικά προκαλούμενη σπηλαιώση. Η δυναμικά προκαλούμενη σπηλαιώση εμφανίζεται μόνο στη μεταβατική ροή, και προκαλείται από κύματα πίεσης ή τη μετακίνηση της βελόνας. Η γεωμετρικά προκαλούμενη σπηλαιώση μπορεί να εμφανιστεί και στη μόνιμη και στη μεταβατική ροή. Ξεκινά λόγω των απότομων αλλαγών της γεωμετρίας της ροής, δηλαδή στις περιοχές υψηλής ταχύτητας της ροής [4].



Σχήμα 2.10. Σχηματισμός σπηλαιώσης εντός ακροφυσίου [1].

## 2.2.3 Πρωτογενής διάσπαση

### 2.2.3.1 Μηχανισμοί πρωτογενούς διάσπασης

Εξαρτώμενη από τη σχετική ταχύτητα και τις ιδιότητες του υγρού και του περιβάλλοντος αερίου, η διάσπαση της υγρής δέσμης επηρεάζεται από διαφορετικούς μηχανισμούς διάσπασης. Αυτοί οι μηχανισμοί χαρακτηρίζονται συνήθως από την απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και του σημείου του πρώτου

σηματισμού σταγονιδίων (το αποκαλούμενο “μήκος διάσπασης”), και το μέγεθος των σταγονιδίων που παράγονται. Σύμφωνα με τους Reitz και Bracco [8], μπορούν να διακριθούν τέσσερις μηχανισμοί: ο μηχανισμός Rayleigh, ο πρώτος και ο δεύτερος ανεμογενής (wind-induced) μηχανισμός, και ο μηχανισμός διάσπασης σε σταγονίδια.

Προκειμένου να δοθεί μια ποσοτική περιγραφή της διάσπασης της ροής, ο Ohnesorge εκτέλεσε μετρήσεις του μήκους της δέσμης υγρού (liquid jet), και έδειξε ότι η διαδικασία διάσπασης μπορεί να περιγραφεί σε συνάρτηση με τον αριθμό Weber [3] του υγρού

$$We_1 = \frac{u^2 \cdot D \cdot \rho_l}{\sigma} \quad (2.2)$$

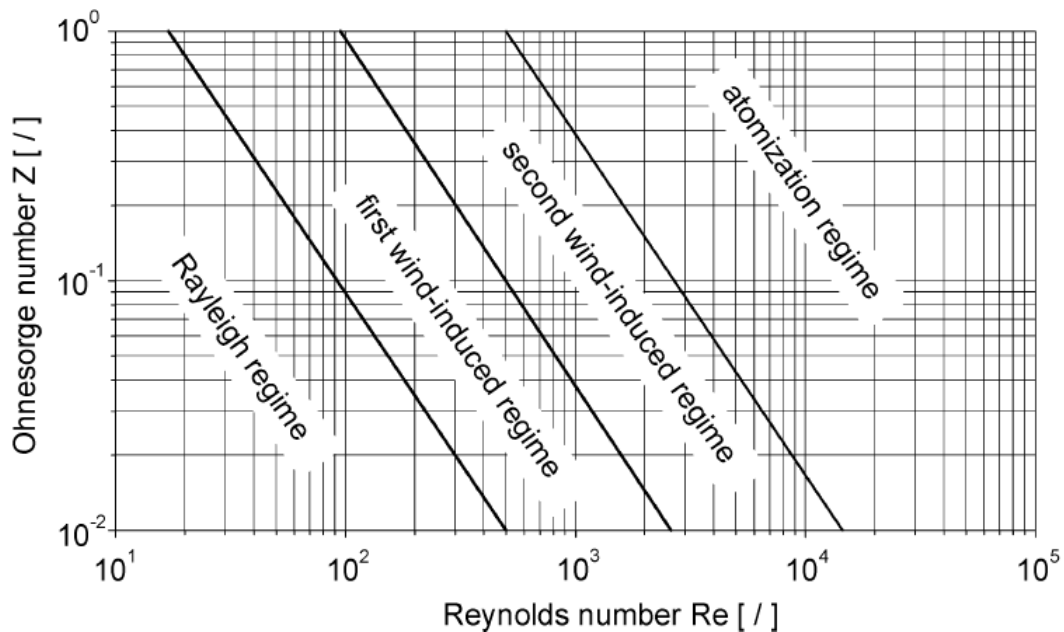
καθώς και τον αριθμό Reynolds

$$Re = \frac{u \cdot D \cdot \rho_l}{\mu_l} \quad (2.3)$$

Απαλείφοντας την ταχύτητα  $u$  της δέσμης ρευστού, ο Ohnesorge δημιούργησε τον αδιάστατο αριθμό Ohnesorge [3],

$$Z = \frac{\sqrt{We_1}}{Re} = \frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma \cdot \rho_l \cdot D}} \quad (2.4)$$

όπου  $\sigma$  η επιφανειακή τάση του υγρού,  $\rho_l$  η πυκνότητα του υγρού,  $\mu_l$  το δυναμικό ιξώδες του υγρού και  $D$  η διάμετρος της οπής του ακροφυσίου.

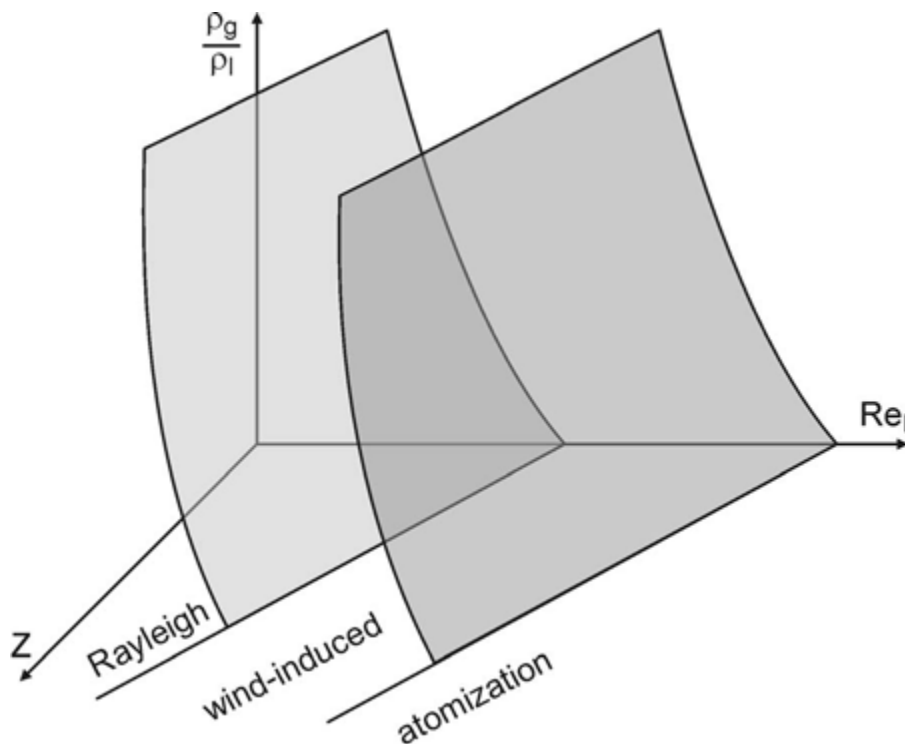


**Σχήμα 2.11.** Διάγραμμα του Ohnesorge: περιοχές μηχανισμών διάσπασης δέσμης υγρού με μεταβλητές τους αριθμούς Reynolds και Ohnesorge [3].

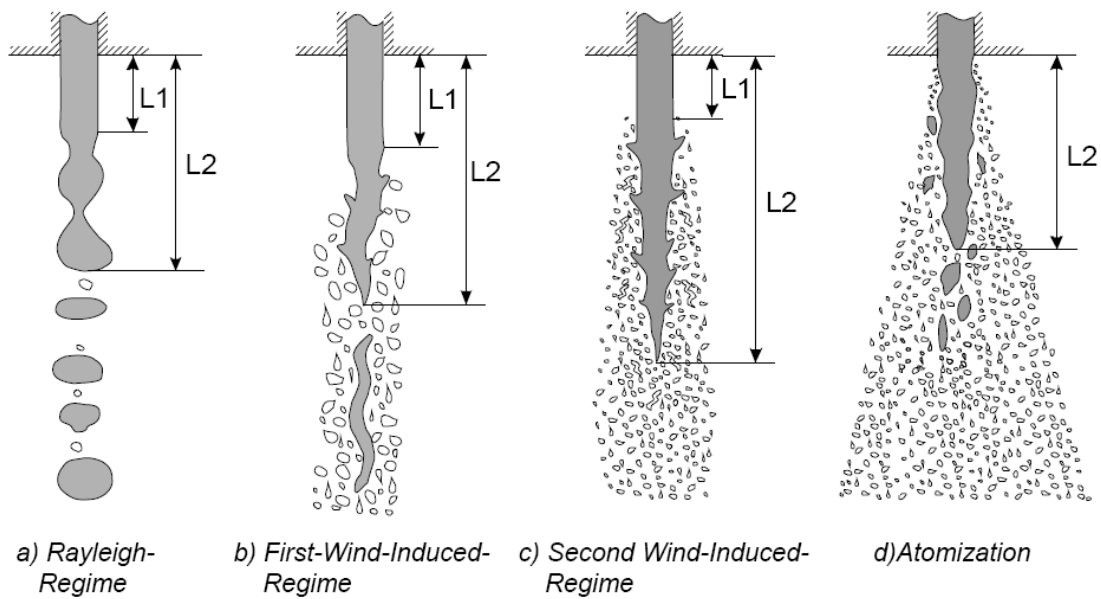


Το σχήμα 2.11 παρουσιάζει το διάγραμμα του Ohnesorge, με μεταβλητές τους αριθμούς Reynolds,  $Re$ , και Ohnesorge,  $Z$ . Στο σχήμα παρίστανται τα όρια μεταξύ των τεσσάρων διαφορετικών μηχανισμών διάσπασης. Εντούτοις, έχει αποδειχτεί ότι η συμπερίληψη μόνο των ιδιοτήτων της υγρής φάσης στον χαρακτηρισμό των μηχανισμών αυτών δεν είναι ικανοποιητική, επειδή η διάσπαση σε σωματίδια μπορεί να ενισχυθεί με την αύξηση της πυκνότητας του αερίου. Έτσι, ο Reitz [9] πρότεινε να περιληφθεί ο λόγος των πυκνοτήτων του αερίου και του υγρού και επέκτεινε το διδιάστατο διάγραμμα του Ohnesorge σε ένα τρισδιάστατο, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12 [3].

Μια σχηματική περιγραφή των διαφορετικών μηχανισμών διάσπασης της υγρής δέσμης δίνεται στο σχήμα 2.13. Εάν η γεωμετρία του ακροφυσίου είναι καθορισμένη, και οι ιδιότητες της υγρής και της αέριας φάσης δεδομένες, η μόνη μεταβλητή που επηρεάζει τη δυναμική της ροής είναι η ταχύτητα του υγρού  $u$ . Το σχήμα 2.14 παρουσιάζει την καμπύλη διάσπασης της υγρής δέσμης, η οποία περιγράφει το μήκος του μη διασπασμένου τμήματος της υγρής δέσμης ροής ως συνάρτηση της ταχύτητάς της,  $u$  [3].

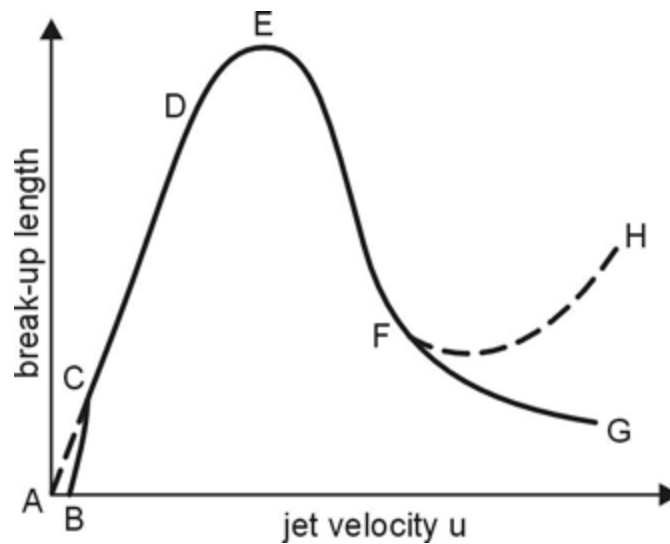


**Σχήμα 2.12.** Περιοχές μηχανισμών διάσπασης δέσμης υγρού συναρτήσει των αριθμών Reynolds και Ohnesorge, και του λόγου πυκνοτήτων αέριας και υγρής φάσης [3].



$L_1$  = undisturbed length of the liquid jet  
 $L_2$  = Maximum length of the liquid core-jet

**Σχήμα 2.13.** Σχηματική περιγραφή των μηχανισμών διάσπασης της υγρής δέσμης ροής [10].



**Σχήμα 2.14.** Μήκος διάσπασης της υγρής δέσμης ροής σε συνάρτηση με την ταχύτητα της δέσμης,  $u$ . ABC: Ροή σταγόνων, CD: Διάσπαση Rayleigh, EF: Πρώτη ανεμογενής διάσπαση, FG (FH): Δεύτερη ανεμογενής διάσπαση, Πέραν του G (H): Μηχανισμός διάσπασης σε σταγονίδια [3].

Έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι το μήκος του υγρού πυρήνα  $L_2$  (βλ. σχήμα 2.13) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [4]:

$$\frac{L_2}{D} = C_c \cdot \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

όπου  $D$  είναι η διάμετρος του εγχυτήρα,  $\rho_l$  και  $\rho_g$  είναι οι πυκνότητες του υγρού και του αερίου αντίστοιχα, και  $C_c$  μια εμπειρική σταθερά με εύρος τιμών 7-16. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η εξίσωση (2.5) παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα για το μήκος  $L_2$  του υγρού πυρήνα των spray Diesel, για μεγάλο εύρος συνθηκών. Πιο αναλυτικά, το μήκος του υγρού πυρήνα εξαρτάται γραμμικά από τη διάμετρο του στομίου, και η επίδραση της πίεσης του περιβάλλοντος περιγράφεται ικανοποιητικά με το νόμο της τετραγωνικής ρίζας. Μόνο η επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αμελείται στην εξίσωση (2.5), αλλά μπορεί επίσης να ληφθεί υπόψη εάν ρυθμιστεί αναλόγως η εμπειρική σταθερά  $C_c$  [4].

Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες, δημιουργείται ροή σταγόνων. Με την αύξηση της ταχύτητας  $u$ , παρατηρείται η δημιουργία μιας συνεχούς δέσμης υγρού, το μήκος του υγρού πυρήνα της οποίας αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας. Η διάσπαση του υγρού πυρήνα γίνεται με αποσύνθεση σε μεγάλου μεγέθους σταγόνες. Αυτός ο μηχανισμός διάσπασης συνιστά τη διάσπαση Rayleigh. Η διάσπαση Rayleigh εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της αύξησης των κυματώσεων της υγρής δέσμης, οι οποίες δημιουργούνται από τις αεροδυναμικές δυνάμεις, με ταυτόχρονη σταθεροποιητική επίδραση των δυνάμεων επιφανειακής τάσης. Κατά τη διάσπαση, σταγονίδια με χαρακτηριστικό μέγεθος μεγαλύτερο από τη διάμετρο  $D$  της οπής του ακροφυσίου αποσπώνται από την υγρή δέσμη [3].

Μια περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα της υγρής δέσμης ροής οδηγεί σε μείωση του μήκους διάσπασης, αλλά αυτό εξακολουθεί να είναι πολλαπλάσιο της διαμέτρου του ακροφυσίου. Το μέσο μέγεθος των σταγονιδίων, μειώνεται και πλέον είναι στο εύρος της διαμέτρου του ακροφυσίου. Στη συγκεκριμένη περιοχή του πρώτου ανεμογενή μηχανισμού, λόγω αύξησης της σχετικής ταχύτητας, αυξάνονται τα επίπεδα των αεροδυναμικών δυνάμεων, σε σχέση με τα αντίστοιχα του μηχανισμού Rayleigh. Η αντίστοιχη αδιάστατη παράμετρος, η οποία εκφράζει τον λόγο των αεροδυναμικών δυνάμεων προς τις δυνάμεις της επιφανειακής τάσης, είναι ο αριθμός Weber, εκφρασμένος για την πυκνότητα της αέριας φάσης, και τη σχετική ταχύτητα της υγρής δέσμης:  $We_g = u_{rel}^2 \cdot D \cdot \rho_g / \sigma$  [3].

Στον δεύτερο ανεμογενή μηχανισμό διάσπασης, η ροή μέσα στο ακροφύσιο γίνεται τυρβώδης. Η διάσπαση της υγρής δέσμης σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται λόγω της ασταθούς ενίσχυσης των κυμάτων μικρού μήκους κύματος που δημιουργούνται από την τύρβη της υγρής δέσμης, και ενισχύονται από τις αεροδυναμικές δυνάμεις. Η διάμετρος των σταγονιδίων που προκύπτουν είναι μικρότερη από τη διάμετρο του ακροφυσίου, και το μήκος διάσπασης μειώνεται με

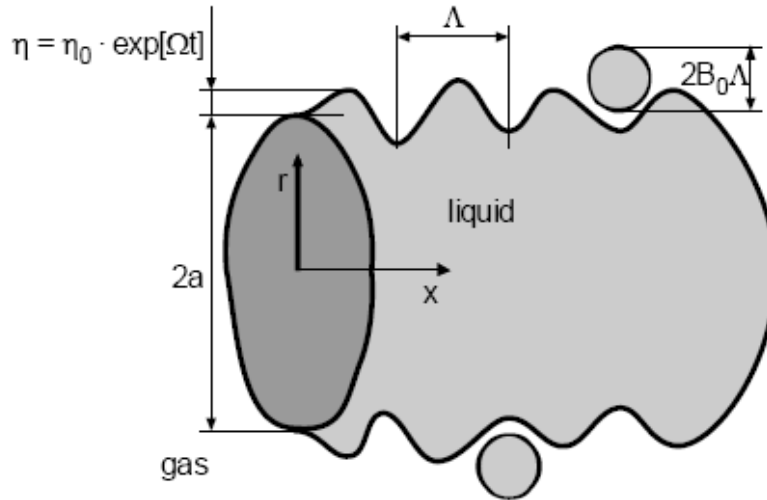
αύξηση του αριθμού Reynolds, όπως φαίνεται στο τμήμα FG (FH) της καμπύλης του σχήματος 2.14. Η δέσμη υγρού πλέον δεν διασπάται συνολικά. Αντιθέτως, λόγω της συνεχούς απόσπασης μικρών σταγονιδίων από την επιφάνεια της δέσμης, η διαδικασία της διάσπασης αρχίζει στην επιφάνεια, και αποσυνθέτει βαθμιαία την υγρή δέσμη, έως την πλήρη αποσύνθεσή της. Έτσι, δύο μήκη διάσπασης πρέπει να οριστούν: το μήκος που αντιστοιχεί στην αρχή της αποσύνθεσης της δέσμης (μήκος άθικτου πυρήνα) και το μήκος που αντιστοιχεί στο πέρας της αποσύνθεσης της υγρής δέσμης (συνολικό μήκος πυρήνα). Το μήκος άθικτου πυρήνα μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας της δέσμης, ενώ το συνολικό μήκος πυρήνα ενδέχεται να αυξάνεται (τμήμα FH, σχήμα 2.14). Εντούτοις, πρέπει να επισημανθεί ότι οι μετρήσεις και των δύο μηκών είναι εξαιρετικά δυσχερείς σε μεγάλους αριθμούς Reynolds, και για αυτόν τον λόγο τα πειραματικά αποτελέσματα από διαφορετικούς συγγραφείς μπορεί να διαφέρουν [3].

Ο μηχανισμός διάσπασης σε σταγονίδια αντιστοιχεί σε μήκος άθικτου πυρήνα το οποίο τείνει στο μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση, αναπτύσσεται ένα κωνικό spray αμέσως μετά την έξοδο της υγρής δέσμης από το ακροφύσιο, δηλαδή η κορυφή του κωνικού spray βρίσκεται εντός του ακροφυσίου. Ένας πυκνός πυρήνας που αποτελείται από μεγάλα υγρά σωματίδια μπορεί να υφίσταται, έως και απόσταση αρκετών διαμέτρων από την έξοδο του ακροφυσίου. Ο μηχανισμός διάσπασης σε σταγονίδια αντιστοιχεί στις συνθήκες των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Τα σταγονίδια που προκύπτουν είναι πολύ μικρότερα από τη διάμετρο του ακροφυσίου. Η θεωρητική περιγραφή της διάσπασης του jet στον μηχανισμό διάσπασης σε σταγονίδια είναι περισσότερο σύνθετη απ' ό,τι σε οποιονδήποτε άλλο μηχανισμό, επειδή η διαδικασία διάσπασης εξαρτάται έντονα από τις συνθήκες ροής εντός του ακροφυσίου, οι οποίες είναι συνήθως άγνωστες και χαοτικής φύσης [3]. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων, των μικρών διαστάσεων και του πολύ πυκνού spray, τα πειράματα που απαιτούνται για την επαλήθευση των μοντέλων του εν λόγω μηχανισμού είναι εξαιρετικά περίπλοκα, και ως εκ τούτου αυτή η επαλήθευση θεωρητικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων είναι αρκετά δυσχερής.

### 2.2.3.2 Το μοντέλο wave-breakup

Η αύξηση των επιφανειακών διαταραχών, λόγω των αεροδυναμικών δυνάμεων, στην υγρή φάση είναι ένας σημαντικός, αν όχι ο κύριος, μηχανισμός για τη διάσπαση σε σταγονίδια της υγρής δέσμης ροής. Έτσι, λόγω της μεγάλης σημασίας του φαινομένου, ο Reitz, [9], και οι Reitz & Bracco [8], [11] υλοποίησαν την ανάπτυξη ενός μοντέλου διάσπασης, το οποίο αποκαλείται μοντέλο wave-breakup (επίσης αποκαλούμενο και μοντέλο διάσπασης Kelvin-Helmholtz), το οποίο είναι

ευρέως διαδεδομένο στη μοντελοποίηση της πρωτογενούς και δευτερογενούς διάσπασης [1].



**Σχήμα 2.15.** Επιφανειακές διαταραχές στο μοντέλο wave-breakup [1].

Υγρή δέσμη κυκλικής διατομής με ακτίνα  $a$  εκρέει μέσω κυκλικού στομίου σε ένα στάσιμο ασυμπίεστο αέριο περιβάλλον, σχήμα 2.15. Η υγρή επιφάνεια υπόκειται σε εξαιρετικά μικρές διαταραχές με αρχικό εύρος  $n_0$ , και ένα φάσμα από μήκη κύματος  $\lambda$ , τα οποία αντιστοιχούν σε κυματαριθμό  $k=2\cdot\pi/\lambda$ . Οι αρχικές διαταραχές μπορούν να προκληθούν λόγω της ροής εσωτερικά του ακροφυσίου, π.χ. από την τύρβη στην υγρή φάση. Τα μεγέθη των διαταραχών αυξάνονται εκθετικά λόγω των αλληλεπιδράσεων υγρού-αερίου, με τη μιγαδική συχνότητα  $\omega=\omega_r+i\omega_i$  [1]:

$$n(t) = n_0 \exp[ikx + \omega t] \tag{2.6}$$

όπου  $\omega_i$  η γωνιακή συχνότητα, και  $\omega_r$  ο ρυθμός αύξησης των διαταραχών (growth rate).

Υποθέτοντας ότι η αέρια φάση συμπεριφέρεται ως μη συνεκτικό ρευστό, δηλαδή ότι υπάρχει ολίσθηση στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου, και ότι το εύρος των διαταραχών είναι πολύ μικρότερο από την ακτίνα του jet ( $n \ll a$ ), μπορεί να παραχθεί η αποκαλούμενη σχέση διασποράς (dispersion relation), η οποία συνδέει τη μιγαδική συχνότητα  $\omega$  με τον κυματαριθμό  $k$  [11]:

$$\omega^2 + 2\nu_1 k^2 \omega \left[ \frac{I_1'(k\alpha)}{I_0(k\alpha)} - \frac{2kl}{k^2+l^2} \frac{I_1(k\alpha)}{I_0(k\alpha)} \frac{I_1'(l\alpha)}{I_1(l\alpha)} \right] = \frac{\sigma k}{\rho_1 \alpha^2} (1 - k^2 \alpha^2) \left( \frac{l^2 - k^2}{l^2 + k^2} \right) \frac{I_1(k\alpha)}{I_0(k\alpha)} + \frac{\rho_g}{\rho_1} \left( U - \frac{i\omega}{k} \right)^2 k^2 \left( \frac{l^2 - k^2}{l^2 + k^2} \right) \frac{I_1(k\alpha)K_0(k\alpha)}{I_0(k\alpha)K_1(k\alpha)} \tag{2.7}$$

Στην εξίσωση (2.7) τα  $I_\nu$  και  $K_\nu$  είναι οι τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel  $\nu$ -οστής τάξης πρώτου και δεύτερου είδους, αντίστοιχα,  $\nu_1$  είναι το κινηματικό ιξώδες της υγρής φάσης,  $U$  η ταχύτητα του αερίου στην υγρή επιφάνεια, και  $l^2 = k^2 + \omega/\nu_1$ .

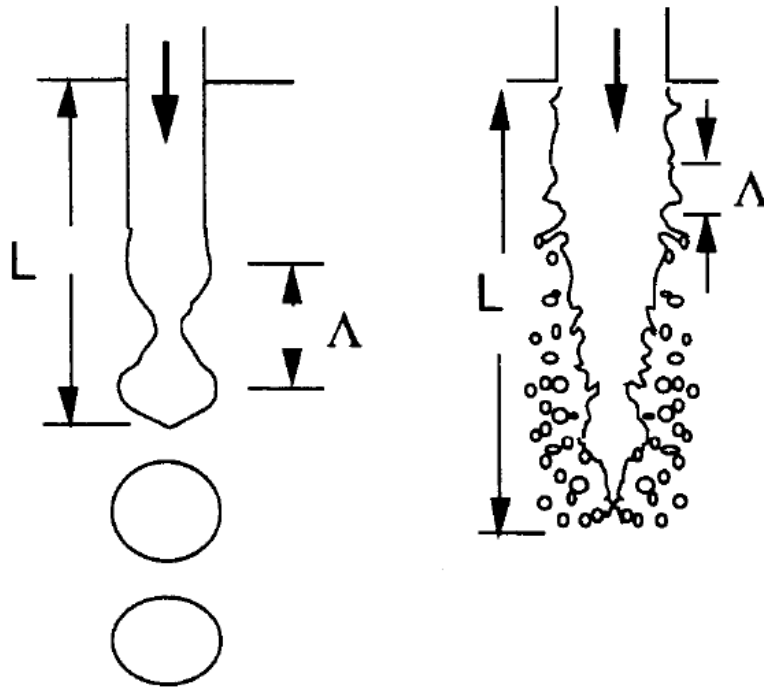
Παρόλο που στην πραγματικότητα οι διαταραχές διαφορετικών μηκών κύματος υπερτίθενται η μία πάνω στην άλλη, γίνεται η υπόθεση ότι η ταχύτερη σε ανάπτυξη διαταραχή, με ρυθμό αύξησης  $\Omega$ , η οποία αντιστοιχεί σε μήκος κύματος  $\Lambda$  θα οδηγήσει τελικά στη διάσπαση. Ωστόσο, η εξίσωση (2.7) είναι δύσκολο να λυθεί για μέγιστη τιμή του  $\omega$ , δεδομένου ότι το  $l$  είναι συνάρτηση του  $\omega$ . Για να απλοποιηθεί το πρόβλημα, ο Reitz [12] έκανε προσαρμογή καμπυλών σε αριθμητικές λύσεις της εξίσωσης (2.7), και εξήγαγε τις ακόλουθες σχέσεις για τον μέγιστο ρυθμό αύξησης  $\Omega$  και το αντίστοιχο μήκος κύματος  $\Lambda$ :

$$\frac{\Lambda}{\alpha} = 9.02 \frac{(1+0.45Z^{0.5})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.87We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (2.8)$$

$$\Omega \left( \frac{\rho_l \alpha^3}{\sigma} \right)^{0.5} = \frac{0.34+0.38We_g^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})} \quad (2.9)$$

$$\text{όπου } Z = \frac{We_l^{0.5}}{Re_l}, \quad T = ZWe_g^{0.5}, \quad We_l = \frac{\rho_l U^2 \alpha}{\sigma}, \quad We_g = \frac{\rho_g U^2 \alpha}{\sigma}, \quad Re_l = \frac{U \alpha}{\nu_1}$$

Οι εξισώσεις (2.8) και (2.9) έχουν ως απόρροια με αύξηση του αριθμού Weber του αερίου να αυξάνεται ο ρυθμός αύξησης  $\Omega$ , και να μειώνεται το αντίστοιχο μήκος κύματος  $\Lambda$ . Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και πειραματικά: με αύξηση της ταχύτητας έγχυσης ενισχύεται η διάσπαση, ενώ οι μέσες διάμετροι των σταγονιδίων που προκύπτουν γίνονται μικρότερες. Επίσης, με αύξηση του ιξώδους του υγρού, από το οποίο εξαρτάται ο αριθμός Reynolds και επομένως και ο αριθμός Ohnesorge,  $Z$ , ο ρυθμός αύξησης των διαταραχών,  $\Omega$ , μειώνεται [1].



Σχήμα 2.16. Σχηματική απεικόνιση των μηκών  $L$  και  $\Lambda$  [13].

Προκειμένου να υπολογιστούν τα μεγέθη των σταγονιδίων που προκύπτουν από τη διάσπαση, γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει γραμμική εξάρτηση μεταξύ της ακτίνας των σταγονιδίων που προκύπτουν,  $r_d$ , και του μήκους κύματος,  $\Lambda$ , της πλέον ασταθούς διαταραχής της επιφάνειας [1], σχήμα 2.15,

$$r_d = B\Lambda \quad (2.10)$$

όπου  $B$  μια σταθερά. Το μήκος του άθικτου πυρήνα,  $L$ , του spray, βλ. σχήμα 2.16, μπορεί να προσεγγιστεί εκτιμώντας την ποσότητα της μάζας που αποσπάται από το jet κατά τη διαδικασία διάσπασης σε σταγονίδια ως εξής:

$$L = \frac{c\alpha}{f(T)} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (2.11)$$

όπου το  $T$  έχει οριστεί παραπάνω, και το  $f(T)$  τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή  $3^{0.5}/6$  για  $T > 100$  (τιμές αντιπροσωπευτικές spray κινητήρων Diesel). Η σταθερά  $c$  έχει εύρος τιμών 15 έως 30, και εκφράζει την επίδραση της ροής εντός του ακροφυσίου [1].

Ο υπολογισμός της ημιγωνείας,  $\varphi/2$ , της γωνίας του κώνου του spray,  $\varphi$ , που σχηματίζεται στον μηχανισμό διάσπασης σε σταγονίδια στα jet υψηλών ταχυτήτων,

βασίζεται στην υπόθεση ότι η κάθετη, στην κατεύθυνση του spray, συνιστώσα της ταχύτητας των σταγονιδίων,  $v_{\perp}$ , είναι ανάλογη με τον ρυθμό αύξησης του πλέον ασταθούς κύματος [8]:

$$\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{v_{\perp}}{U} = \frac{\Omega\lambda}{AU} = \frac{4\pi}{A} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} f(T) \quad (2.12)$$

Στην εξίσωση (2.12) η ποσότητα  $f(T)$  είναι η ίδια όπως στην εξίσωση (2.11), η σταθερά  $A$  σχετίζεται με τη γεωμετρία του ακροφυσίου, και έχει οριστεί σε σχέση με τον λόγο μήκους προς διάμετρο του ακροφυσίου ως εξής [14]:

$$A = 3.0 + \frac{l_{noz}/d_{noz}}{3.6} \quad (2.13)$$

## 2.2.4 Δευτερογενής διάσπαση

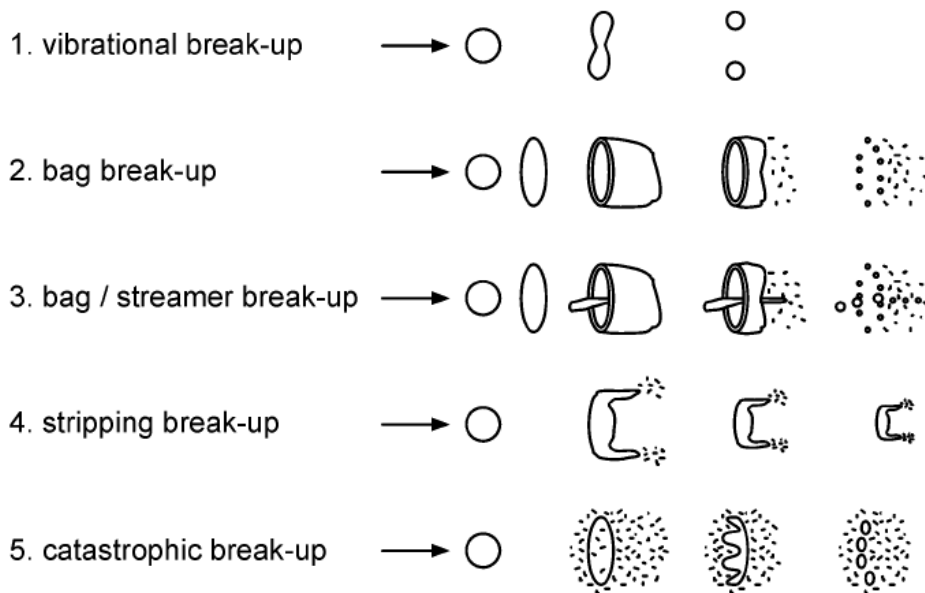
### 2.2.4.1 Μηχανισμοί δευτερογενούς διάσπασης

Η διάσπαση των σταγονιδίων σε ένα spray προκαλείται από τις αεροδυναμικές δυνάμεις πίεσης και τριβής, που με τη σειρά τους προκαλούνται από τη σχετική ταχύτητα  $u_{rel}$  μεταξύ του σταγονιδίου και του περιβάλλοντος αερίου. Οι αεροδυναμικές δυνάμεις έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ασταθών διαταραχών στην αλληλεπίδραση υγρού/αερίου ή στο ίδιο το σταγονίδιο, το οποίο τελικά διασπάται σε μικρότερα σταγονίδια. Αυτά τα σταγονίδια υπόκεινται εκ νέου σε περαιτέρω διάσπαση λόγω των αεροδυναμικών δυνάμεων. Η δύναμη επιφανειακής τάσης τείνει να διατηρήσει το σταγονίδιο σφαιρικό, και αντιδρά στη δύναμη παραμόρφωσης. Η δύναμη επιφανειακής τάσης εξαρτάται από την κυρτότητα της επιφάνειας: όσο μικρότερο είναι το σταγονίδιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη επιφανειακής τάσης και τόσο μεγαλύτερη η κρίσιμη σχετική ταχύτητα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ασταθή παραμόρφωση του σταγονιδίου και τελικά τη διάσπασή του. Αυτή η εξάρτηση εκφράζεται από τον αριθμό Weber της αέριας φάσης [3]. Οι υπάρχουσες πειραματικές μελέτες επί της δευτερογενούς διάσπασης συνδέονται γενικά με λόγους πυκνότητας υγρού/αερίου μεγαλύτερους από 5 0 καθώς και αριθμούς Reynolds σταγονιδίου μεγαλύτερους από 50 [4]. Σε αυτές τις συνθήκες, οι μεταβάσεις του μηχανισμού διάσπασης είναι συναρτήσεις των αρχικών τιμών των αριθμών Weber και Ohnesorge ενός σταγονιδίου,

$$We_g = \frac{u_{rel}^2 d \rho_g}{\sigma} \quad Z = \frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma \rho_l d}} \quad (2.14)$$



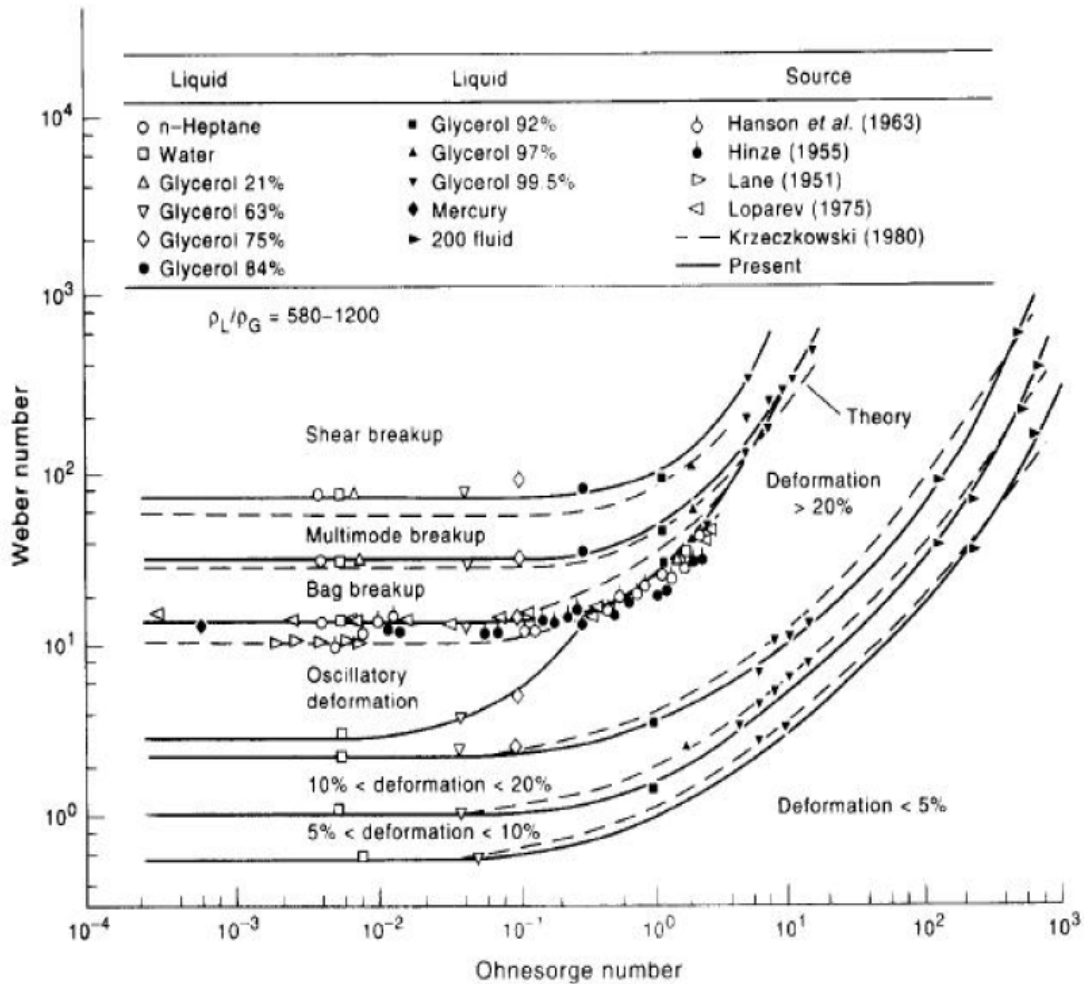
όπου  $d$  είναι η διάμετρος των σταγονιδίων πριν από τη διάσπαση,  $\sigma$  είναι η επιφανειακή τάση του υγρού,  $u_{rel}$  είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του σταγονιδίου και του αερίου, και  $\rho_g$  η πυκνότητα του αερίου. Ο αριθμός Weber αντιπροσωπεύει τον λόγο των αεροδυναμικών δυνάμεων (δυναμική πίεση) προς τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης.



**Σχήμα 2.17.** Μηχανισμοί δευτερογενούς διάσπασης [3].

Από πειραματικές έρευνες είναι γνωστό ότι, ανάλογα με τον αριθμό Weber, υπάρχουν διαφορετικοί μηχανισμοί διάσπασης σταγονιδίων. Το σχήμα 2.17 συνοψίζει τους σχετικούς μηχανισμούς διάσπασης σταγονιδίων. Ο μηχανισμός “vibrational break-up” εμφανίζεται σε πολύ μικρούς αριθμούς Weber, κοντά στο κρίσιμο σημείο  $We_g \approx 12$ , κάτω από το οποίο η παραμόρφωση των σταγονιδίων δεν οδηγεί σε διάσπαση. Ο μηχανισμός “bag break-up” συνίσταται σε παραμόρφωση ενός σταγονιδίου, υπό μορφή “σάκου”. Το άκρο διασπάται σε μεγαλύτερα σταγονίδια, ενώ το υπόλοιπο του σάκου διασπάται σε μικρότερα, με συνέπεια την ύπαρξη δικόρυφης κατανομής (bimodal distribution) μεγέθους των σταγονιδίων. Στον μηχανισμό “bag-streamer break-up” εμφανίζεται ένα επιπλέον jet. Στον μηχανισμό “stripping break-up”, η διάμετρος του σταγονιδίου μειώνεται βαθμιαία, επειδή πολύ μικρά σταγονίδια αποκόπτονται συνεχώς στην περιοχή του οριακού στρώματος, λόγω διατμητικών δυνάμεων. Καί αυτός ο μηχανισμός διάσπασης οδηγεί σε δικόρυφη κατανομή μεγέθους σταγονιδίων. Η “καταστροφική” διάσπαση (catastrophic break-up) περιλαμβάνει δύο στάδια: Λόγω ισχυρής επιβράδυνσης, δημιουργούνται κυματώσεις επί των σταγονιδίων, με μεγάλο εύρος και μήκος κύματος, με απόρροια τη διάσπαση σε λίγα μεγάλα μεγέθους σταγονίδια.

Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται επιφανειακά κύματα με μικρά μήκη κύματος, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την αποκοπή σταγονιδίων μικρού μεγέθους [3].



**Σχήμα 2.18.** Διάγραμμα της παραμόρφωσης και της διάσπασης των σταγονιδίων [15].

Στο σχήμα 2.18 παρουσιάζεται το διάγραμμα παραμόρφωσης και διάσπασης σταγονιδίων (Faeth *et al.*, 1995) [15]. Είναι πολύ ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι για μικρούς αριθμούς Ohnesorge ( $Z < 0.1$ ) η μετάβαση μεταξύ των μηχανισμών διάσπασης είναι συνάρτηση μόνο του αριθμού Weber, ενώ ο αριθμός Ohnesorge επιδρά μόνο για τιμές  $Z > 0.1$ . Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι, για μικρούς αριθμούς  $Z$  οι δυνάμεις ιξώδους του υγρού είναι μικρές, και οι αεροδυναμικές δυνάμεις αντίστασης μπορούν να ισορροπηθούν μόνο από την επίδραση της επιφανειακής τάσης. Ωστόσο, όσο αυξάνεται το ιξώδες του υγρού, οι δυνάμεις ιξώδους του, επιδρούν σταθεροποιητικά στις αεροδυναμικές δυνάμεις από

την αέρια φάση, με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Weber για τη μετάβαση από τον ένα μηχανισμό διάσπασης στον επόμενο [4].

Τελικά, το σχήμα 2.18 παρουσιάζει τέσσερις περιοχές παραμόρφωσης (5%, 10%, 20% και “ταλαντωτική παραμόρφωση”), τον μηχανισμό bag break-up για  $12 < We < 35$ , τον μηχανισμό bag-streamer break-up για  $35 < We < 80$ , τον μηχανισμό stripping break-up για  $80 < We < 850$ , και τον καταστροφικό μηχανισμό διάσπασης (catastrophic break-up) για  $We > 850$ . Αυτά τα όρια αυξάνονται με αύξηση του αριθμού Ohnesorge, με αβεβαιότητα αναφορικά με την περιοχή υψηλών αριθμών Ohnesorge και Weber, δεδομένου ότι εκεί είναι δυσχερής η πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων [4].

Στα spray κινητήρων, εμφανίζονται όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί δευτερογενούς διάσπασης. Πιο συγκεκριμένα, στους κινητήρες Diesel οι περισσότερες από τις διεργασίες διάσπασης πραγματοποιούνται υπό υψηλούς αριθμούς Weber (κυρίως λόγω των υψηλών ταχυτήτων έγχυσης).

#### 2.2.4.2 Χρόνοι διάσπασης σταγονιδίου

Μια έκφραση για τον προσδιορισμό ενός αδιάστατου χαρακτηριστικού χρόνου διάσπασης ενός σταγονιδίου είναι η ακόλουθη [4]:

$$T = \frac{d}{u_{rel}} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (2.15)$$

Δύο χρονικές στιγμές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι η έναρξη και το πέρας της διάσπασης. Ο καθορισμός της έναρξης της διάσπασης είναι κάπως αυθαίρετος, και εξαρτάται από τον μηχανισμό διάσπασης.

Η αδιάστατη μορφή του χαρακτηριστικού χρόνου που απαιτείται για να αρχίσει η διάσπαση μειώνεται συνεχώς με αυξανόμενο τον αριθμό Weber. Μια απλή εμπειρική σχέση κατά Pilch και Erdman (1987) [16] που περιγράφει επαρκώς τον χρόνο έναρξης της διάσπασης, τόσο για χαμηλούς όσο και για υψηλούς αριθμούς Ohnesorge, είναι:

$$\frac{t}{T} = 1.9(We - 12)^{-0.25}(1 + 2.2Z^{1.6}) \quad (2.16)$$

Το πέρας της διάσπασης ορίζεται ως το χρονικό σημείο που το σταγονίδιο και όλοι οι επιμέρους πυρήνες του δεν υφίστανται πλέον περαιτέρω διάσπαση. Οι σχέσεις για τη χρονική στιγμή που ολοκληρώνεται η διάσπαση, με βάση πειραματικές μετρήσεις, δίνονται ως εξής [16]:

$$\frac{t}{T} = 6(We - 12)^{-0.25}, \quad 12 < We < 18 \quad (2.17)$$

$$\frac{t}{T} = 2.45(We - 12)^{0.25}, \quad 18 < We < 45 \quad (2.18)$$

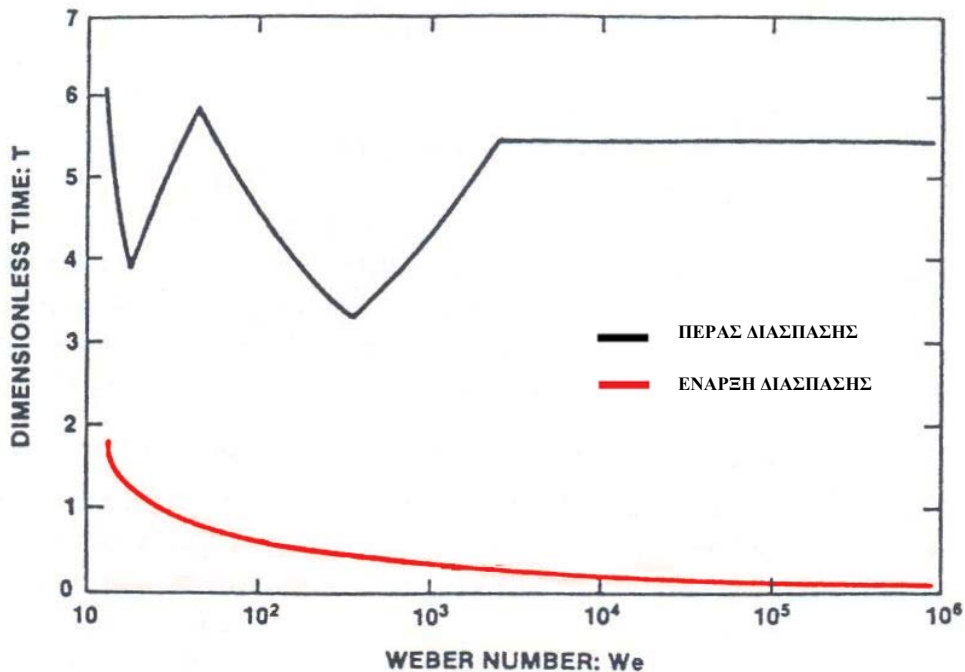
$$\frac{t}{T} = 14.1(We - 12)^{-0.25}, \quad 45 < We < 351 \quad (2.19)$$

$$\frac{t}{T} = 0.766(We - 12)^{0.25}, \quad 351 < We < 2670 \quad (2.20)$$

$$\frac{t}{T} = 5.5, \quad 2670 < We \quad (2.21)$$

Οι χρόνοι του πέρατος της διάσπασης που δίδονται από τις παραπάνω εκφράσεις (2.17)-(2.21) ισχύουν για σταγονίδια μικρού ιξώδους,  $Z < 0.1$ . Για υψηλού ιξώδους σταγονίδια ισχύει η σχέση [16]:

$$\frac{t}{T} = 4.5(1 + 1.2Z^{1.64}), \quad We < 228 \quad (2.22)$$



**Σχήμα 2.19.** Αδιάστατοι χρόνοι ( $t/T$ ) έναρξης και πέρατος της διάσπασης σταγονιδίου, συναρτήσει του αριθμού Weber για τιμές του αριθμού Ohnesorge  $Z < 0.1$  [16].

Με το πέρας της δευτερογενούς διάσπασης υπάρχουν ακόμα σταγονίδια, και πιο συγκεκριμένα αρχικά σταγονίδια που παραμένουν από το stripping break-up, με μέγεθος και ταχύτητα αρκετά μεγάλα, ώστε να μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία  $We > 12$ , για την οποία λαμβάνει χώρα κάποια διάσπαση. Επομένως, αυτά τα σταγονίδια θα έπρεπε να υπόκεινται σε τριτογενή διάσπαση, με μηχανισμό που να καθορίζεται από τον συνδυασμό των αριθμών  $We$  και  $Z$ . Εντούτοις, υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι τριτογενής διάσπαση δεν λαμβάνει χώρα [4]. Το κριτήριο για την ολοκλήρωση της διάσπασης συνδέεται με συνθήκες που δείχνουν ότι το σταγονίδιο έχει προσαρμοστεί στη ροή του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της περιόδου της δευτερογενούς διάσπασης. Η ολοκλήρωση ή μη της διάσπασης των σταγονιδίων σχετίζεται με τον αριθμό Eötvös,  $E_o$ , που ορίζεται ως:

$$E_o = \frac{\alpha \rho_1 d^2}{\sigma} \quad (2.23)$$

όπου  $\alpha$  είναι η τοπική επιτάχυνση του σταγονιδίου. Έχει διαπιστωθεί ότι για τιμές του αριθμού Eötvös μικρότερες από  $E_o=16$  δεν λαμβάνει χώρα καμία περαιτέρω διάσπαση [4].

### 2.2.4.3 Μεγέθη των σταγονιδίων

Έχει διαπιστωθεί ότι οι κατανομές του μεγέθους των σταγονιδίων που δημιουργούνται κατά τη δευτερογενή διάσπαση μπορούν να χαρακτηριστούν σε κάθε χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας τα μεγέθη MMD και SMD. Το μέγεθος MMD (Mass Median Diameter) είναι η μέση διάμετρος μάζας, και το μέγεθος SMD (Sauter Mean Diameter) είναι η μέση διάμετρος Sauter. Η διάμετρος SMD αντιστοιχεί στη διάμετρο του σταγονιδίου του οποίου ο λόγος όγκου προς επιφάνεια είναι ίσος με τον λόγο του συνολικού όγκου των σταγονιδίων του spray προς τη συνολική τους επιφάνεια, ενώ η MMD είναι εκείνη η διάμετρος σταγονιδίου για την οποία το 50% του συνολικού υγρού όγκου αποτελείται από σταγονίδια μικρότερης διαμέτρου. Οι τιμές διάφορων αντιπροσωπευτικών διαμέτρων σε μια κατανομή μεγέθους σταγονιδίων, λαμβάνοντας υπόψη ότι όλες οι αντιπροσωπευτικές διαμέτροι στο spray σχετίζονται μεταξύ τους μέσω της παραμέτρου της κατανομής,  $q$ , μπορούν να βρεθούν ως εξής [4]:

$$\frac{MMD}{SMD} = 0.693^{1/q} \Gamma \left( 1 - \frac{1}{q} \right) \quad (2.24)$$

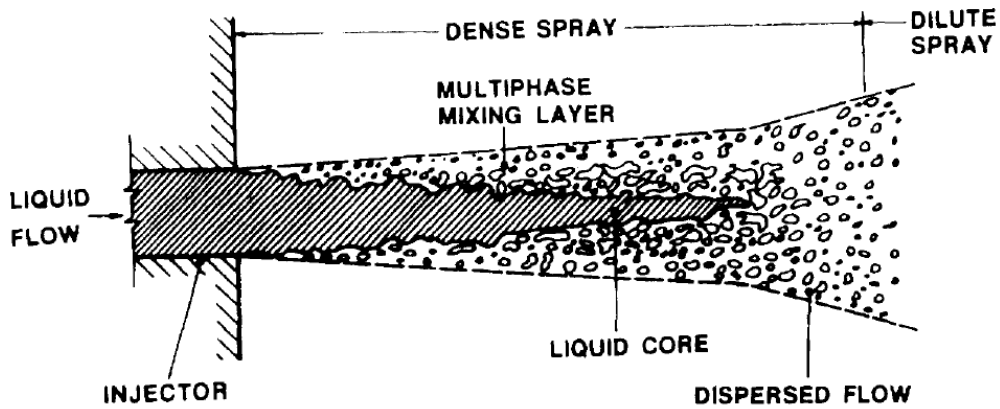
όπου  $\Gamma$  είναι η συνάρτηση γάμμα. Ως εκ τούτου, εάν ο λόγος  $MMD/SMD$  είναι γνωστός, μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων.

Για τον μηχανισμό διάσπασης bag break-up έχει βρεθεί πειραματικά ότι  $MMD/SMD=1.2$ , και παραπλήσια τιμή και για τον μηχανισμό διάσπασης stripping break-up. Επίσης, όταν θεωρείται μόνον ο σάκος που σχηματίζεται (bag), και όχι η περιοχή περιφερειακά αυτού,  $MMD/SMD=1.04$  [4].

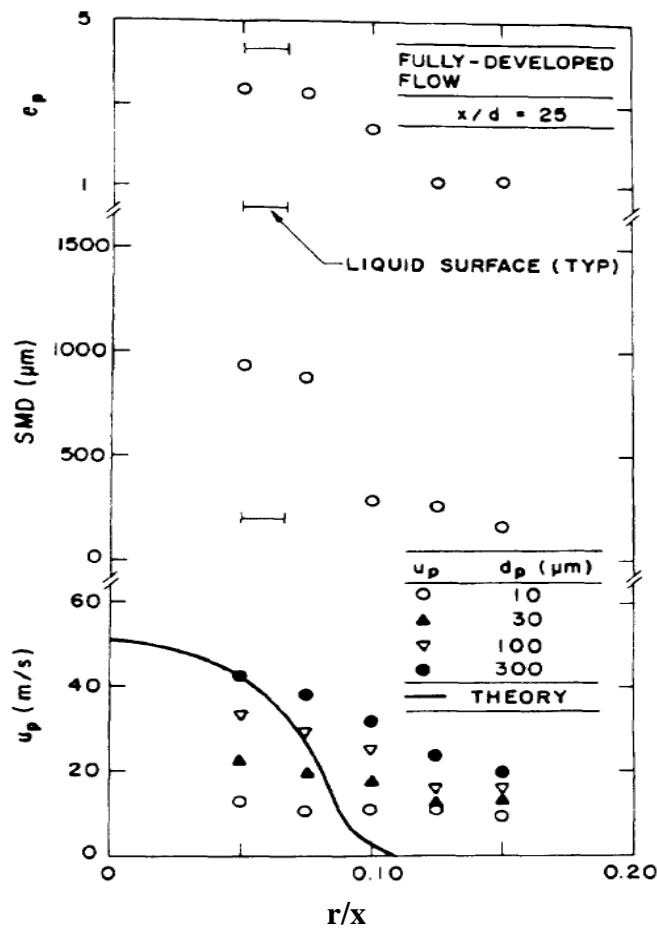
Στον μηχανισμό διάσπασης bag-streamer break-up (ή multimode breakup), τα μεγέθη των σωματιδίων ring, plume και core εξετάζονται χωριστά, ενώ τα σωματίδια bag έχουν ίδιο μέγεθος με αυτά του μηχανισμού διάσπασης bag break-up. Στον μηχανισμό διάσπασης stripping break-up, χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.24), εκ νέου, με  $MMD/SMD=1.2$  [4].

### 2.2.5 Δομή της πυκνής περιοχής του spray

Η διασκορπισμένη περιοχή της ροής (dispersed flow) που γειτνιάζει με την υγρή επιφάνεια συνιστά μια διφασική περιοχή, όπου λαμβάνει χώρα ανάμιξη υγρής και αέριας φάσης (mixing layer). Η περιοχή αυτή είναι παρούσα έως το όριο του υγρού πυρήνα (liquid core). Για μεγαλύτερη απόσταση από το ακροφύσιο, υπάρχει μια αραιή περιοχή με χαμηλή πυκνότητα υγρών σταγονιδίων ανά μονάδα όγκου (dilute spray), σχήμα 2.20. Η διφασική περιοχή αρχίζει κοντά στην έξοδο του εγχυτήρα, όπου κυριαρχεί ο μηχανισμός πρωτογενούς διάσπασης. Η πρωτογενής διάσπαση έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό επιμέρους πυρήνων και άλλων ακανόνιστης μορφής υγρών τμημάτων κατά μήκος της επιφάνειας του υγρού πυρήνα. Κατά συνέπεια, ο βαθμός της πρωτογενούς διάσπασης καθορίζει το μήκος του υγρού πυρήνα. Συχνά, αποτέλεσμα της πρωτογενούς διάσπασης είναι ακανόνιστης μορφής σταγονίδια ή επιμέρους πυρήνες. Συγχρόνως, ως αποτελέσματα της πρωτογενούς διάσπασης, τα περισσότερα από αυτά τα υγρά σωματίδια, είναι ασταθή σε δευτερογενή διάσπαση. Συμπερασματικά, τα χαρακτηριστικά ή ακόμα και η ίδια η ύπαρξη της πυκνής περιοχής του spray εξαρτώνται έντονα από τις ιδιότητες της ροής του υγρού (χαρακτηριστικά της στροβιλότητας της ροής, επίπεδα τύρβης, κ.λπ.) στην έξοδο του jet [15], [17].

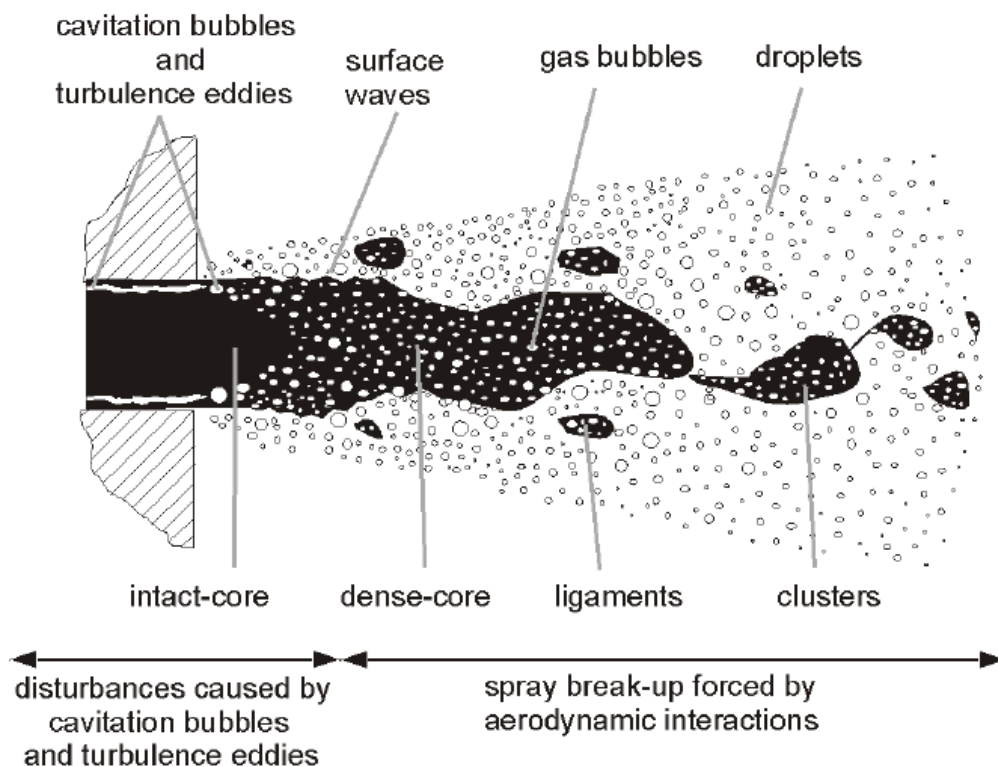


Σχήμα 2.20. Σχηματική απεικόνιση της περιοχής του spray κοντά στον εγχυτήρα [15].



Σχήμα 2.21. Αποτελέσματα πρωτογενούς διάσπασης σε σωματίδια [15].

Συχνά, το αποτέλεσμα της πρωτογενούς διάσπασης είναι ακανόνιστα σταγονίδια, τα περισσότερα από τα οποία είναι ασταθή. Περαιτέρω ανάλυση μπορεί να βασιστεί σε μετρήσεις, όπως π.χ. αυτές που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.21, όπου αναπαριστώνται τα αποτελέσματα για ψεκασμό νερού σε ακίνητο αέρα, σε διάφορες πιέσεις [15]. Εδώ, τα αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένης της ελλειπτικότητας των σταγονιδίων  $c_p$ , της μέσης διαμέτρου Sauter (SMD) του spray, και των ταχύτητων των σταγονιδίων για διάφορες διαμέτρους σταγονιδίου, παρουσιάζονται ως συνάρτηση της ακτινικής απόστασης σε μια σταθερή απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου, ίση με 25 διαμέτρους. Η περιοχή κοντά στην υγρή επιφάνεια αποτελείται από μεγάλους ακανόνιστους επιμέρους πυρήνες (μεγάλη ελλειπτικότητα και διάμετρος SMD), ενώ η αραιή περιοχή του spray κοντά στην άκρη της ροής περιλαμβάνει μικρότερα σφαιρικά σταγονίδια (βλ. και σχήμα 2.22) [4].



Σχήμα 2.22. Δομή των διαφόρων περιοχών του spray [10].



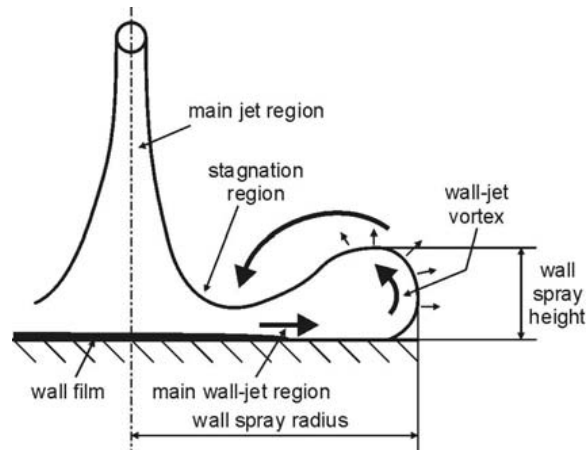
### 2.2.6 Αλληλεπίδραση δέσμης καυσίμου - τοιχώματος

Η αλληλεπίδραση δέσμης καυσίμου-τοιχώματος λαμβάνει χώρα όταν το καύσιμο, εισχωρώντας σε αέριο περιβάλλον, προσκρούει σε ένα τοίχωμα, το οποίο μπορεί να είναι η πίσω πλευρά της βαλβίδας εισαγωγής ή το τοίχωμα του θαλάμου καύσης. Δύο κύριες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι: η αρχική πρόσκρουση του spray στα τοιχώματα, και η μετέπειτα δημιουργία λεπτού στρώματος υγρού στα τοιχώματα (wall film). Καί οι δύο διεργασίες μπορούν να επηρεάσουν έντονα την αποδοτικότητα της καύσης και τον σχηματισμό ρύπων. Η πρόσκρουση στα τοιχώματα εξαρτάται από το μήκος διείσδυσης του spray και από την απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου έγχυσης και των τοιχωμάτων. Υψηλές πιέσεις έγχυσης καθώς επίσης και χαμηλές πυκνότητες και θερμοκρασίες αερίου αυξάνουν τον βαθμό διείσδυσης και την πιθανότητα πρόσκρουσης στα τοιχώματα [3].

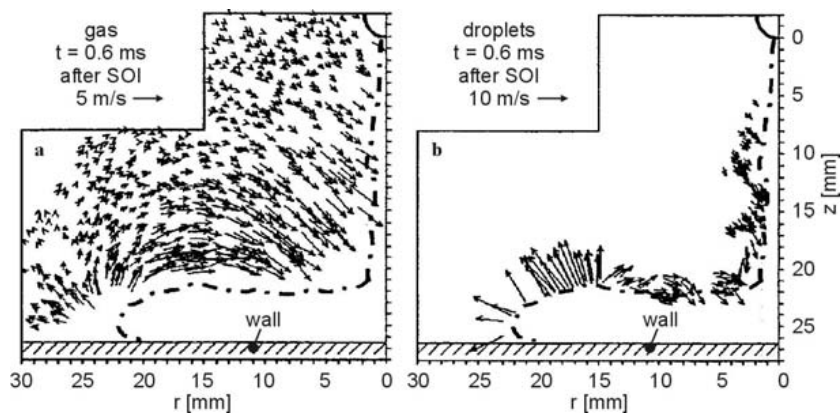
Ανάλογα με τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων και τη μάζα υγρού που έχει συσσωρευτεί στο τοίχωμα, η πρόσκρουση του spray στα τοιχώματα μπορεί να έχει αρνητικά ή θετικά αποτελέσματα. Στην περίπτωση χαμηλής θερμοκρασίας τοιχωμάτων, για παράδειγμα υπό ψυχρές αρχικές συνθήκες, ο σχηματισμός λεπτού στρώματος υγρού στο τοίχωμα αυξάνει σημαντικά τους άκαυστους υδρογονάνθρακες και τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης, λόγω της ανεπαρκούς καύσης, ως απόρροια της πολύ αργής εξάτμισης του υγρού λεπτού στρώματος του τοιχώματος. Από την άλλη μεριά, με την πρόσκρουση στο τοίχωμα, ο διαμερισμός των σταγονιδίων μπορεί να εντείνει τη διάσπασή τους, και έτσι να αυξηθεί η συνολική επιφάνεια του spray. Η παρουσία μεγάλων δινών αέρα κοντά στο τοίχωμα μπορεί επίσης να ευνοήσει τη διείσδυση αέρα, και να ενισχύσει την ανάμιξη καυσίμου-αέρα. Επιπλέον, η επαφή με ένα θερμό τοίχωμα εντείνει την εξάτμιση. Σε κάποιες μηχανές άμεσης έγχυσης, η δέσμη του καυσίμου κατευθύνεται σκόπιμα προς μια επιφάνεια, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ανάμιξη καυσίμου-αέρα [3].

Τα σχήματα 2.23 και 2.24 απεικονίζουν μια δέσμη spray καυσίμου κωνικής γεωμετρίας, η οποία προσκρούει σε τοίχωμα, και τη χαρακτηριστική περιοχή της ροής της αέριας φάσης γύρω από αυτή. Στο σχήμα 2.25 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη μιας υγρής δέσμης η οποία προσκρούει σε τοίχωμα. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η κύρια περιοχή του jet είναι η πυκνή περιοχή που περιβάλλεται από μια περιοχή αυξημένης διείσδυσης αέρα η οποία περιλαμβάνει σταγονίδια μικρότερου μεγέθους. Όταν το spray προσκρούει στο τοίχωμα, δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός σταγονιδίων στην περιφέρεια του spray, κατά μήκος του τοιχώματος. Το εάν τα σταγονίδια θα παραμείνουν στο τοίχωμα συνεχίζοντας να εξατμίζονται, θα διαμορφώσουν ένα λεπτό υγρό στρώμα, ή ακόμα εάν θα διασπαστούν σε μικρότερα σταγονίδια, εξαρτάται από την κινητική ενέργεια των σταγονιδίων και τη θερμοκρασία του τοιχώματος. Στην περίπτωση μικρών αποστάσεων μεταξύ του

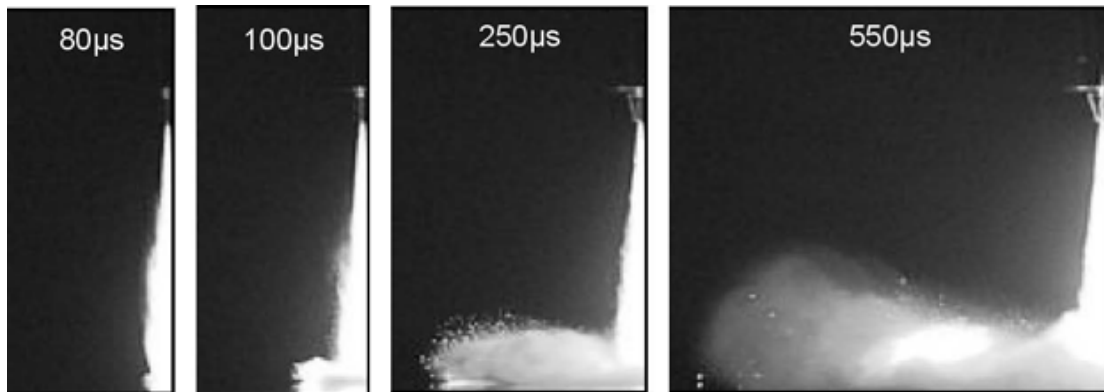
ακροφυσίου και του τοιχώματος καθώς επίσης και υψηλών ρυθμών έγχυσης και ψυχρών τοιχωμάτων, δημιουργείται ένα υγρό λεπτό στρώμα (wall film), βλ. σχήμα 2.23 [3].



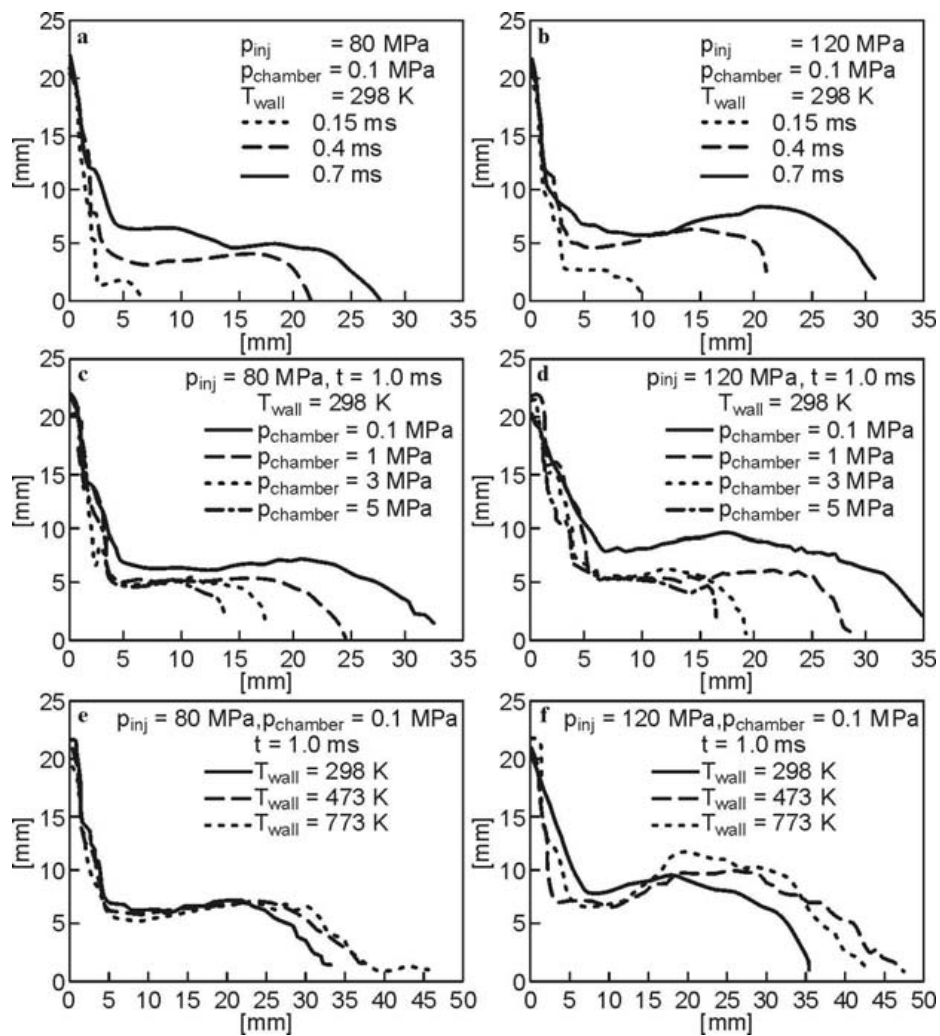
**Σχήμα 2.23.** Σχηματική περιγραφή spray που προσκρούει σε τοίχωμα [3].



**Σχήμα 2.24.** (a) Ροϊκό πεδίο στην περιοχή δέσμης υγρού που προσκρούει σε τοίχωμα, και (b) διανύσματα ταχύτητας των σταγονιδίων [3].



Σχήμα 2.25. Χρονική εξέλιξη της δομής ενός προσκρούοντος σε τοίχωμα spray [3].



Σχήμα 2.26. Επίδραση πίεσης έγχυσης, πίεσης θαλάμου καύσης και θερμοκρασίας τοιχώματος στη δομή spray που προσκρούει σε τοίχωμα [3].

Διάφορες μελέτες [18], [19] έχουν δείξει ότι με αύξηση της πίεσης έγχυσης αυξάνεται η διείσδυση του spray στα τοιχώματα, και ευνοείται η ανάμιξη του αέρα στην υγρή φάση, βλ. σχήματα 2.26a και 2.26b. Η αύξηση της πίεσης του θαλάμου καύσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού διάσπασης του spray, και συνεπώς τη μείωση του ρυθμού πρόσκρουσης του spray στα τοιχώματα, βλ. σχήματα 2.26c και 2.26d. Η αύξηση της θερμοκρασίας του τοιχώματος, βλ. σχήματα 2.26e και 2.26f, μειώνει την ύγρανσή του, και ευνοεί την αναπήδηση των σταγονιδίων λόγω του στρώματος ατμοποιημένου spray που δημιουργείται μεταξύ των σταγονιδίων και του τοιχώματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# Η πειραματική διάταξη του ερευνητικού προγράμματος HERCULES

---

### 3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός των σύγχρονων εγκαταστάσεων πρόωσης, όπως οι μεγάλοι ναυτικοί κινητήρες Diesel, στοχεύει στην ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των εκπομπών ρύπων και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Ο βέλτιστος σχεδιασμός προϋποθέτει την κατανόηση των φαινομένων ροής και καύσης εντός του κυλίνδρου. Σήμερα, η κατανόηση αυτή μπορεί να βασιστεί σε κατάλληλα εργαλεία προσομοίωσης, όπως οι κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD).

Τα περισσότερα θερμοφυσικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στους κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έχουν αναπτυχθεί και επαληθευτεί για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές των (μικρότερων) κινητήρων της αυτοκινητοβιομηχανίας. Έτσι, υπάρχει η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη των μοντέλων για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές σε ναυτικούς κινητήρες, π.χ. σε μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες Diesel [20].

Για παράδειγμα, τα φαινόμενα διφασικής ροής σε μεγάλους ναυτικούς κινητήρες υπόκεινται ουσιαστικά σε διαφορετικές οριακές συνθήκες από τις συνήθως υπάρχουσες σε κινητήρες αυτοκινήτων ή μηχανές Diesel βαρέων συνθηκών λειτουργίας, για τις οποίες έχουν αρχικά δημιουργηθεί τα αντίστοιχα θερμοφυσικά μοντέλα [20], καθώς:

- Σε αντίθεση με τη συνήθως χρησιμοποιούμενη διάταξη σε τετράχρονη μηχανή, το καύσιμο δεν εγχύεται από τον άξονα του κυλίνδρου, αλλά περιφερειακά του θαλάμου καύσης μέσω δύο ή τριών τυπικών εγχυτήρων, οι οποίοι διαθέτουν πολλαπλά στόμια διαφορετικού προσανατολισμού, και ποικίλης διαμέτρου. Συνεπεία της παρουσίας ισχυρής εγκάρσιας συστροφής, η

οποία έχει ως βασικό στόχο την επίτευξη ικανοποιητικής απόπλυσης, οι αλληλεπιδράσεις των δεσμών καυσίμου που προέρχονται από τους μεμονωμένους εγχυτήρες έχουν σημαντική επίδραση στη διεργασία της καύσης.

- Το μέγεθος των μεμονωμένων στομίων κυμαίνεται περί το 1 mm, και έτσι είναι σημαντικά μεγαλύτερο σε σύγκριση με αυτό των μικρότερων κινητήρων (περί τα 0.2 mm).
- Οι ναυτικές μηχανές Diesel λειτουργούν με ένα πολύ μεγάλο εύρος ποιοτήτων καυσίμου, και ακόμη και τα υψηλότερης ποιότητας καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία είναι αρκετά χαμηλότερης ποιότητας από τα συνήθη καύσιμα Diesel.

Επιπλέον, στους ναυτικούς κινητήρες Diesel, οι θερμοδυναμικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της έγχυσης χαρακτηρίζονται από γενικά υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Επομένως, είναι αναμενόμενο τα μοντέλα που αναπτύσσονται, και των οποίων η αξιοπιστία ελέγχεται για κινητήρες αυτοκινήτων, να μην αποδίδουν εξίσου στις πολύ διαφορετικές συνθήκες των ναυτικών κινητήρων Diesel. Έτσι, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η καταλληλότητα των μοντέλων για συνθήκες αντίστοιχες με αυτές στους μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες Diesel [20]. Συγκεκριμένα, απαιτούνται κατάλληλες πειραματικές εγκαταστάσεις, οι οποίες να επιτρέπουν την πειραματική μελέτη των φαινομένων ψεκασμού και καύσης με χρήση οπτικών τεχνικών.

Το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships) είχε ως στόχο την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για τη δραστική μείωση των αέριων και σωματιδιακών εκπομπών από ναυτικούς κινητήρες, με ταυτόχρονη αύξηση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας τους [21]. Έτσι στους στόχους περιλαμβάνονταν η μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, των εκπομπών CO<sub>2</sub>, καθώς και η μείωση του κόστους του κύκλου ζωής των μηχανών [22]. Το πρόγραμμα αποτελείται από διαφορετικά πακέτα εργασίας, τα οποία διαιρούνται σε δύο υποπρογράμματα το καθένα. Η ανάπτυξη της πειραματικής διάταξης έγινε στο υποπρόγραμμα 2.1: “Προσομοίωση διεργασιών καύσης”. Ο γενικός σκοπός του συγκεκριμένου υποπρογράμματος είναι η ανάπτυξη προηγμένων μοντέλων προσομοίωσης (επέκταση και προσαρμογή υπάρχοντων μοντέλων, καθώς επίσης και ανάπτυξη νέων) των βασικών διεργασιών ροής και καύσης σε ναυτικές μηχανές [21], [22].

Η αναπτυχθείσα στο πρόγραμμα HERCULES διάταξη συστήματος έγχυσης σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου είναι αντιπροσωπευτική των συστημάτων καύσης στις μεγάλες σύγχρονες δίχρονες ναυτικές μηχανές Diesel. Η διάταξη επιτρέπει την αδρανή (χωρίς καύση) λειτουργία και, αναφορικά με την ποιότητα του καυσίμου, είναι κατάλληλη και για έγχυση βαρέος καυσίμου [22].

Για να αποφευχθεί η εισαγωγή διαταραχών στο πεδίο ροής, στη διάδοση του spray και στις διεργασίες καύσης και σχηματισμού ρύπων ενδείκνυται η χρήση μη-παραεισφορητικών μεθόδων μέτρησης (οπτικές μέθοδοι laser).

Συνοπτικά, το πλαίσιο της ανάπτυξης του θαλάμου καύσης σταθερού όγκου του προγράμματος HERCULES μπορεί να συνοψισθεί ως εξής [22]:

- *Γενικές προϋποθέσεις*: σχεδιασμός βασισμένος σε μελέτες θερμοδυναμικών μοντέλων, για την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών λειτουργίας.
- *Σχεδιασμός θαλάμου καύσης*: οπτική πρόσβαση, επιθυμητά χαρακτηριστικά εγκάρσιας συστροφής (swirl) και συστήματος έγχυσης καυσίμου.
- *Συνολική διάταξη*: προδιαγραφές και σχεδιασμός επιμέρους διατάξεων και περιφερειακών συστημάτων.
- *Υποστήριξη της ανάπτυξης*: επαναληπτική διαδικασία ανάπτυξης που περιλαμβάνει και προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

### 3.2 Προδιαγραφές

Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες πειραματικές διατάξεις για τη μελέτη φαινομένων έγχυσης καυσίμου υπόκεινται σε περιορισμούς αναφορικά με τις διαστάσεις τους, καθώς και τα επίπεδα μέγιστης πίεσης και θερμοκρασίας [20]. Επιπλέον, για την πειραματική διάταξη του προγράμματος HERCULES, ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση των spray, καθώς και τη χρήση καυσίμων ναυτικών εφαρμογών. Οι προδιαγραφές της αναπτυχθείσας πειραματικής διάταξης είναι οι ακόλουθες [20]:

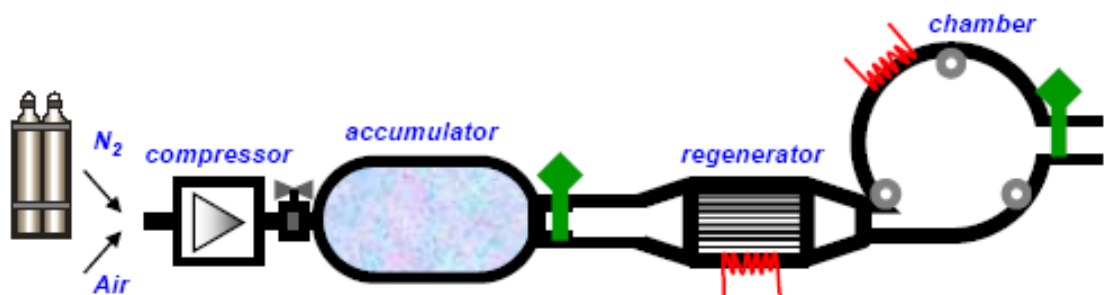
- Θάλαμος καύσης με διαστάσεις αντιπροσωπευτικές των μεγάλων δίχρονων ναυτικών μηχανών Diesel.
- Σύστημα σάρωσης για την παραγωγή εγκάρσιας συστροφής με περιφερειακές ταχύτητες αέρα κατά τη διάρκεια της έγχυσης έως 20 m/s.
- Έγχυση από την περιφέρεια μέσω πολλαπλών εγχυτήρων, σε αντιστοιχία με χαρακτηριστικές διατάξεις μεγάλων ναυτικών κινητήρων, με δύο ή τρεις εγχυτήρες.

- Οπτική πρόσβαση σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος του θαλάμου καύσης, ιδιαίτερα στην περιοχή γύρω από τον εγχυτήρα. Για την εφαρμογή οπτικών τεχνικών laser απαιτείται η εγκατάσταση παραθύρων στον θάλαμο καύσης.
- Επίπεδα πίεσης έως 150 bar κατά τη διάρκεια της έγχυσης.
- Επίπεδα θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της έγχυσης έως 900 °C.
- Δυνατότητα λήψης μετρήσεων τόσο σε συνθήκες “κρύας ροής”, όσο και με παρουσία καύσης.
- Δυνατότητα λειτουργίας με όλες τις συνήθεις ποιότητες καυσίμων ναυτικών εφαρμογών.

### 3.3 Περιγραφή της διάταξης

Η διάταξη η οποία κατασκευάστηκε αποτελείται από τα παρακάτω βασικά τμήματα, βλ. σχήμα 3.1:

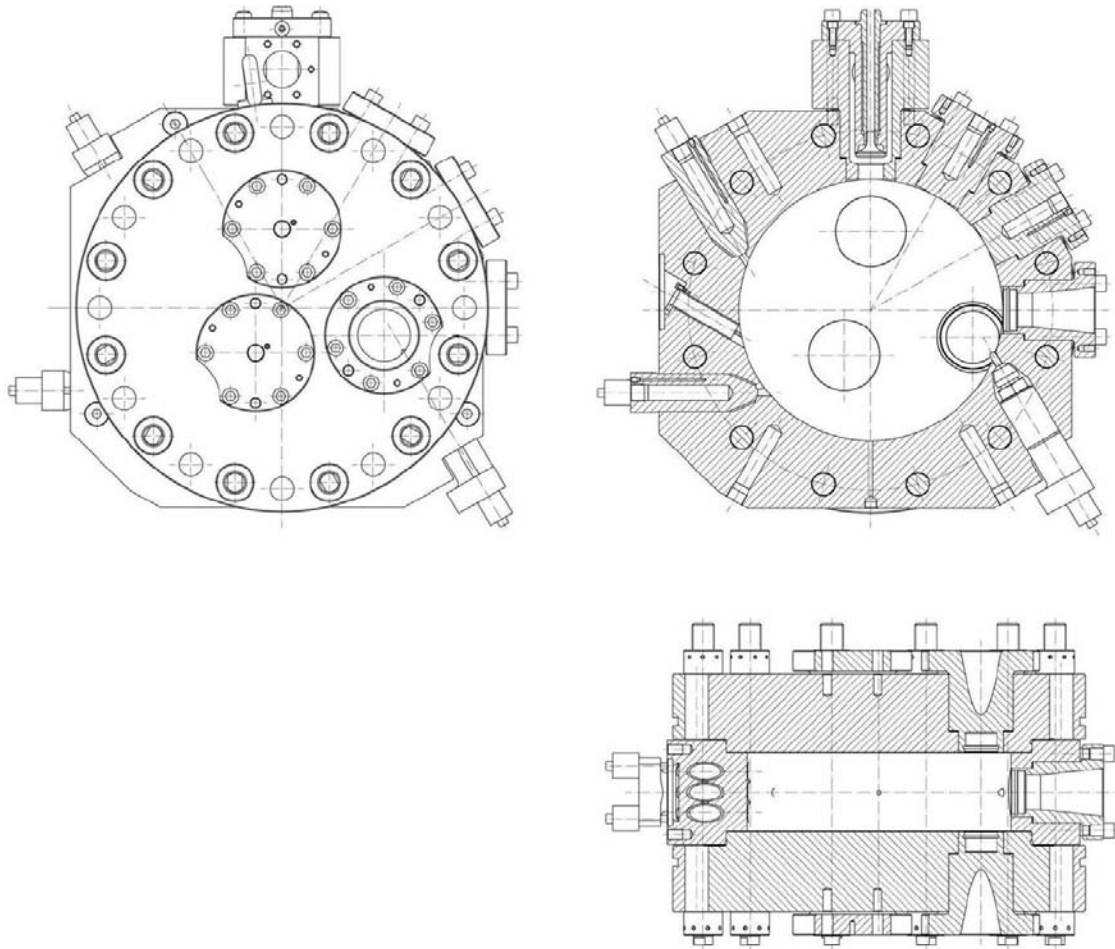
- Συμπιεστής (compressor)
- Αεριοφυλάκιο (accumulator)
- Αναγεννητής (regenerator)
- Θάλαμος καύσης (combustion chamber)
- Σωληνώσεις & βαλβίδες (pipelines, valves)



Σχήμα 3.1. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης [22].



Το σχέδιο του θαλάμου καύσης παρίσταται στο σχήμα 3.2. Το βάθος του θαλάμου είναι 150 mm και η εσωτερική διάμετρος του 500 mm, και είναι αντιπροσωπευτικός μιας εμπορικής δίχρονης ναυτικής μηχανής Diesel (Wärtsilä RT-flex50). Συγχρόνως, εμπίπτει στο εύρος μεγέθους τυπικών μεγάλων τετράχρονων μηχανών (π.χ. Wärtsilä50DF) [20].



**Σχήμα 3.2.** Σχεδιαστική απεικόνιση του θαλάμου καύσης: πλάγια όψη, μέση τομή, κάτοψη σε τομή [20].

Ο θάλαμος καύσης αποτελείται από το κύριο σώμα (δακτύλιος) και δύο επιφάνειες επικάλυψης (κυκλικής μορφής), οι οποίες περιλαμβάνουν τρεις οπές η καθεμία. Στις οπές αυτές, σε κάθε μέτρηση εγκαθίστανται ένα παράθυρο και δύο καλύμματα (που περιέχουν είτε θερμαντικά στοιχεία είτε αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας) σε κάθε πλευρά. Οι τρεις οπές βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις

της ακτίνας των ομόκεντρων κύκλων (επιφάνειες επικάλυψης), σε σχέση με τον άξονα περιστροφής των επιφανειών επικάλυψης, γεγονός που επιτρέπει την παρατήρηση της περιοχής στην άκρη του εγχυτήρα. Προκειμένου να επιτευχθεί οπτική πρόσβαση σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος εντός του θαλάμου καύσης, οι επιφάνειες επικάλυψης και η προσκόλλησή τους στο κύριο σώμα σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να περιστραφούν με αρκετά μικρά βήματα, προσαύξεσης  $15^\circ$ . Στο σχήμα 3.2, για παράδειγμα, φαίνεται η τοποθέτηση του παραθύρου στην εξωτερική ακτινική θέση. Εδώ, οι επιφάνειες επικάλυψης έχουν περιστραφεί, έτσι ώστε η άκρη του εγχυτήρα να είναι στην περιοχή της οπτικής πρόσβασης [20].

Η διάταξη του κύριου σώματος περιλαμβάνει επίσης οπές για την τοποθέτηση παραθύρων σε τρεις διαφορετικές θέσεις προκειμένου να καταστεί εφικτή η χρήση οπτικών τεχνικών μέτρησης. Και πάλι, εάν μια θέση παραθύρου δεν χρησιμοποιείται για οπτική πρόσβαση, υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης καλύμματος, το οποίο μπορεί να διαθέτει είτε πρόσθετους αισθητήρες είτε θερμοαντικαταστάτες [20].

Οι προδιαγραφές των παραθύρων αντιστοιχούν σε αντοχή σε πιέσεις έως 250 bar. Τα παράθυρα των επιφανειών επικάλυψης έχουν διάμετρο 120 mm, δημιουργώντας μια περιοχή οπτικής πρόσβασης διαμέτρου 100 mm, μετά την εγκατάστασή τους στις ειδικά σχεδιασμένες υποδοχές. Οι αντίστοιχες τιμές για τα παράθυρα του κυρίως σώματος είναι 80 και 65 mm [20].

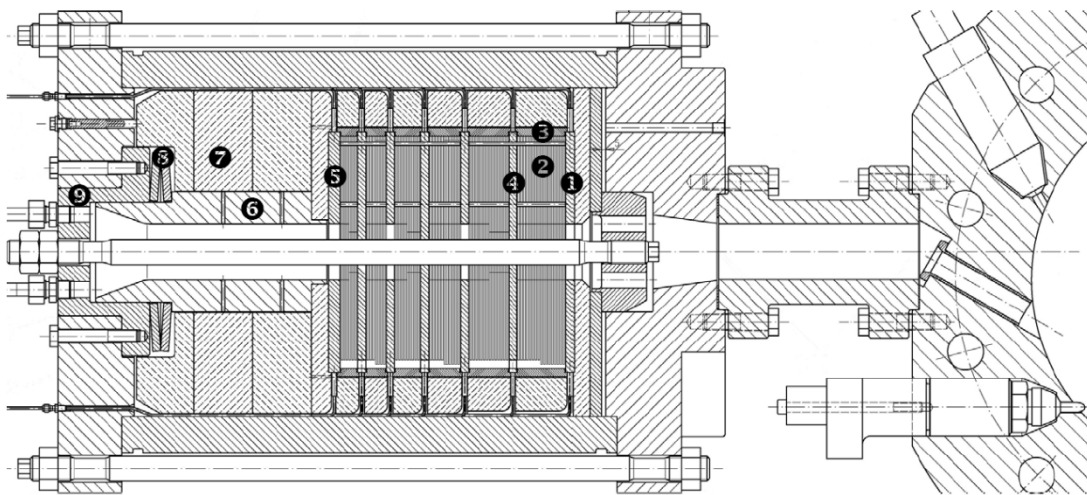
Ο αγωγός εισαγωγής βρίσκεται στο μέσον του ύψους του θαλάμου καύσης, και καταλήγει σε τρεις οπές στη σειρά, οι οποίες μπορούν να εξοπλιστούν με διαφορετικά χιτώνια για την επίτευξη ποικίλων επιπέδων εγκάρσιας συστολής [20].

Για την έγχυση, εφαρμόζεται μια τυπική διάταξη εγχυτήρα μηχανής. Η βασική γραμμή έγχυσης είναι εγκατεστημένη στο κάτω δεξί μέρος του θαλάμου καύσης (σχήμα 3.2). Προκειμένου να είναι εφικτή η μελέτη της αλληλεπίδρασης των δεσμών καυσίμου που προέρχονται από διαφορετικούς εγχυτήρες, υπάρχουν δύο πρόσθετες θέσεις έγχυσης, πάνω και κάτω από τον αγωγό εισαγωγής, με τις οποίες επιτυγχάνεται γωνία  $120^\circ$  και  $180^\circ$  μεταξύ των εγχυτήρων, όπως ακριβώς στις σύγχρονες διατάξεις εγχύσεως με δύο ή τρεις εγχυτήρες, που χρησιμοποιούνται στις δίχρονες ναυτικές μηχανές. Στην περίπτωση που μία ή δύο από αυτές τις θέσεις δεν χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση εγχυτήρα, τοποθετούνται και πάλι καλύμματα, εξοπλισμένα με αισθητήρα ή θερμοαντικαταστάτες [20].

Θέσεις για την τοποθέτηση θερμοαντικαταστατών περιλαμβάνονται επίσης και στις επιφάνειες επικάλυψης. Τα θερμοαντικαταστάτες βρίσκονται μέσα σε χιτώνια (στα παράθυρα των καλυμμάτων), προκειμένου να είναι εύκολη η αφαίρεσή τους. Η θερμοκρασία του κύριου σώματος και των επιφανειών επικάλυψης διατηρείται στους  $200^\circ\text{C}$  περίπου. Ο γενικότερος στόχος είναι η μέγιστη δυνατή μείωση των

απωλειών θερμότητας του θαλάμου καύσης, επιτρέποντας ταυτόχρονα τον ασφαλή χειρισμό των παραθύρων (π.χ. μεταβολή της θέσης τους). Επιπλέον, με τη θέρμανση των τοιχωμάτων, διευκολύνεται στην περίπτωση αδρανούς λειτουργίας η εκκένωση του θαλάμου καύσης από το (άκαυστο) καύσιμο, διαμέσου μιας βαλβίδας (drain valve) που εγκαθίσταται σε στόμιο που βρίσκεται στο κάτω μέρος του θαλάμου [20].

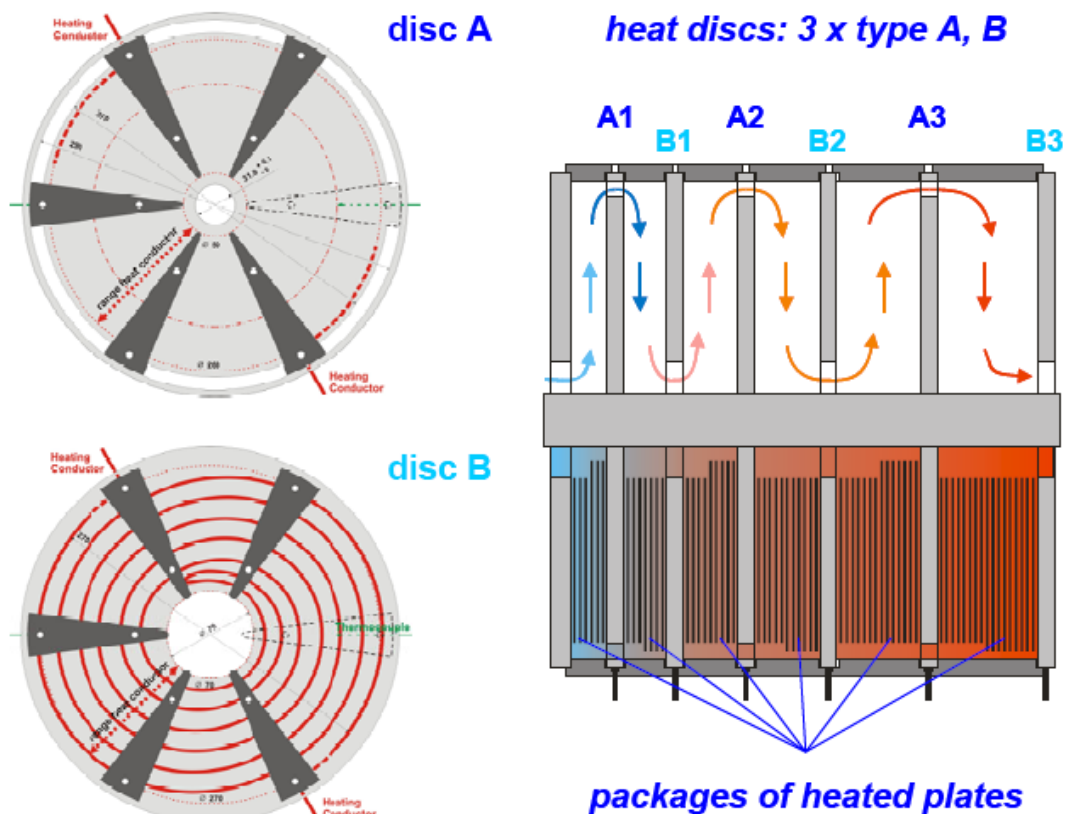
Η βαλβίδα εξαγωγής είναι εγκαταστημένη στην κορυφή του θαλάμου καύσης, και έχει ειδική διαμόρφωση, προκειμένου να λειτουργεί πρόσθετα και ως βαλβίδα ασφαλείας: Ανοίγει προς την πλευρά της εξαγωγής, και ωθείται από έναν πνευματικό κύλινδρο. Επιτρέπει τη διαφυγή των αερίων (blowing-off) σε περίπτωση που η πίεση στον θάλαμο καύσης υπερβεί μια κρίσιμη τιμή [20].



**Σχήμα 3.3.** Ο αναγεννητής και η σύνδεσή του με τον θάλαμο καύσης [20].

Το σχήμα 3.3 απεικονίζει τη διάταξη του αναγεννητή, συμπεριλαμβανομένης της σύνδεσής του στον θάλαμο καύσης. Η φλάντζα σύνδεσης προσφέρει ιδιαίτερη ευελιξία όσον αφορά στην τοποθέτηση των αισθητήρων στην περιοχή αυτή, και στις μετέπειτα πιθανές μεταβολές του αγωγού εισαγωγής.

Ο αναγεννητής αποτελείται από τρία κύρια τμήματα: τον ηλεκτρικά θερμαινόμενο εσωτερικό πυρήνα, το προστατευτικό κάλυμμα και τους κεραμικούς δακτυλίους, τα οποία λειτουργούν ως μονωτικά υλικά. Το προστατευτικό κάλυμμα αποτελείται από έναν αγωγό που τοποθετείται μεταξύ δύο καλυμμάτων, βλ. σχήμα 3.3.

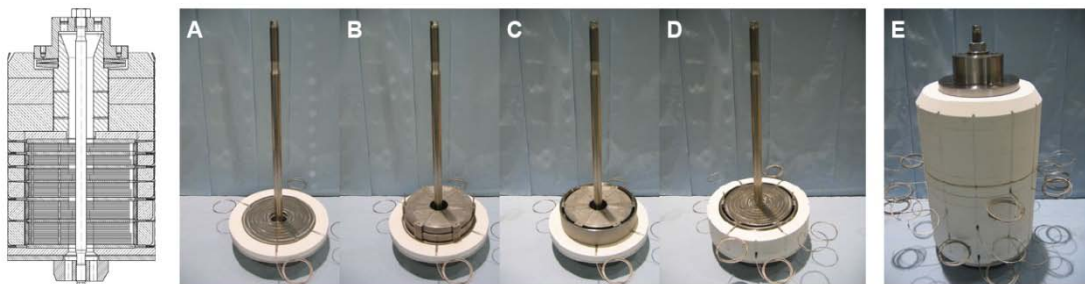


**Σχήμα 3.4.** Σχηματική απεικόνιση διεργασίας θέρμανσης του αερίου στον εσωτερικό πυρήνα του αναγεννητή [23].

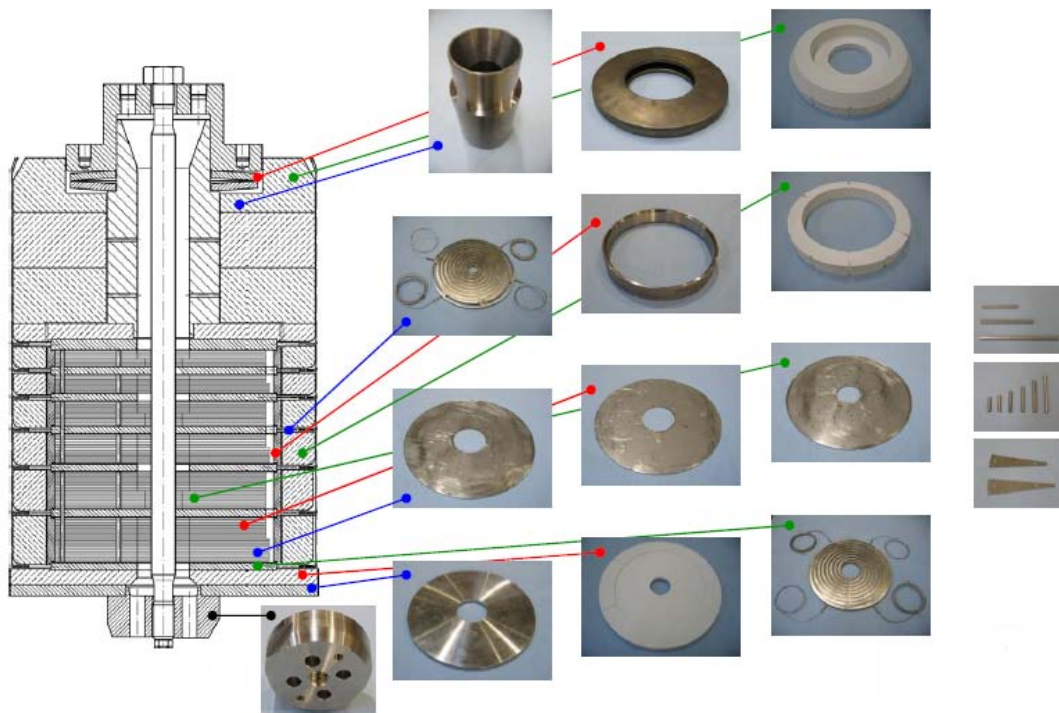
Ο ρόλος του συστήματος αναγεννητή είναι η θέρμανση του αερίου της διεργασίας, το οποίο μπορεί να είναι είτε άζωτο (αδρανής λειτουργία) είτε αέρας (περιπτώσεις καύσης). Μια σχηματική απεικόνιση του εσωτερικού πυρήνα του αναγεννητή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4: ο αναγεννητής αποτελείται από ένα σύνολο θερμικών δίσκων μεταξύ των οποίων είναι τοποθετημένες λεπτές κυκλικές πλάκες. Δύο τύποι θερμικών δίσκων χρησιμοποιούνται (τύπος A: έξι περιβάλλουσες αυλακώσεις, τύπος B: μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρος) προκειμένου να επιτευχθεί ροή τύπου λαβυρίνθου του θερμαινόμενου αερίου μέσα στον αναγεννητή [20]. Η ακτινική κατεύθυνση της ροής μεταξύ δύο γειτονικών θερμικών δίσκων, καθώς επίσης και η μεταφορά θερμότητας από τους δίσκους στις λεπτές κυκλικές πλάκες, επιτυγχάνεται με χρήση τριγωνικών αποστατικών κυκλικών τομέων, που τοποθετούνται μεταξύ των δίσκων και των λεπτών κυκλικών πλακών (σχήμα 3.4). Αυτή η διάταξη έχει ως αποτέλεσμα υψηλές τιμές του λόγου επιφάνειας προς όγκο, προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη μεταφορά θερμότητας από τον θερμαινόμενο πυρήνα προς το αέριο. Η διάταξη μπορεί να θερμανθεί ηλεκτρικά σε θερμοκρασίες

υψηλότερες των 900°C, διαμέσου των θερμικών δίσκων, καθένας από τους οποίους είναι εφοδιασμένος με καλώδιο 6 KW [20].

Τα σχήματα 3.5 και 3.6 απεικονίζουν τα διάφορα εσωτερικά στοιχεία του αναγεννητή, συμπεριλαμβανομένων των διάφορων σταδίων συναρμολόγησης (A-D) και της τελικής συναρμολόγησης (E) του εσωτερικού πυρήνα, ο οποίος στη συνέχεια προσαρμόζεται στο προστατευτικό κάλυμμα. Στο σχήμα 3.3, τα κύρια στοιχεία του αναγεννητή είναι αριθμημένα (1 - 9). Η συναρμολόγηση κατά μήκος της ράβδου στηρίζεται ξεκινώντας με τις πρώτες λεπτές κυκλικές πλάκες, και ακολουθεί ο πρώτος θερμικός δίσκος (1, A). Στη συνέχεια, τοποθετείται η πρώτη συστοιχία των λεπτών κυκλικών πλακών (2, B), η οποία οριοθετείται από έναν δίσκο σταθεροποίησης (3, C). Ο τελευταίος περιβάλλεται από έναν κεραμικό δακτύλιο για την προστασία του εξωτερικού κελύφους. Στο επόμενο στάδιο της συναρμολόγησης, εφαρμόζεται ο δεύτερος τύπος θερμικού δίσκου (4, D), και η διάταξη καταλήγει στον τελευταίο θερμικό δίσκο (5). Ο κυλινδρικός δίσκος (6), οι κεραμικοί δακτύλιοι (7), τα ελατήρια (8) και η φλάντζα (9) ολοκληρώνουν (E) τη διάταξη του πυρήνα του αναγεννητή [20].



**Σχήμα 3.5.** Στάδια συναρμολόγησης του αναγεννητή: (A,D) θερμικοί δίσκοι, (B,C) λεπτές κυκλικές πλάκες, δίσκος σταθεροποίησης, (E) συναρμολογημένος πυρήνας του αναγεννητή [20].



**Σχήμα 3.6.** Απεικόνιση της διάταξης του αναγεννητή με τα διάφορα εσωτερικά του στοιχεία [24].

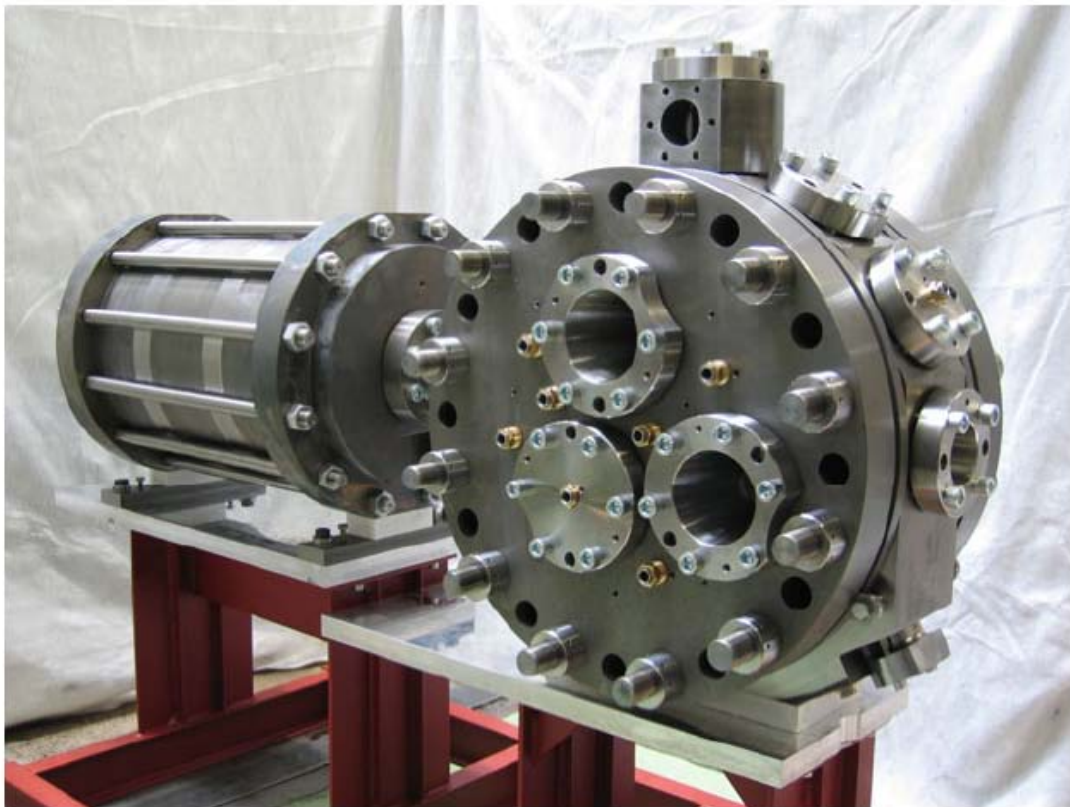
Με κριτήριο την αντοχή και την ασφάλεια της εν λόγω διάταξης, τα κύρια στοιχεία (επιφάνειες επικάλυψης, προστατευτικό κάλυμμα, ράβδοι στηρίξεως) του θαλάμου καύσης καθώς και του αναγεννητή κατασκευάστηκαν από κράμα χάλυβα (X38CrMoV5-1) το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (σε υψηλές θερμοκρασίες), καλή θερμική αγωγιμότητα και καλή συμπεριφορά σε σχέση με τη δημιουργία ρωγμών σε υψηλές θερμοκρασίες [20].

Όλα τα υπόλοιπα σημαντικά στοιχεία της εγκατάστασης (υποδοχείς παραθύρων, καλύμματα) έχουν κατασκευαστεί από ανοπτημένο χάλυβα (30CrNiMo8, 34CrNiMo6 και 34CrMoV5). Τα στοιχεία που υφίστανται τη μεγαλύτερη καταπόνηση (θερμικοί δίσκοι και κυκλικές επιφάνειες του αναγεννητή) αποτελούνται από ειδικά κράματα (Inconel 600, 718 και Nimonic 90, 80A), με υψηλό όριο θραύσης και αντίσταση σε ερπυσμό σε θερμοκρασίες περίπου 900°C, καθώς επίσης και καλή αντίσταση σε διάβρωση και οξείδωση [20].

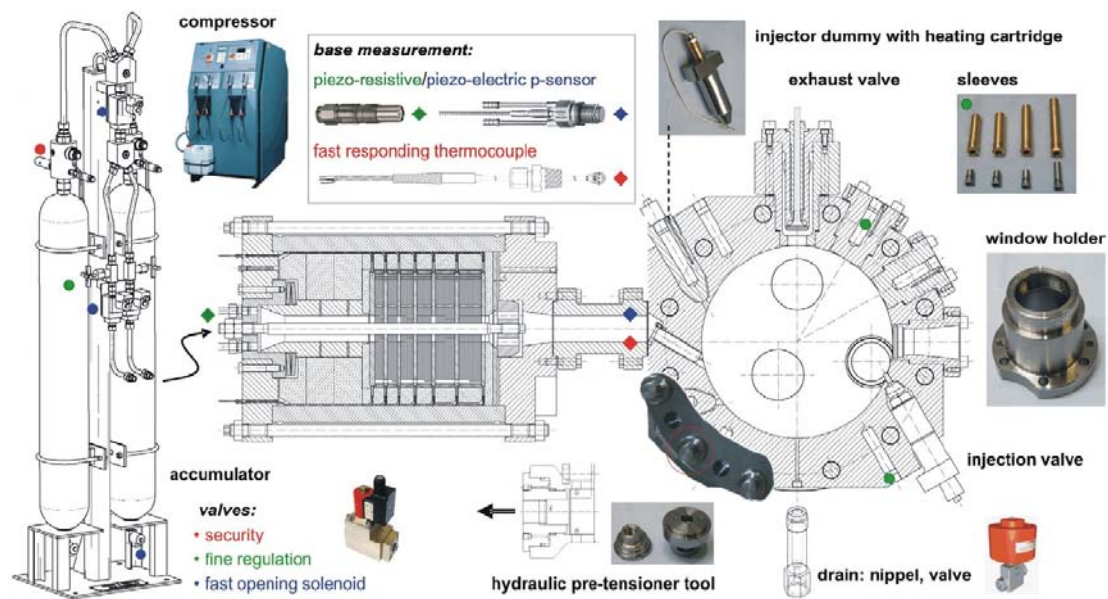
Το σχήμα 3.7 απεικονίζει ολόκληρο τον θάλαμο καύσης με τον αναγεννητή: Το σύστημα έχει διαστάσεις 2 X 1 X 1.5 m, και το βάρος του είναι περίπου 3 τόνοι. Αυτή η διάταξη αντιπροσωπεύει τον πυρήνα της πειραματικής εγκατάστασης, και αποτελείται περίπου από 150 στοιχεία, που με τη σειρά τους αποτελούνται από περίπου 400 διαφορετικά μέρη και περισσότερα από 1000 μεμονωμένα κομμάτια

[20]. Μερικά παραδείγματα τέτοιων στοιχείων και κομματιών δίνονται στο σχήμα 3.8.

Ο αναγεννητής συνδέεται με αεριοφυλάκιο, που αποτελείται από δύο ενιαία δοχεία με όγκο 50 l το καθένα, με αντοχή σε πιέσεις έως 360 bar [20]. Το αεριοφυλάκιο είναι εξοπλισμένο με κατάλληλα εξαρτήματα για την επίτευξη των απαραίτητων παροχών μάζας, και ο σχεδιασμός του έχει γίνει έτσι ώστε να παρέχεται ευελιξία αναφορικά με τον έλεγχο της ροής (ρυθμιστικές βαλβίδες, σωληνοειδείς βαλβίδες) [20]. Η εγκατάσταση είναι κατάλληλα σχεδιασμένη για τον έλεγχο της μέγιστης πίεσης (βαλβίδες ασφαλείας για την εξασφάλιση κατάλληλης και ασφαλούς λειτουργίας).



**Σχήμα 3.7.** Ο θάλαμος καύσης σε σύνδεση με τον αναγεννητή [20].



Σχήμα 3.8. Στοιχεία και εξαρτήματα της εγκατάστασης [20].

Ο συμπιεστής έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει είτε με αέρα είτε με καθαρό άζωτο, και αποδίδει 500  $l_n/min$  (330 bar). Σε συνεργασία με το σύστημα του αεριοφυλακίου, παρέχει επίσης τη δυνατότητα άμεσης σάρωσης του θαλάμου καύσης [20].

Τέλος, χρησιμοποιείται σύστημα κοινού συλλέκτη καυσίμου, αντίστοιχο με αυτό κινητήρων παρόμοιου μεγέθους του τύπου RT-flex. Ο κοινός συλλέκτης τροφοδοτείται με καύσιμο μέσω αντλίας υψηλής πίεσης, και μπορεί να λειτουργήσει σε πιέσεις έως και 1200 bar [20].

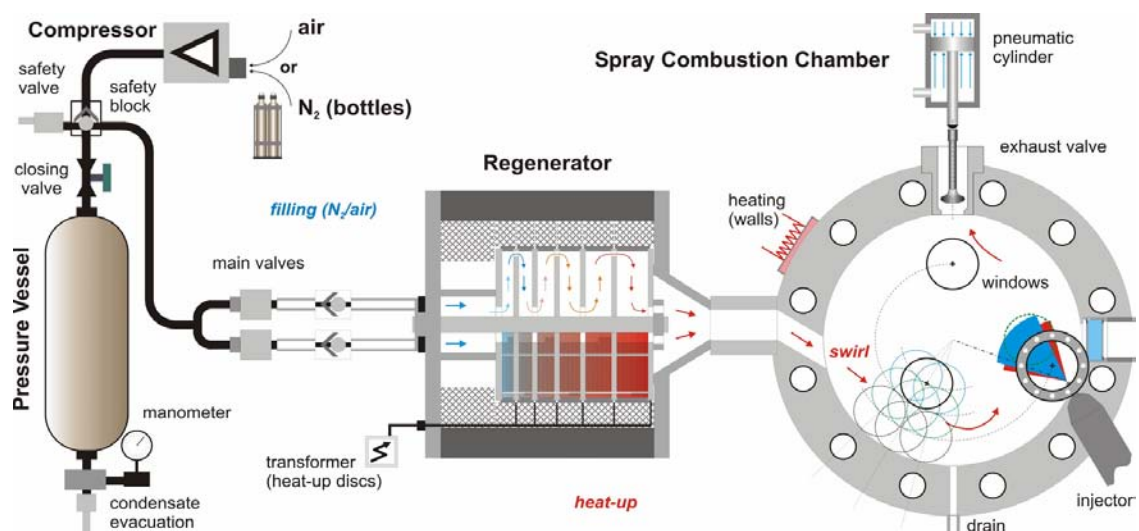
### 3.4 Λειτουργία της διάταξης

Με βάση προκαταρκτικούς υπολογισμούς με χρήση θερμοδυναμικών μοντέλων και μοντέλων CFD, καθορίστηκαν σημαντικά στοιχεία της λειτουργίας της διάταξης. Στο σχήμα 3.9 απεικονίζεται η διάταξη με τα κύρια στοιχεία της, καθώς επίσης και η λειτουργία της [20].

Ακολουθεί η περιγραφή, εν συντομία, ενός τυπικού κύκλου λειτουργίας της διάταξης: Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στον αναγεννητή, ανοίγουν οι κύριες βαλβίδες (μετά το αεριοφυλάκιο), και ανάλογα με την περίπτωση (αδρανής λειτουργία ή καύση), αέρας ή άζωτο θερμαίνεται κατά τη ροή διαμέσου του αναγεννητή. Το αεριοφυλάκιο είναι αρχικά υπό πίεση 200 bar. Λόγω των



χαρακτηριστικών των κύριων βαλβίδων (άνοιγμα/κλείσιμο 80/120 ms), επιτυγχάνεται ταχεία πλήρωση του αναγεννητή. Ο αγωγός μετά τον αναγεννητή απολήγει σε τρεις αγωγούς, οι οποίοι είναι υπό κλίση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία εγκάρσιας συστροφής εντός του θαλάμου καύσης. Η κατάλληλη ρύθμιση της γωνίας κλίσης του αγωγού εισαγωγής επιδρά άμεσα στη δημιουργία εγκάρσιας συστροφής αντιπροσωπευτικής των μεγάλων δίχρονων κινητήρων Diesel. Η ταχύτητα της διαδικασίας πλήρωσης, σε συνδυασμό με τα θερμασμένα τοιχώματα του θαλάμου καύσης, εξασφαλίζουν χαμηλές απώλειες θερμότητας [20].



Σχήμα 3.9. Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της διάταξης [25].

Λίγο πριν επιτευχθεί η επιθυμητή αρχική πίεση στον θάλαμο καύσης, κλείνει η βαλβίδα μετά το αεριοφυλάκιο, και ακολουθεί η έγχυση του καυσίμου. Ο αγωγός εισαγωγής παραμένει ανοιχτός καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας, επιτρέποντας την εκροή αέριου μίγματος από τον θάλαμο καύσης, και συνεπώς την εκτόνωσή του σε επίπεδα πίεσης χαμηλότερα, σε σύγκριση με έναν ισόχωρο (κλειστό) θάλαμο καύσης. Η ροή του καυσαερίου προς τον αναγεννητή συντελεί στην εκ νέου θέρμανσή του.

Τέλος, ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής, και απομακρύνονται τα καυσαέρια από τον θάλαμο καύσης. Ακολούθως, ο αναγεννητής μπορεί να θερμανθεί εκ νέου, και σε χρονικό διάστημα 5-10 λεπτών το αεριοφυλάκιο μπορεί να πληρωθεί με αέρα ή άζωτο, μέσω του συμπιεστή. Το ίδιο, κατά προσέγγιση, χρονικό διάστημα απαιτείται και για την εκ νέου θέρμανση του αναγεννητή μετά από έναν κύκλο λειτουργίας της διάταξης (ενώ για την αρχική θέρμανσή του απαιτούνται μερικές

ώρες) [20], [25]. Έτσι, η διεξαγωγή του πειράματος και η λήψη μετρήσεων μπορούν να επαναληφθούν.

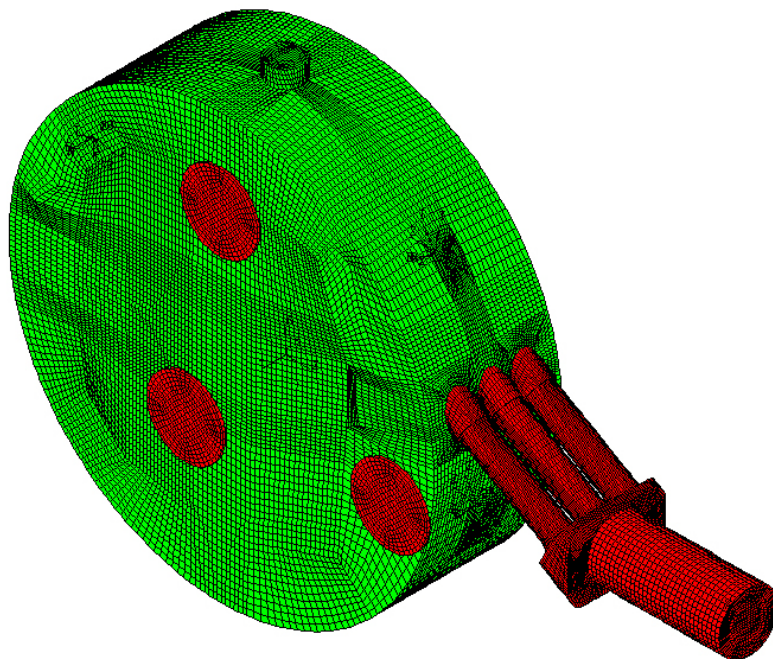
Βασικός στόχος για την ανάπτυξη της διάταξης ήταν η οπτικοποίηση της διασπαστικής ροής και της καύσης εντός του θαλάμου καύσης. Έτσι, όπως προαναφέρθηκε, η διάταξη έχει σχεδιαστεί ώστε να χαρακτηρίζεται από ευελιξία αναφορικά με τη θέση των παραθύρων, σε σχέση με αυτή των εγχυτήρων (η θέση των εγχυτήρων είναι σταθερή). Οι κύκλοι με γκρι χρώμα στο σχήμα 3.9 αντιστοιχούν σε δυνατές θέσεις του ενός παραθύρου, οι οποίες επιτυγχάνονται με περιστροφή της επιφάνειας επικάλυψης [20].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# Προσομοίωση φαινομένων έγχυσης καυσίμου

### 4.1 Εισαγωγή

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της έγχυσης καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Οι εν λόγω υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Star-CD [26], [27], [28]. Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε δεν περιλαμβάνει ολόκληρη την πειραματική διάταξη, παρά μόνο τον θάλαμο καύσης καθώς και τον αγωγό εισαγωγής του αέρα (σχήμα 4.1). Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 340000 υπολογιστικά κελιά.

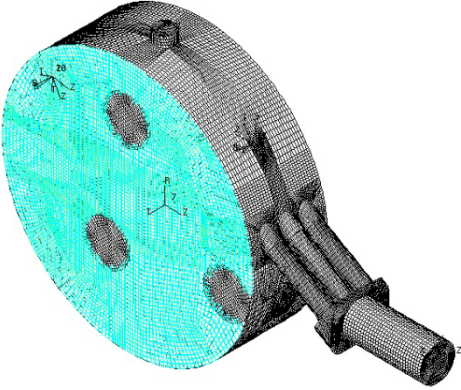
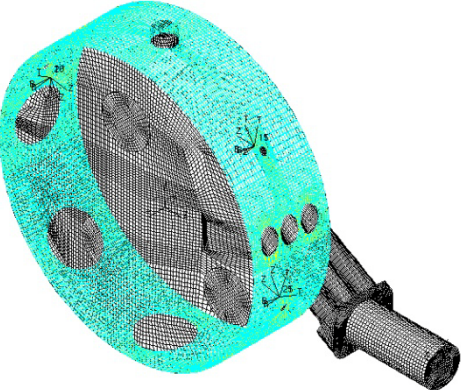
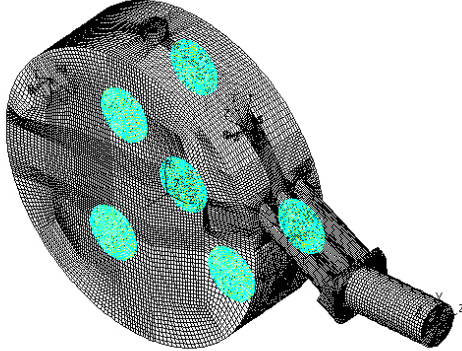
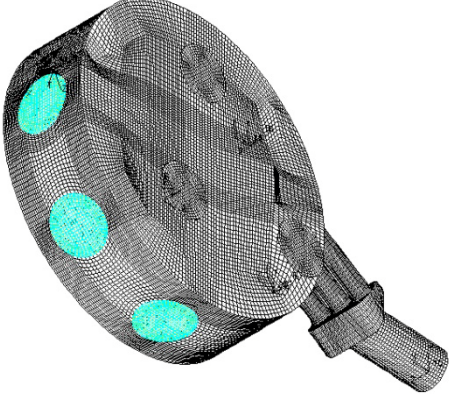


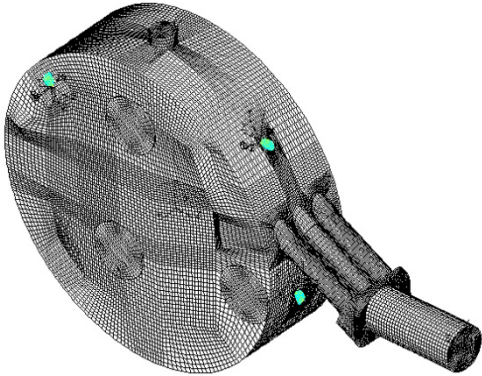
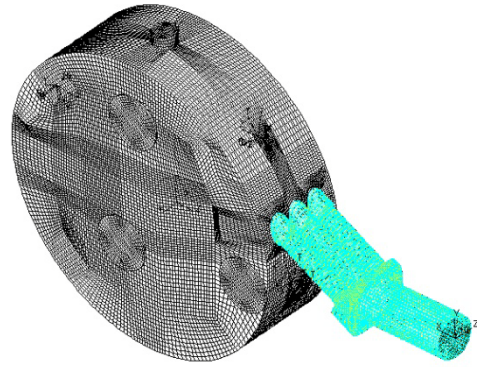
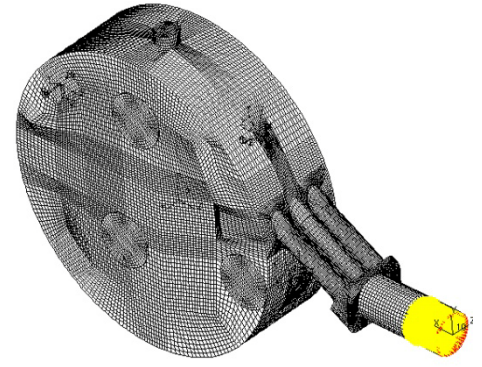
**Σχήμα 4.1.** Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στους παρόντες υπολογισμούς υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Οι υπολογισμοί υπολογιστικής ρευστοδυναμικής πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικούς τύπους καυσίμου (επτάνιο,  $C_7H_{16}$ , και δωδεκάνιο,  $C_{12}H_{26}$ ), και για κάθε έναν απ αυτούς, σε τρεις διαφορετικές συνθήκες πίεσης (65, 90 και 130 bar) εντός του θαλάμου καύσης, χωρίς την παρουσία καύσης (αδρανείς περιπτώσεις). Στις εν λόγω περιπτώσεις έγιναν παραλλαγές του αριθμού των ενεργών εγχυτήρων, και δόθηκε έμφαση στις περιπτώσεις χρήσης δύο εγχυτήρων, προκειμένου οι υπολογισμοί να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικοί μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων. Τέλος, σημειώνεται ότι όλες οι περιπτώσεις που υπολογίστηκαν αφορούν σε μη εξατμιζόμενο (non-*evaporating*) spray καυσίμου. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, μετά από μια γενική περιγραφή των δεδομένων που εισήχθησαν στον κώδικα Star-CD.

#### **4.2 Καθορισμός οριακών συνθηκών**

Στο υπολογιστικό πλέγμα του μοντέλου του θαλάμου καύσης της πειραματικής διάταξης, της οποίας έχει γίνει εκτενής περιγραφή στο Κεφάλαιο 3, καθορίστηκαν οκτώ (8) οριακές περιοχές, και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες τους (σχήμα 4.2). Στις δύο επιφάνειες επικάλυψης και στο κύριο σώμα του θαλάμου καύσης, τίθεται σταθερή θερμοκρασία, ίση με 473 K. Τα παράθυρα των επιφανειών επικάλυψης και του κύριου σώματος του θαλάμου καύσης καθώς και οι εγχυτήρες θεωρούνται αδιαβατικές επιφάνειες. Στα τοιχώματα του αγωγού εισαγωγής του αέρα (συμπεριλαμβανομένων και των τριών μικρότερων κεκλιμένων αγωγών), τίθεται σταθερή θερμοκρασία 423 K. Τέλος, στην εισαγωγή του αέρα τίθεται θερμοκρασία ίση με 900 K.

	<p><b>Επιφάνειες επικάλυψης</b> <b>T = 473 K = σταθερή</b></p>
	<p><b>Κύριο σώμα</b> <b>T = 473 K = σταθερή</b></p>
	<p><b>Παράθυρα επιφανειών επικάλυψης</b> <b>Αδιαβατικές επιφάνειες</b></p>
	<p><b>Παράθυρα κύριου σώματος</b> <b>Αδιαβατικές επιφάνειες</b></p>

	<p><b>Εγχυτήρες</b> <b>Αδιαβατικές επιφάνειες</b></p>
	<p><b>Αγωγός εισαγωγής αέρα</b> <b>T = 423 K = σταθερή</b></p>
	<p><b>Εισαγωγή αέρα</b> <b>Αρχική συνθήκη:</b> <b>T = 900 K = σταθερή</b></p>

**Σχήμα 4.2.** Σχηματική απεικόνιση οριακών περιοχών και σύνοψη των αντίστοιχων οριακών συνθηκών.

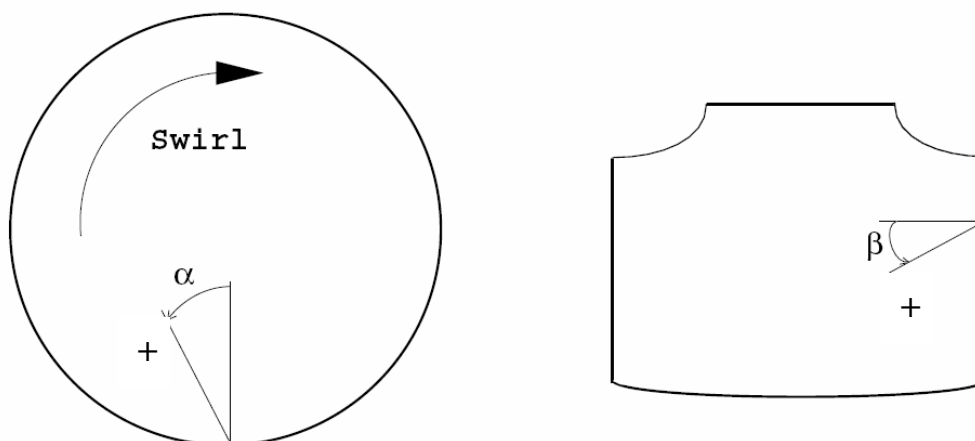
### 4.3 Ρυθμίσεις έγχυσης

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως (Κεφάλαιο 3), ο εξεταζόμενος θάλαμος καύσης είναι αντίστοιχος μιας μικρότερης εμπορικής δίχρονης ναυτικής μηχανής Diesel (Wärtsilä RT-flex50). Έτσι, η γεωμετρία των εγχυτήρων που εισήχθησαν στο

μοντέλο είναι και αυτή αντίστοιχη, και παρουσιάζεται στον πίνακα του σχήματος 4.3. Οι τρεις εγχυτήρες, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερος διασκορπισμός του καυσίμου στον θάλαμο καύσης, διαθέτουν πέντε οπές, ο καθένας, με τις διαμέτρους των στομιών καθώς και τις γωνίες έγχυσης  $\hat{\alpha}$  και  $\hat{\beta}$  να ποικίλουν. Η προσήμανση των γωνιών έγχυσης καθώς και ο ορισμός τους παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4.

Οπή	1	2	3	4	5
Διάμετρος στομίου (mm)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
$\hat{\alpha}$ (°)	-	+	+	+	+
$\hat{\beta}$ (°)	+	+	+	+	+

**Σχήμα 4.3.** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εγχυτήρων.



**Σχήμα 4.4.** Ορισμός γωνιών έγχυσης  $\hat{\alpha}$  και  $\hat{\beta}$ .

Στο πλαίσιο της αντιστοίχισης του εξεταζόμενου θαλάμου καύσης σταθερού όγκου με μεγάλους δίχρονους κινητήρες Diesel, θα υπολογιστεί η χρονική διάρκεια της έγχυσης. Στους εν λόγω κινητήρες, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφάλου αντιστοιχεί σε περίπου 100 RPM (πλήρεις περιστροφές ανά λεπτό). Εδώ, θεωρούμε αριθμό στροφών ίσο με 105 RPM. Σε πλήρες φορτίο, η έγχυση διαρκεί περίπου 15° γωνίας στροφάλου. Επομένως, ο προσδιορισμός της χρονικής διάρκειας της έγχυσης έχει ως εξής:

$$\omega = 105 \frac{\text{revolution}}{\text{min}} \cdot 360 \frac{^{\circ}\text{CA}}{\text{revolution}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \Rightarrow \omega = 630 \frac{^{\circ}\text{CA}}{\text{s}}$$

$$t = \frac{15}{630} \text{ s} \Rightarrow t = 0.0238 \text{ s}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προέκυψε ο χρόνος που απαιτείται για να περιστραφεί ο στρόφαλος του δίχρονου κινητήρα παραγωγής κατά 15°, και άρα και η τιμή της χρονικής διάρκειας της έγχυσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση του θαλάμου καύσης σταθερού όγκου.

Ο ρυθμός έγχυσης μάζας ορίστηκε για κάθε οπή του εγχυτήρα ξεχωριστά, με βάση τη διάμετρό της, και η τιμή του παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της έγχυσης. Στον πίνακα του σχήματος 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές του ρυθμού έγχυσης μάζας, και λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική διάρκεια της έγχυσης υπολογίζεται τελικά η συνολική εγχυόμενη μάζα καυσίμου ανά εγχυτήρα.

Οπή	1	2	3	4	5
Ρυθμός έγχυσης μάζας (kg/s)	0.150	0.142	0.135	0.128	0.114
Μάζα (kg)	0.003571	0.003381	0.003214	0.003048	0.002714
				Μάζα καυσίμου/εγχυτήρα (gr)	15.929

**Σχήμα 4.5.** Ρυθμός έγχυσης μάζας για κάθε οπή και συνολική μάζα καυσίμου ανά εγχυτήρα.

Το spray καυσίμου εγχύεται σε θερμοκρασία 300 K, και ο μηχανισμός πρωτογενούς διάσπασης μοντελοποιείται μέσω του μοντέλου Huh [29], ενώ ο μηχανισμός δευτερογενούς διάσπασης μέσω του μοντέλου Reitz [30].

- Μοντέλο Huh:

Σύμφωνα με το μοντέλο Huh, η διεργασία του διασκορπισμού της υγρής δέσμης καυσίμου σε μορφή spray διακρίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, η τύρβη που αναπτύσσεται στην περιοχή λίγο πριν την οπή του εγχυτήρα προκαλεί διαταραχές στη ροή του καυσίμου, καθώς αυτό εξέρχεται από την οπή. Όταν οι διαταραχές αυτές της ροής φθάσουν ένα ορισμένο επίπεδο, αρχίζουν να αυξάνονται εκθετικά υπό την επίδραση αεροδυναμικών δυνάμεων, οι οποίες αναπτύσσονται από το περιβάλλον αέριο, έως ότου τμήματα της υγρής δέσμης να αποκοπούν από τη ροή του καυσίμου και να καταλήξουν σε μεμονωμένα σταγονίδια.



- Μοντέλο Reitz:

Σύμφωνα με το μοντέλο Reitz, θεωρούνται δύο μηχανισμοί διάσπασης του σταγονιδίου, ο μηχανισμός “bag break-up” και ο μηχανισμός “stripping break-up”, βλ. παράγραφο 2.2.4.1.

Στον μηχανισμό bag break-up, το κριτήριο αστάθειας και τελικής διάσπασης ενός σταγονιδίου καθορίζεται από τη σχέση:

$$We = \frac{u_{rel}^2 d \rho_g}{2\sigma} \geq C_{b1}, \text{ όπου } C_{b1} = 3.6 \div 8.4 \text{ (} C_{b1} = 6 \text{ στους παρόντες υπολογισμούς).}$$

Ο χρόνος έως τη διάσπαση του σταγονιδίου είναι:

$$\tau_b = C_{b2} \frac{\rho_l^{1/2} d^{3/2}}{4\sigma^{1/2}}, \text{ όπου } C_{b2} \approx \pi.$$

Στον μηχανισμό stripping break-up, το κριτήριο αστάθειας και τελικής διάσπασης ενός σταγονιδίου είναι:

$$\frac{We}{Re} \geq C_{s1}, \text{ όπου } C_{s1} = 0.5 ,$$

ενώ ο χρόνος έως τη διάσπαση του σταγονιδίου είναι:

$$\tau_b = \frac{C_{s2}}{2} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} \frac{d}{u_{rel}}, \text{ όπου } C_{s2} = 2 \div 20 \text{ (} C_{s2} = 20 \text{ στους παρόντες υπολογισμούς).}$$

Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι καυσίμου, το επτάνιο ( $C_7H_{16}$ ) και το δωδεκάνιο ( $C_{12}H_{26}$ ). Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δύο καυσίμων, όπως δίνονται από τη βάση δεδομένων του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Star-CD, παρουσιάζονται στα σχήματα 4.6 και 4.7.

Generic Name		Variable Properties						
# HEPTANE(L)		Property values apply at the following conditions:						
Chemical Formula		Reference Temperature	298.15	K	Reference Pressure	1.01325e+05	Pa	
C7H16_I		Property Values						
<b>Constant Properties</b>		Density	678.308	kg/m <sup>3</sup>	Saturation Pressure	6102.6	Pa	
Molecular Weight	100	kg/kmol	Beta	0.0012741	1/K	Saturation Temperature	371.57	K
Critical Temperature	540.15	K	Specific Heat	2246.95	J/kgK	Heat of Vapourization	3.65754e+05	J/kg
Critical Pressure	2.736e+06	Pa	Molecular Viscosity	0.0003921	kg/ms	Surface Tension Coefficient	0.0197017	N/m
Temperature of Formation	298.15	K	Thermal Conductivity	0.122387	W/mK	Mass Diffusivity (into air)	0	m <sup>2</sup> /s
Heat of Formation	-1.87216e+0	J/kg	Speed of Sound	0	m/s			
Boiling Temperature	371.57	K						

Σχήμα 4.6. Θερμοφυσικές ιδιότητες του επτανίου.

Generic Name		Variable Properties						
# DODECANE(L)		Property values apply at the following conditions:						
Chemical Formula		Reference Temperature	298.15	K	Reference Pressure	1.01325e+05	Pa	
C12H26_I		Property Values						
<b>Constant Properties</b>		Density	745.756	kg/m <sup>3</sup>	Saturation Pressure	18.5476	Pa	
Molecular Weight	170	kg/kmol	Beta	0.0009727	1/K	Saturation Temperature	489.48	K
Critical Temperature	658.65	K	Specific Heat	2203.67	J/kgK	Heat of Vapourization	3.56694e+05	J/kg
Critical Pressure	1.835e+06	Pa	Molecular Viscosity	0.0013756	kg/ms	Surface Tension Coefficient	0.0248679	N/m
Temperature of Formation	298.15	K	Thermal Conductivity	0.134905	W/mK	Mass Diffusivity (into air)	0	m <sup>2</sup> /s
Heat of Formation	-1.69896e+0	J/kg	Speed of Sound	0	m/s			
Boiling Temperature	489.48	K						

Σχήμα 4.7. Θερμοφυσικές ιδιότητες του δωδεκάνιου.

Για καθένα από τα παραπάνω καύσιμα έγιναν υπολογισμοί για τρεις διαφορετικές συνθήκες πίεσης εντός του θαλάμου καύσης. Οι αντίστοιχες τιμές είναι 65, 90 και 130 bar, με την αρχική θερμοκρασία του αέρα σταθερή στους 900 K. Στον πίνακα του σχήματος 4.8 συνοψίζονται τα κύρια δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση, καθώς και οι προκύπτουσες τιμές των αριθμών Weber και Ohnesorge αντιπροσωπευτικών σταγονιδίων καυσίμου.

Θερμοκρασία τοιχωμάτων θαλάμου καύσης	473 K = σταθερή
Θερμοκρασία τοιχωμάτων αγωγού εισαγωγής αέρα	423 K = σταθερή
Επιφάνειες παραθύρων και εγχυτήρων	Αδιαβατικές
Θερμοκρασία αέρα εισαγωγής	900 K
Αρχική πίεση θαλάμου καύσης	65, 90, 130 bar
Αρχική θερμοκρασία θαλάμου καύσης	900 K
Τύπος χρησιμοποιούμενου καυσίμου	$C_7H_{16}$ , $C_{12}H_{26}$
Διάρκεια έγχυσης	0.0238 s
Εγχυόμενη μάζα ανά εγχυτήρα	15.929 gr
Μοντέλο πρωτογενούς διάσπασης	Huh
Μοντέλο δευτερογενούς διάσπασης	Reitz
Αριθμός κελιών υπολογιστικού πλέγματος	340000

	Πίεση (bar)	Αριθμός Weber	Αριθμός Ohnesorge
$C_7H_{16}$	60	10825	0.0112
	95	14810	0.0112
	130	21185	0.0112
$C_{12}H_{26}$	65	7095	0.0332
	90	9707	0.0332
	130	13885	0.0332

**Σχήμα 4.8.** Σύνοψη των κύριων δεδομένων της αριθμητικής προσομοίωσης, καθώς και αντιπροσωπευτικές τιμές των αδιάστατων αριθμών Weber και Ohnesorge. Οι τελευταίες υπολογίστηκαν για τη διεργασία της δευτερογενούς διάσπασης, στην οποία θεωρήθηκαν σταγονίδια με διάμετρο ίση προς το 10% της διαμέτρου μιας τυπικής οπής του ακροφυσίου.

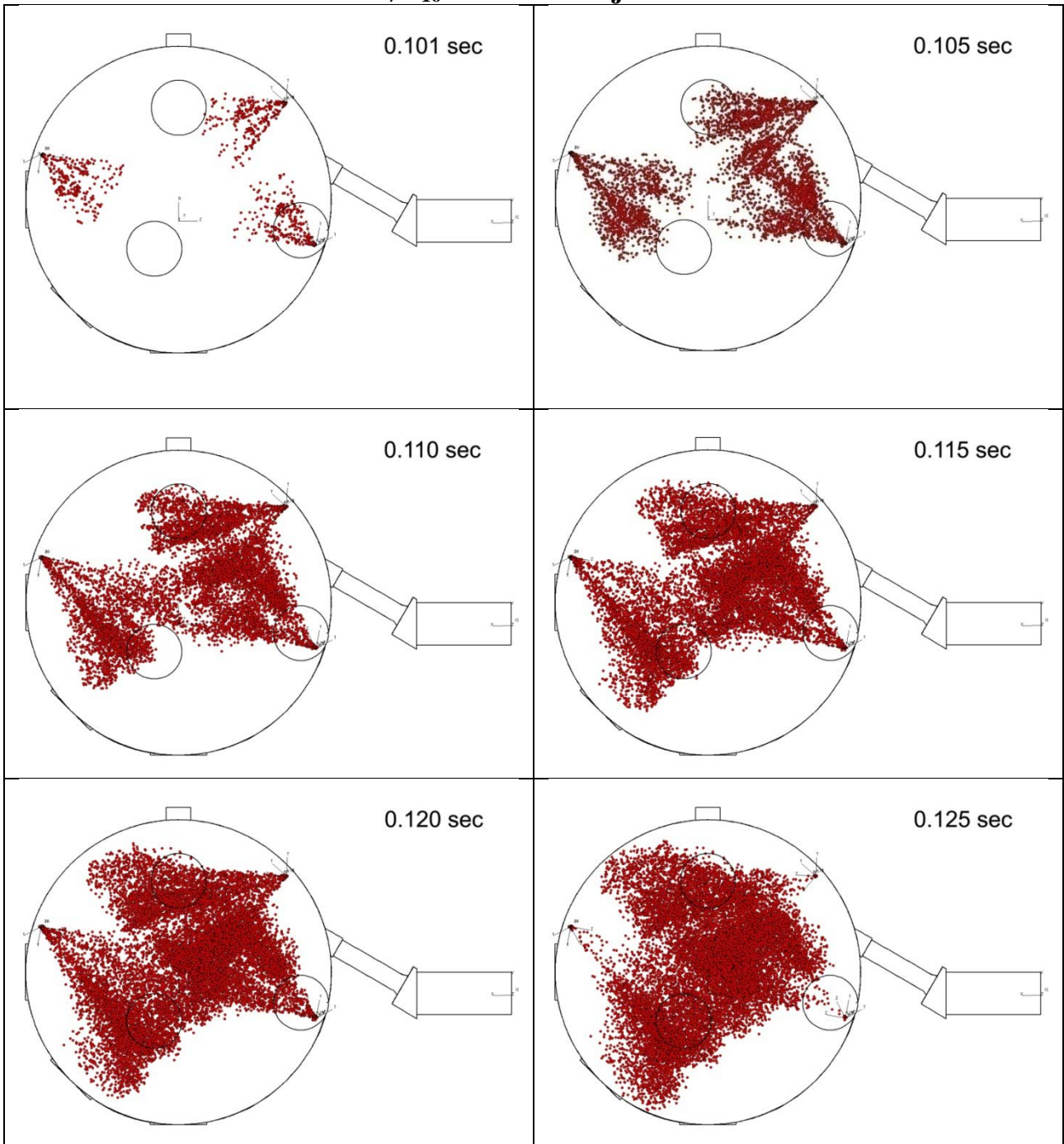
#### 4.4 Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

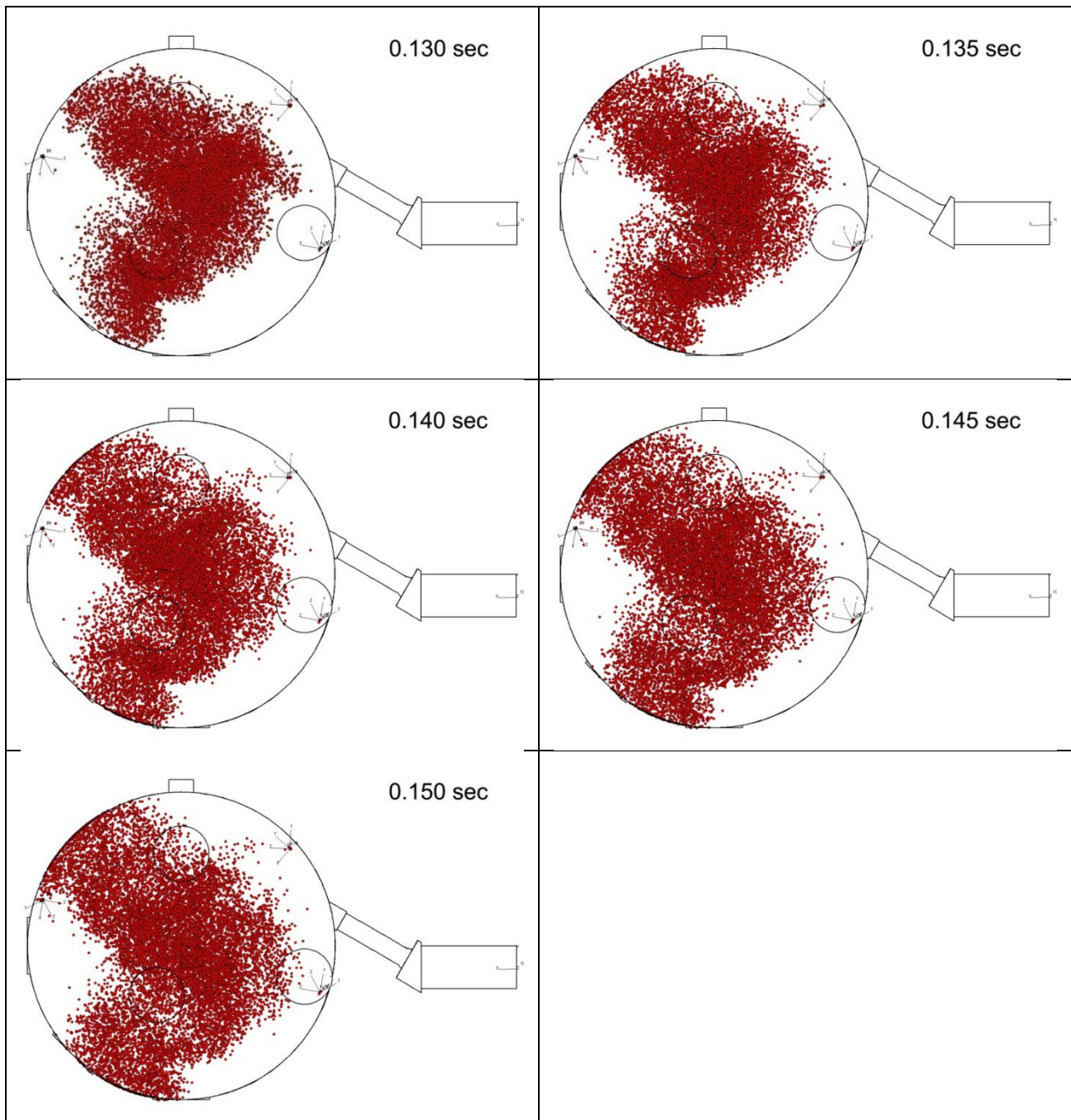
Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, ο θάλαμος καύσης της διάταξης διαθέτει τρεις εγχυτήρες. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ορίστηκε ως χρονικό σημείο της έναρξης του ψεκασμού η στιγμή  $t = 0.1$  s, ενώ το μοντέλο πραγματοποιεί υπολογισμούς συνολικά για 0.15 s. Αυτό σημαίνει ότι μέχρι το χρονικό σημείο  $t = 0.1$  s προσομοιώνεται η ροή αέρα στον θάλαμο καύσης, ενώ ο ψεκασμός του καυσίμου ξεκινά ακριβώς σε αυτό το χρονικό σημείο και διαρκεί 0.0238 s. Το μοντέλο πραγματοποιεί υπολογισμούς μέχρι  $t = 0.15$  s, οπότε και η προσομοίωση ολοκληρώνεται.

##### 4.4.1 Έγχυση επτανίου, με χρήση τριών εγχυτήρων

Στα σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11 απεικονίζεται η έγχυση για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις (65, 90 και 130 bar), με χρήση επτανίου ( $C_7H_{16}$ ). Σε αυτές τις προσομοιώσεις είναι ενεργοί και οι τρεις εγχυτήρες, που διαθέτει η εγκατάσταση, ενώ οι απεικονίσεις της έγχυσης παρουσιάζονται ανά 0.005 s.

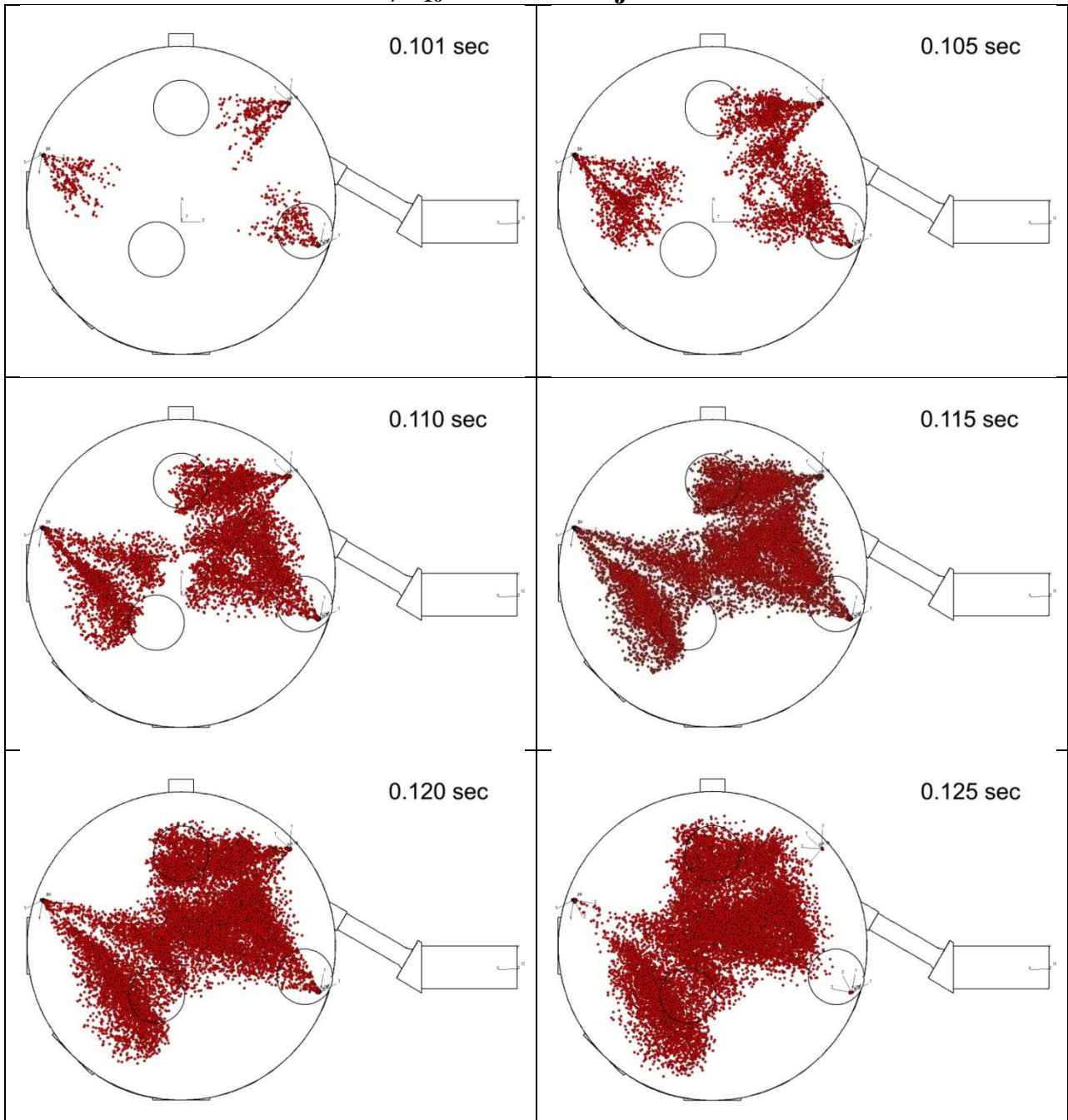
**C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> 65 bar 3 injectors**

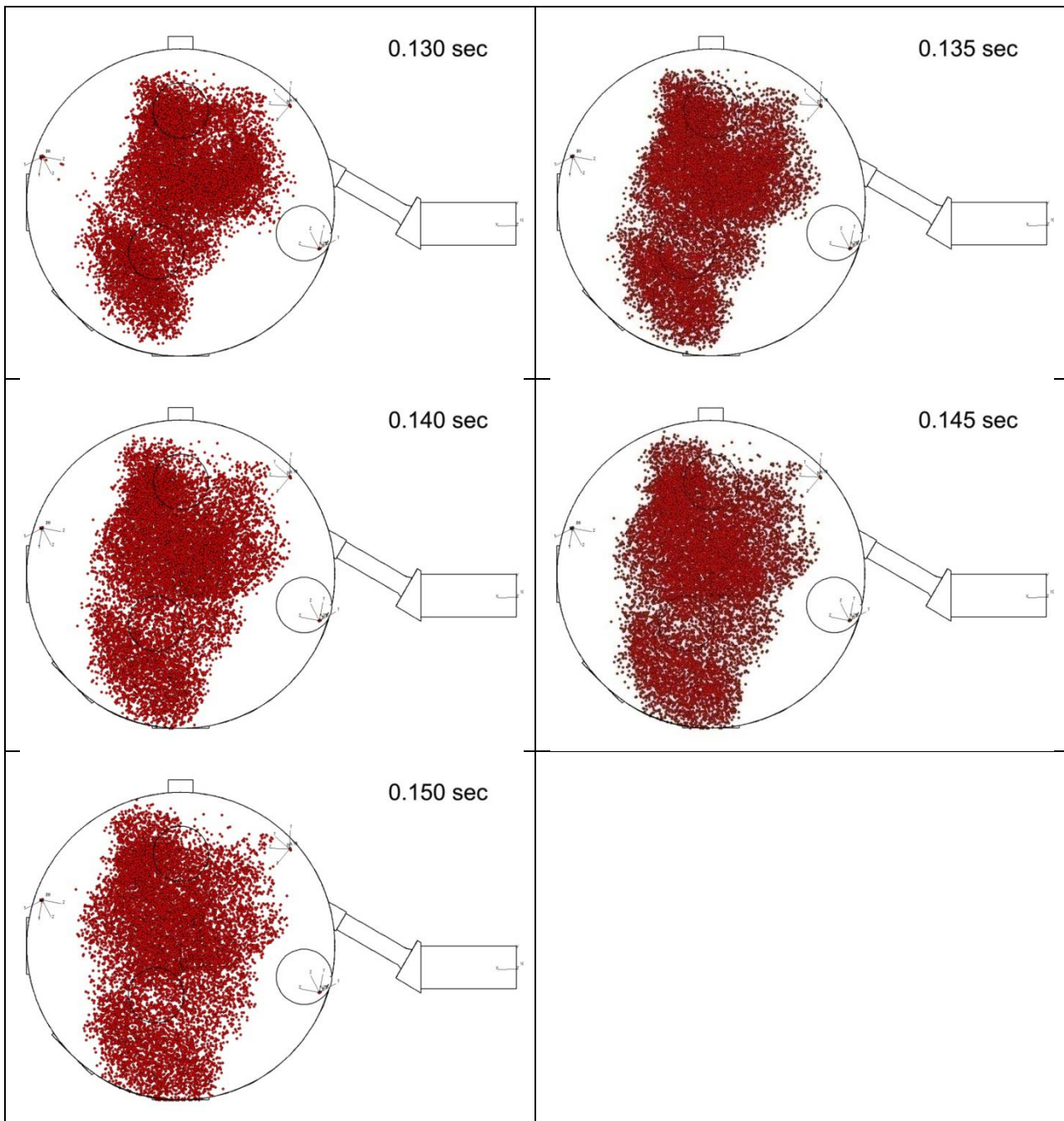




Σχήμα 4.9. Απεικόνιση έγχυσης  $C_7H_{16}$  στα 65 bar με τρεις εγχυτήρες.

**C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> 90 bar 3 injectors**

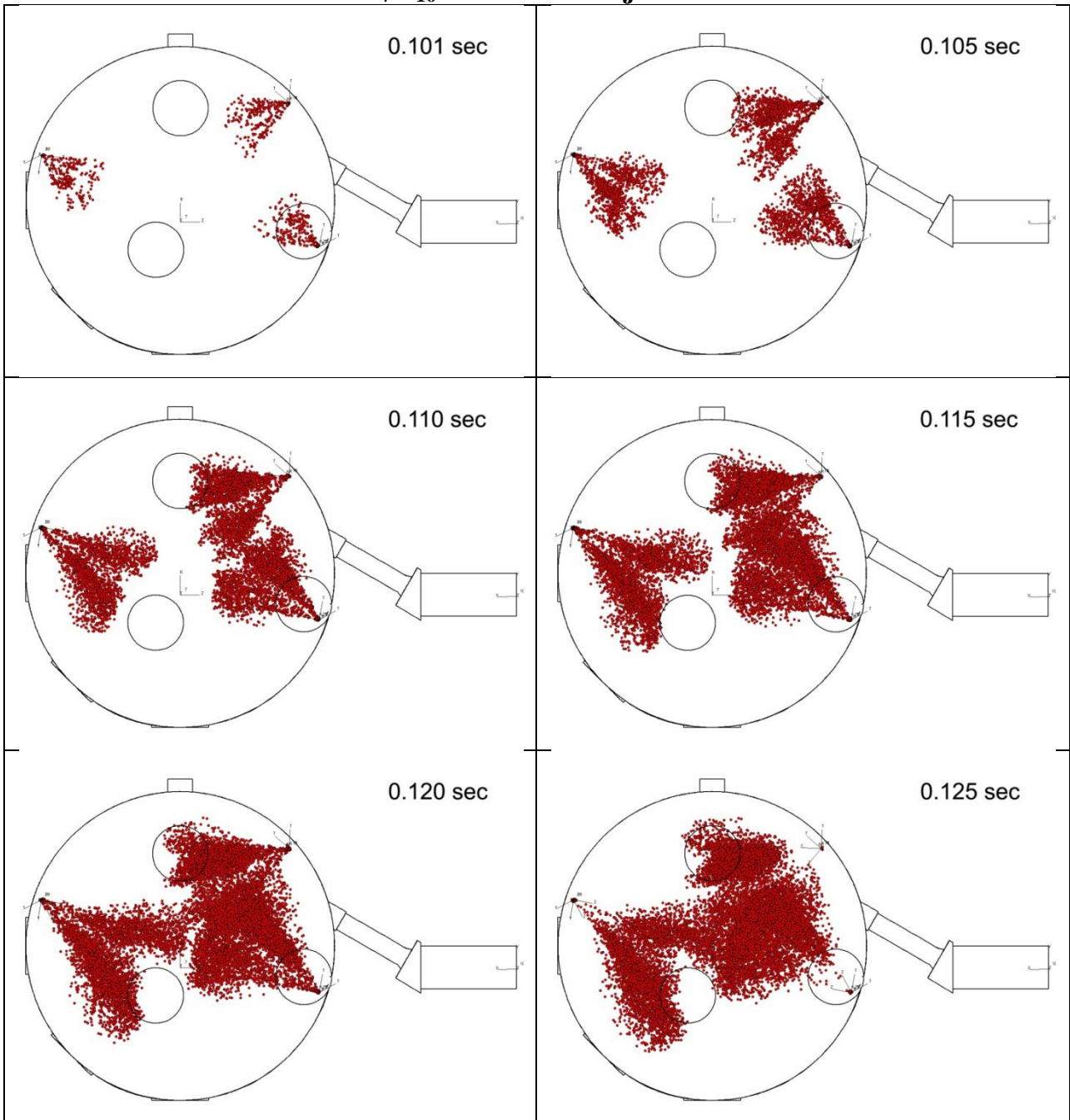


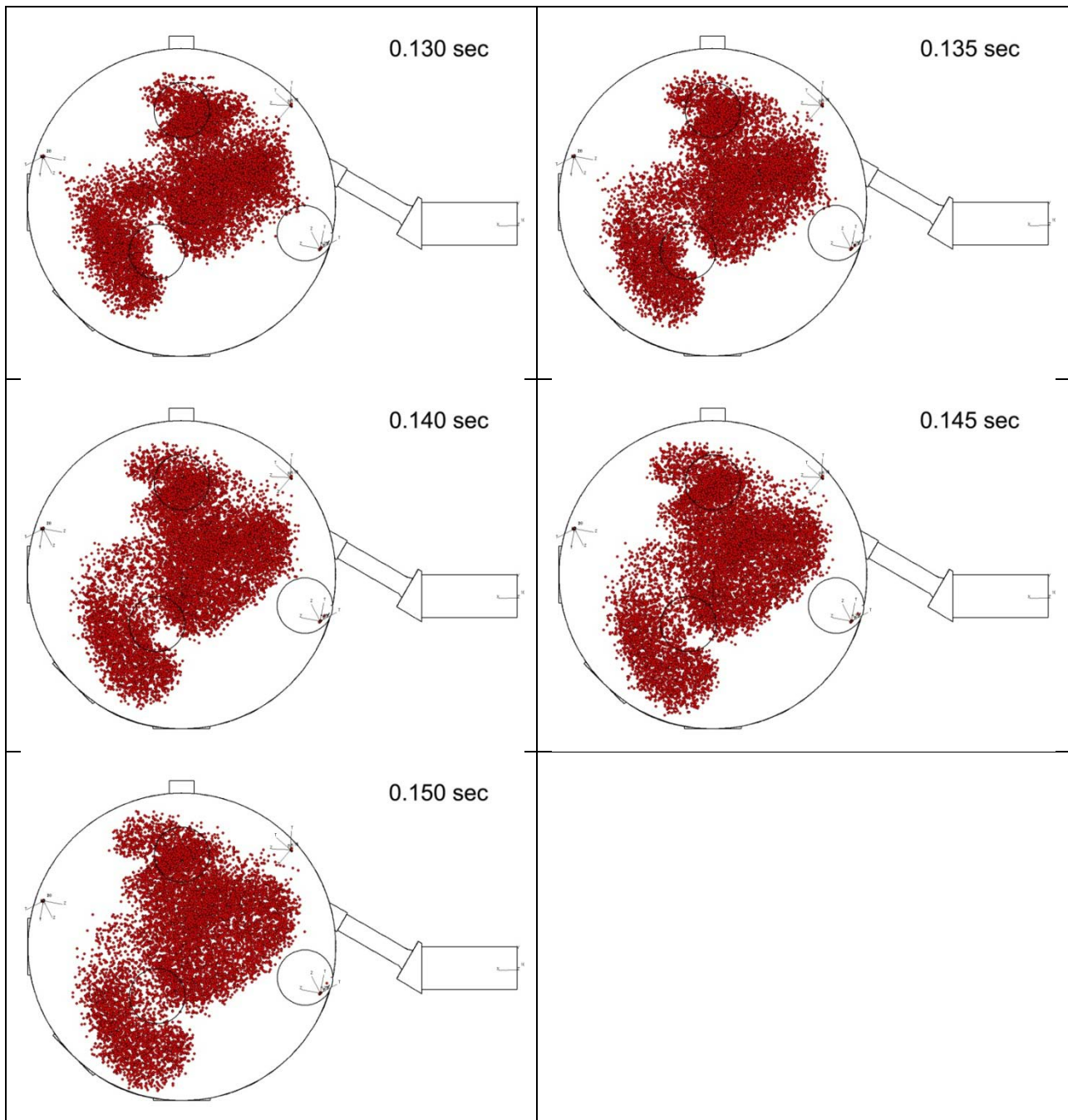


Σχήμα 4.10. Απεικόνιση έγχυσης  $C_7H_{16}$  στα 90 bar με τρεις εγχυτήρες.



**C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> 130 bar 3 injectors**

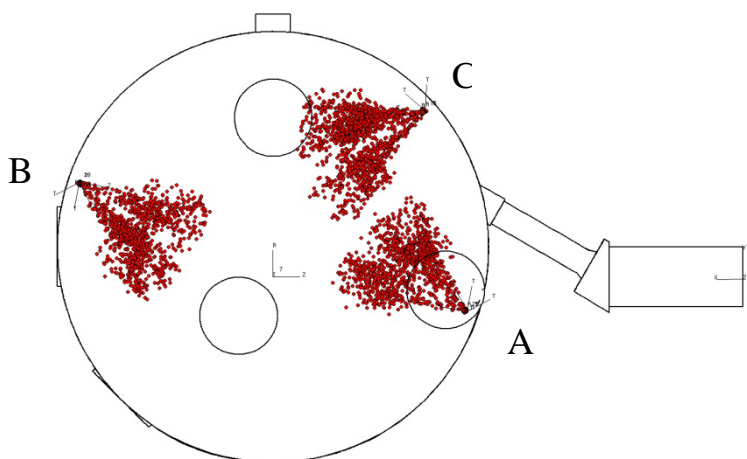




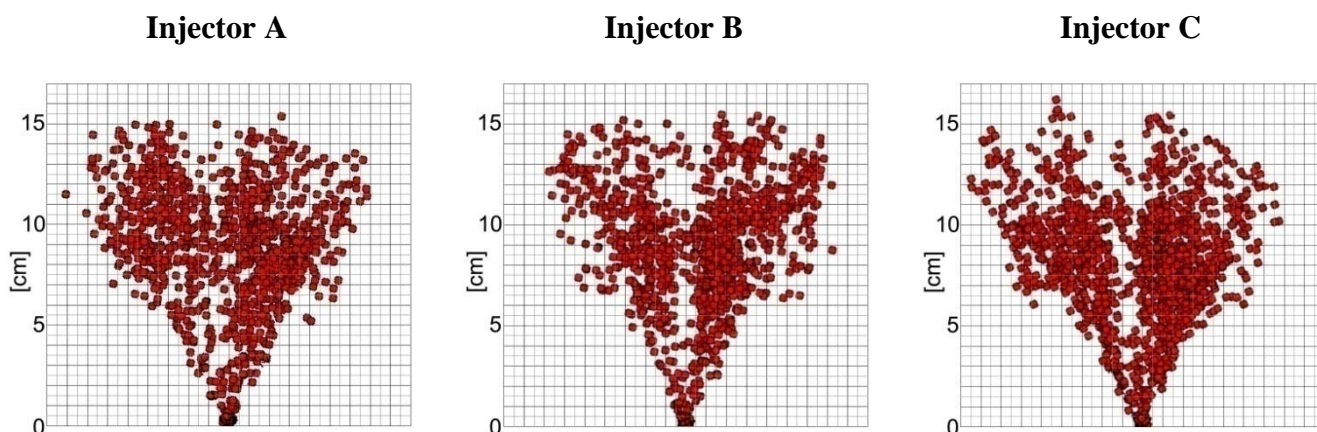
**Σχήμα 4.11.** Απεικόνιση έγχυσης  $C_7H_{16}$  στα 130 bar με τρεις εγχυτήρες.

Με βάση τις παραπάνω απεικονίσεις και αφού ορίστηκαν στους εγχυτήρες οι ονομασίες A, B και C (σχήμα 4.12), υπολογίστηκε το μήκος διεύδυσης του spray για κάθε εγχυτήρα ξεχωριστά, σε κάθε χρονικό σημείο. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε αφού πρώτα ορίστηκε η κατεύθυνση εγχύσεως των εγχυτήρων, και πάνω σε αυτή προσδιορίστηκε το μήκος διεύδυσης σε διαφορετικά χρονικά

σημεία. Ως κατεύθυνση εγχύσεως ορίστηκε η διχοτόμος της γωνίας του συνολικού spray, η οποία υπολογίστηκε κατά την έναρξη της έγχυσης όταν και είναι ιδιαίτερα ορατή. Ακολούθως, τοποθετήθηκε πλέγμα στην κατεύθυνση της έγχυσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13, και προσδιορίστηκε το μήκος διείδυσης. Ως μήκος διείδυσης λήφθηκε η απόσταση του πιο απομακρυσμένου (ως προς την κατεύθυνση εγχύσεως) σταγονιδίου από τον εγχυτήρα.



**Σχήμα 4.12.** Οι εγχυτήρες με τις ονομασίες τους, A, B και C.



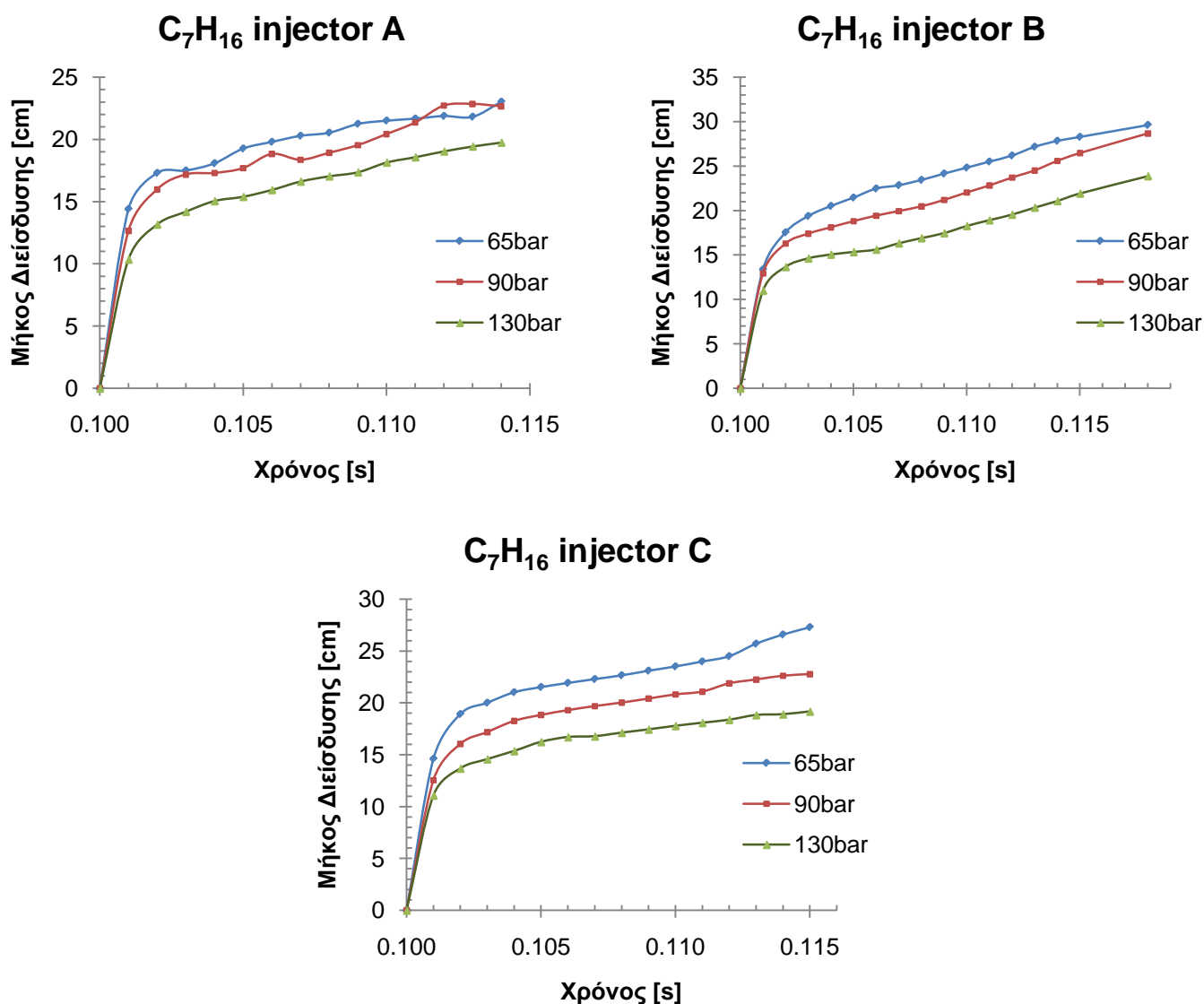
**Σχήμα 4.13.** Οπτικοποίηση του spray, και υπερτεθέν πλέγμα για τον υπολογισμό του μήκους διείδυσης.

Από τις απεικονίσεις των εγχύσεων για καύσιμο  $C_7H_{16}$  και ενεργούς καί τους τρεις εγχυτήρες (σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11) προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα του σχήματος 4.14, και με τη μορφή διαγραμμάτων

στο σχήμα 4.15. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της πολυπλοκότητας της ροής των spray, η οποία προκύπτει από το γεγονός ότι είναι ενεργοί και οι τρεις εγχυτήρες, ο προσδιορισμός του μήκους διείσδυσης έχει γίνει μέχρι το χρονικό σημείο που εξακολουθεί να είναι διακριτή η δομή του καθενός spray ξεχωριστά. Έτσι, για τον εγχυτήρα A ο προσδιορισμός έγινε μέχρι 0.114 s, για τον εγχυτήρα B μέχρι 0.118 s και για τον εγχυτήρα C μέχρι 0.115 s.

TIME (s)	PENETRATION LENGTH (cm)								
	65 bar			90 bar			130 bar		
	injector A	injector B	injector C	injector A	injector B	injector C	injector A	injector B	injector C
0.100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.101	14.4038	13.3706	14.6042	12.6533	12.9275	12.5483	10.3573	10.9943	11.0791
0.102	17.3078	17.5365	18.9163	15.9829	16.2857	16.0414	13.1633	13.6648	13.6775
0.103	17.5019	19.3789	20.0075	17.1823	17.3974	17.1775	14.1891	14.6237	14.5711
0.104	18.0839	20.5050	21.0211	17.3020	18.1154	18.2555	15.0502	15.0585	15.3572
0.105	19.2682	21.4518	21.5183	17.6930	18.8027	18.8321	15.3908	15.3436	16.2368
0.106	19.8036	22.4683	21.9166	18.8321	19.4245	19.2924	15.9393	15.6176	16.7026
0.107	20.2912	22.8428	22.2883	18.3625	19.9396	19.6822	16.6166	16.3189	16.7824
0.108	20.5383	23.4363	22.6512	18.9202	20.4744	20.0200	17.0373	16.9022	17.1227
0.109	21.2462	24.1490	23.0964	19.5395	21.1911	20.4068	17.3575	17.4625	17.4382
0.110	21.5077	24.8210	23.5084	20.4257	22.0332	20.8108	18.1415	18.2667	17.7831
0.111	21.6725	25.4986	23.9867	21.3595	22.8144	21.0794	18.5701	18.9203	18.0783
0.112	21.8819	26.1784	24.4974	22.7164	23.7093	21.8763	19.0367	19.5448	18.3711
0.113	21.8206	27.1604	25.6999	22.8498	24.5126	22.2453	19.4297	20.3347	18.8239
0.114	23.0221	27.8334	26.5805	22.6539	25.5798	22.6090	19.7464	21.0753	18.9009
0.115		28.2765	27.2869		26.4675	22.7673		21.9240	19.1698
0.118		29.6098			28.6724			23.8758	

**Σχήμα 4.14.** Υπολογισθέν μήκος διείσδυσης για καύσιμο  $C_7H_{16}$  συναρτήσεως του χρόνου, και ενεργούς τους τρεις εγχυτήρες A, B και C.

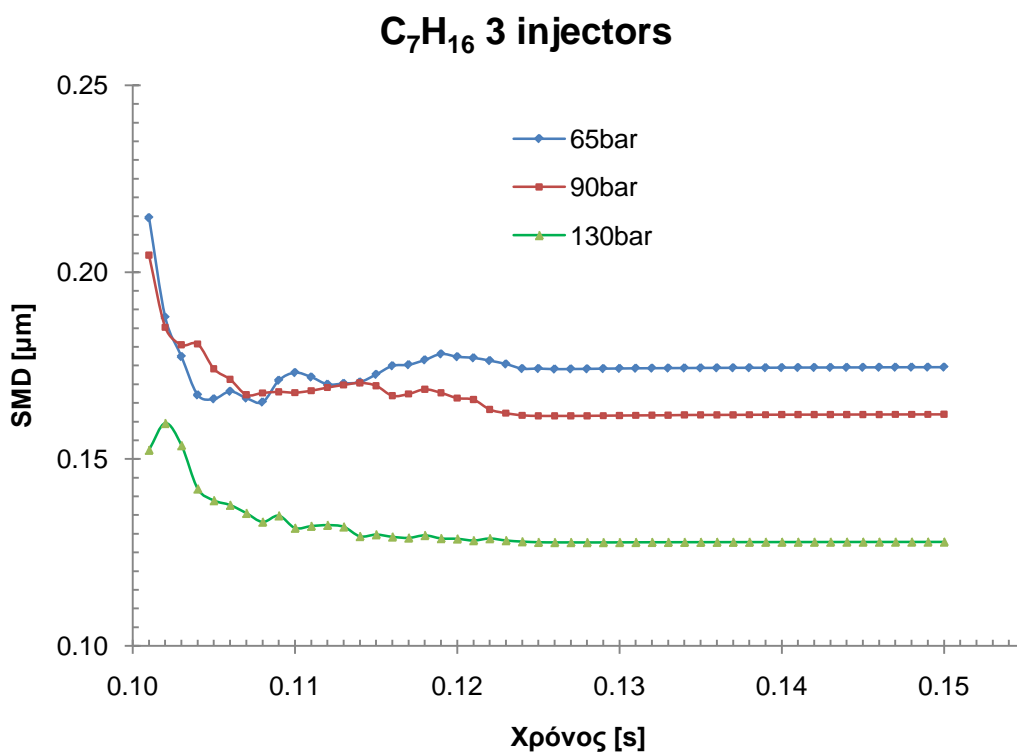


**Σχήμα 4.15.** Υπολογισθέν μήκος διείδυσης του spray των εγχυτήρων A,B και C συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης, για καύσιμο  $C_7H_{16}$ .

Από τα διαγράμματα του σχήματος 4.15 αλλά και τις απεικονίσεις των σχημάτων 4.9, 4.10 και 4.11, προκύπτει ότι με αύξηση της πίεσης εντός του θαλάμου καύσης η δομή του spray είναι περισσότερο πυκνή, και συνεπώς αυτό χαρακτηρίζεται από μικρότερο μήκος διείδυσης. Η μείωση του μήκους διείδυσης με αύξηση της πίεσης πρέπει να αποδοθεί στην αντίστοιχη αύξηση της πυκνότητας του αέρα, η οποία αυξάνει ευθέως ανάλογα τις αεροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στα σταγονίδια. Έτσι, η αύξηση της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη

επιβράδυνση των σταγονιδίων, και συνεπώς τη μείωση του μήκους διεξόδου του spray.

Επίσης, από τα διαγράμματα της μεταβολής του μήκους διεξόδου του spray για κάθε εγχυτήρα (σχήμα 4.15), είναι εμφανές ότι, σε αντίθεση με τους εγχυτήρες B και C, ο A εμφανίζει για πιέσεις 65 και 90 bar μη ομαλή μεταβολή του μήκους διεξόδου του spray. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από τη θέση (σχήμα 4.12) του συγκεκριμένου εγχυτήρα μέσα στον θάλαμο καύσης, αφού η ροή του spray που εγχύεται από τον εγχυτήρα A φαίνεται να επηρεάζεται πολύ γρήγορα από τις αντίστοιχες ροές των spray των άλλων δύο εγχυτήρων, και ιδιαίτερα από αυτή του εγχυτήρα C.



**Σχήμα 4.16.** Η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter σε συνάρτηση με τον χρόνο, για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης.

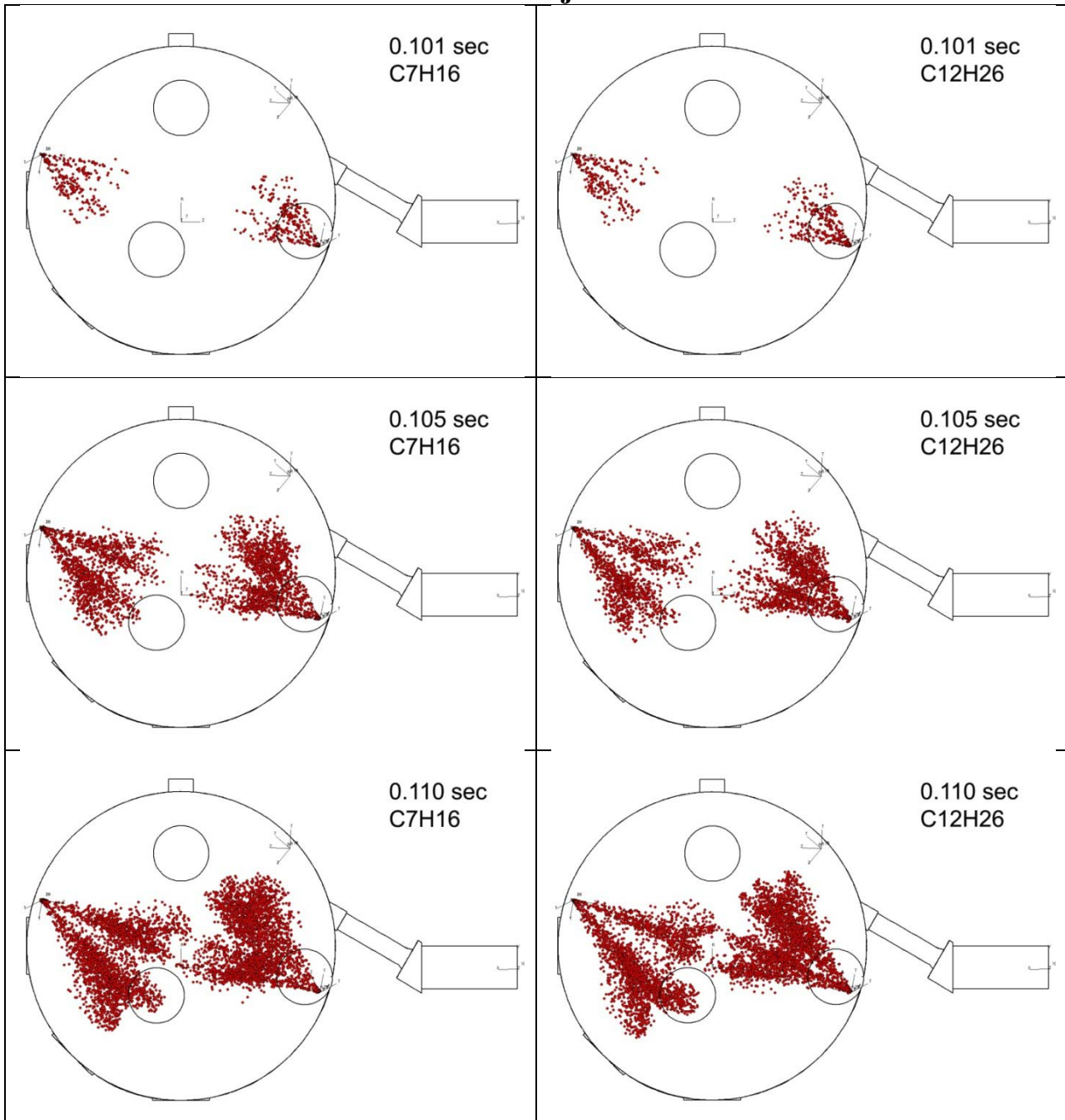
Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η υπολογισθείσα διάμετρος Sauter (SMD) συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης. Η μέση διάμετρος Sauter (SMD) αντιστοιχεί στη διάμετρο του σταγονιδίου του οποίου ο λόγος όγκου προς επιφάνεια είναι ίσος με τον λόγο του συνολικού όγκου του spray προς την συνολική επιφάνεια του spray (παράγραφος 2.2.4.3). Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, το μέγεθος SMD αναφέρεται στο σύνολο του spray (καί στους τρεις εγχυτήρες). Από το σχήμα 4.16

συμπεραίνεται ότι σε γενικές γραμμές η μέση διάμετρος Sauter των σταγονιδίων μειώνεται με αύξηση της πίεσης εντός του θαλάμου καύσης, με κάποιες μικρές εξαιρέσεις για το χρονικό διάστημα περί  $t=0.11$  s για τις περιπτώσεις πίεσης 65 και 90 bar εντός του θαλάμου καύσης. Η συγκεκριμένη αύξηση πρέπει να αποδοθεί στο γεγονός ότι σε αυτή τη χρονική περιοχή παρατηρείται αλληλεπικάλυψη των spray διαφορετικών εγχυτήρων (κυρίως των εγχυτήρων A και C), με αποτέλεσμα μεγάλο αριθμό συγκορύσεων μεταξύ σταγονιδίων, και συνένωση μερικών εξ' αυτών (coalescence). Τέλος, ένα άλλο αξιοπρόσεχτο γεγονός είναι ότι και στις τρεις περιπτώσεις πίεσης το μέγεθος της διαμέτρου SMD παραμένει σταθερό από ένα χρονικό σημείο και ακολούθως. Αυτό το χρονικό σημείο φαίνεται να είναι και στις τρεις περιπτώσεις το σημείο που σταματά η έγχυση του καυσίμου, δηλαδή στο 0.1238 s. Η διαπίστωση αυτή πρέπει να ερμηνευτεί με βάση το γεγονός ότι σταγονίδια εγγύς του ακροφυσίου χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες, και συνεπώς μεγάλες αεροδυναμικές δυνάμεις, και ρυθμούς διάσπασης.

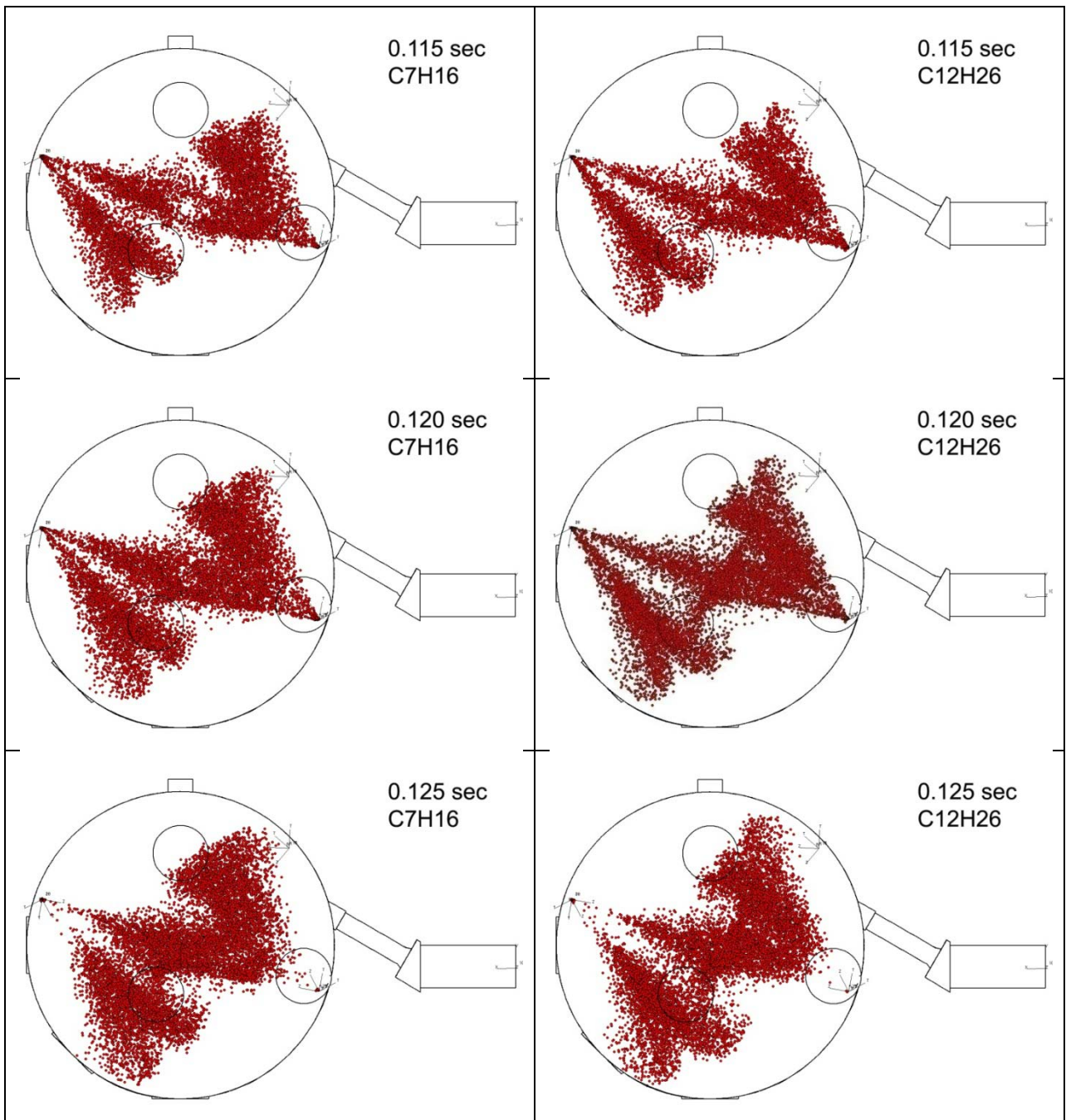
#### 4.4.2 Σύγκριση έγχυσης επτανίου και δωδεκανίου, με χρήση δύο εγχυτήρων

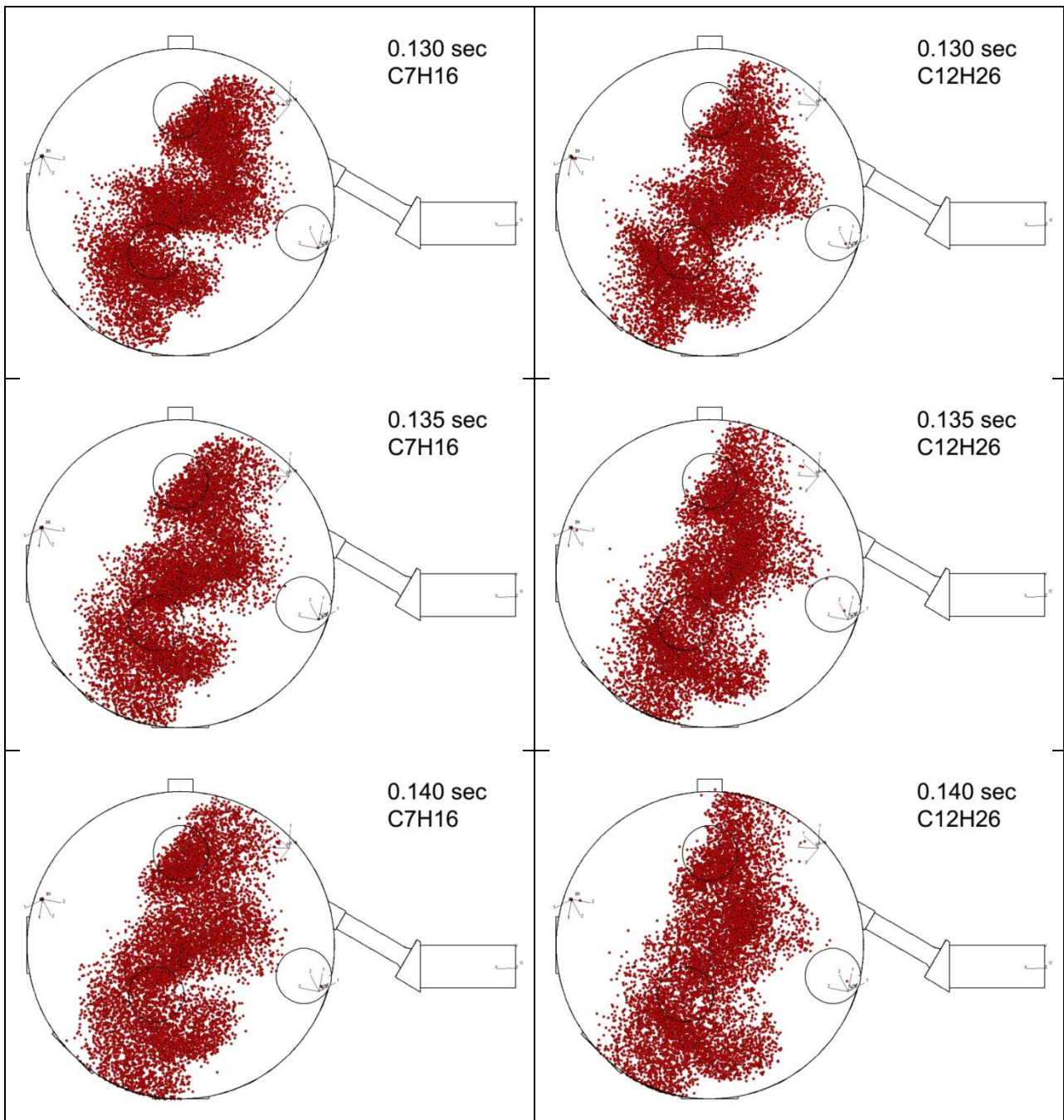
Για τη μελέτη της επίδρασης του καυσίμου στα χαρακτηριστικά του spray, και προκειμένου να γίνουν υπολογισμοί σε διάταξη που βρίσκεται εγγύτερα προς μια δίχρονη ναυτική μηχανή, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με ενεργούς τους δύο από τους τρεις εγχυτήρες (A και B). Στα σχήματα 4.17, 4.18 και 4.19 παρουσιάζονται οι απεικονίσεις των αποτελεσμάτων για τα δυο καύσιμα ( $C_7H_{16}$  και  $C_{12}H_{26}$ ) στις τρεις διαφορετικές πιέσεις που εδώ χρησιμοποιούνται.

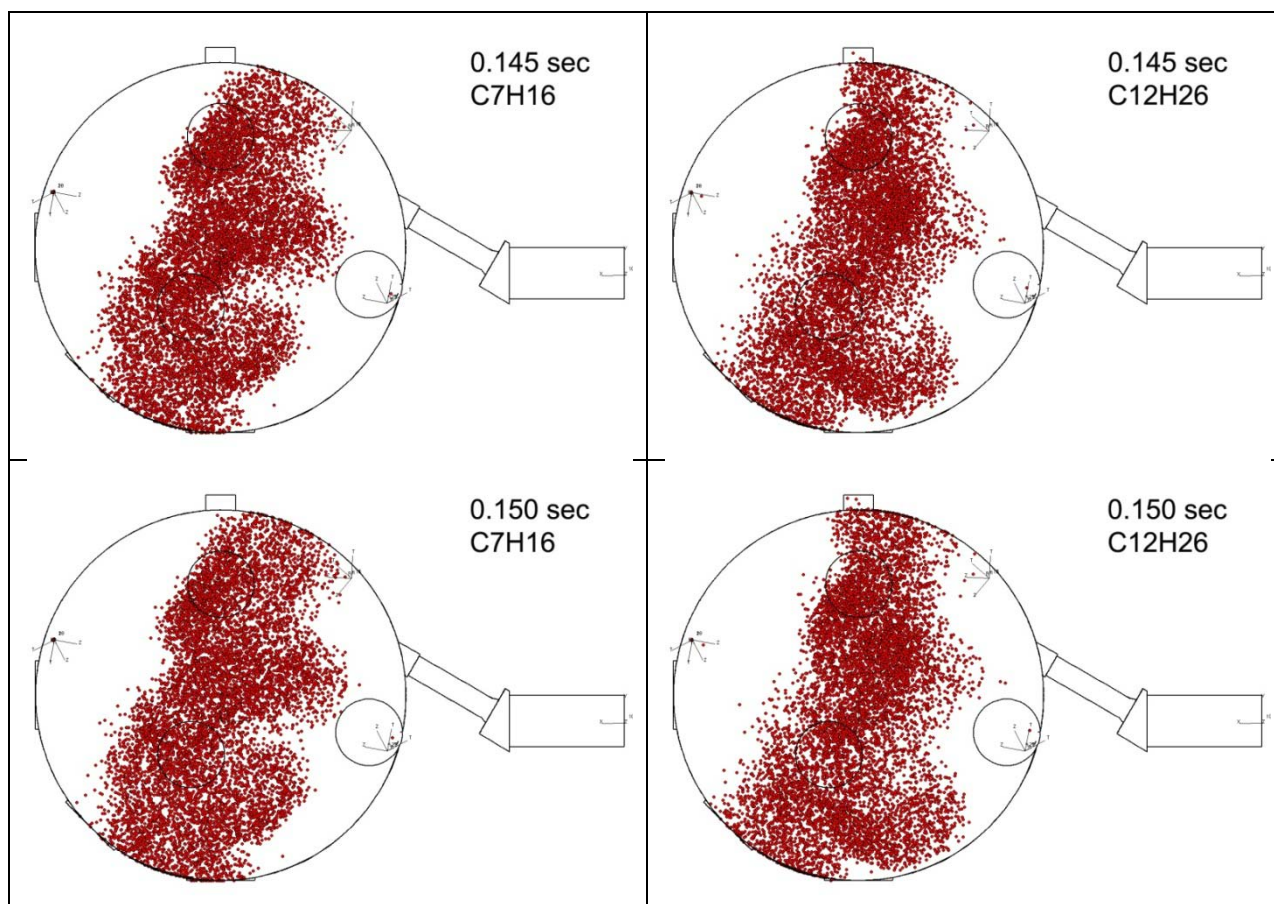
### 65 bar 2 injectors





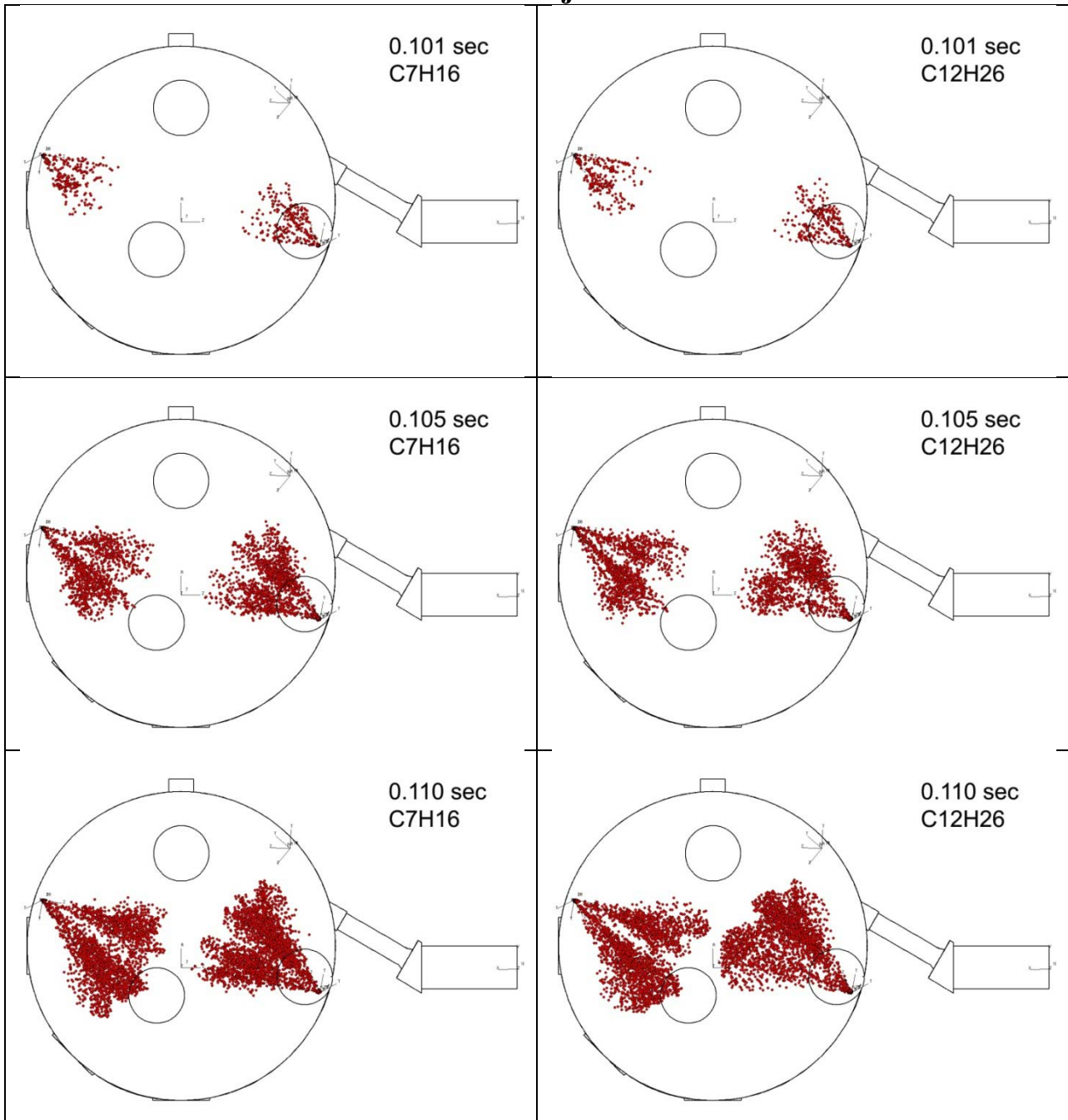


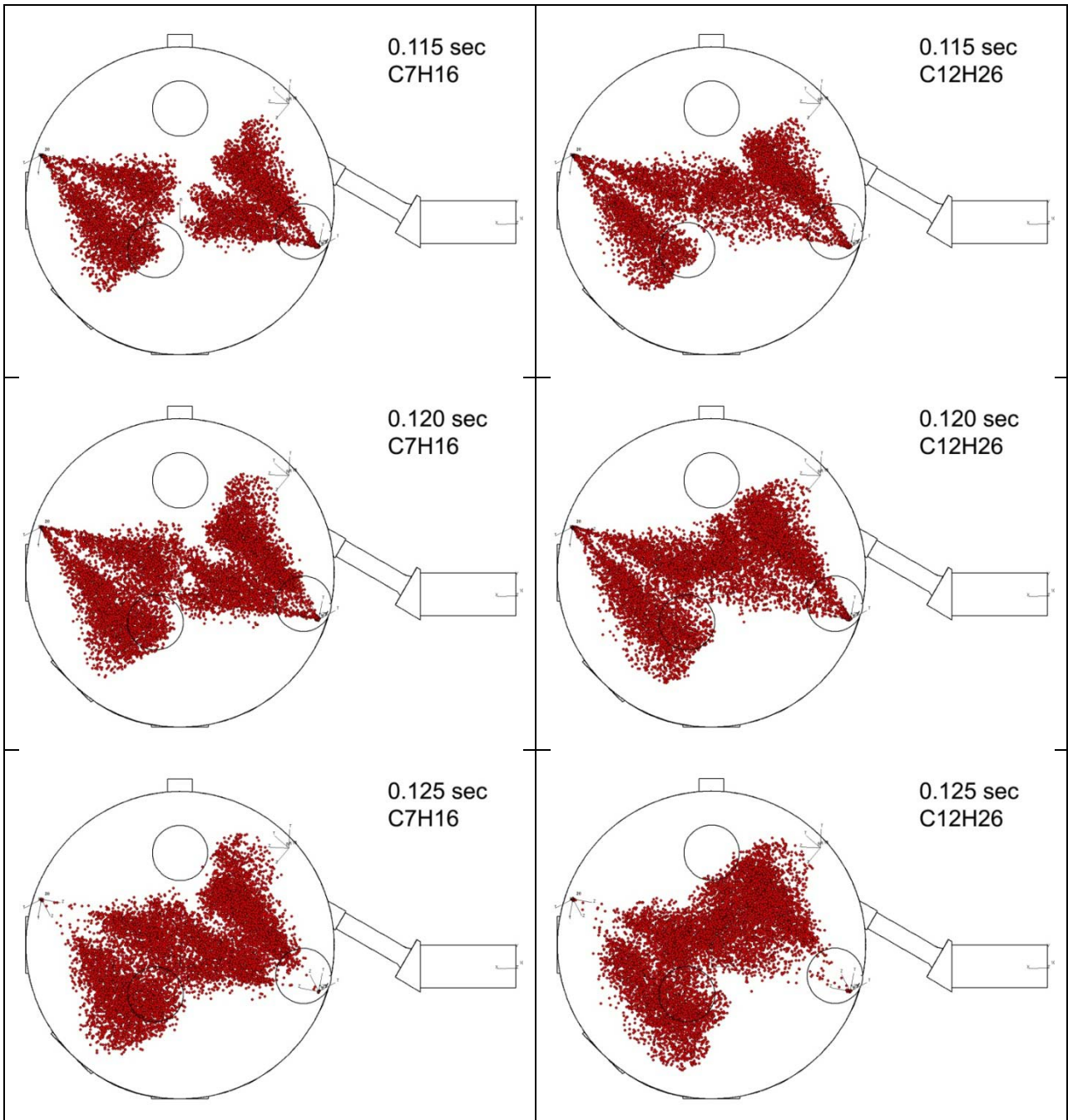


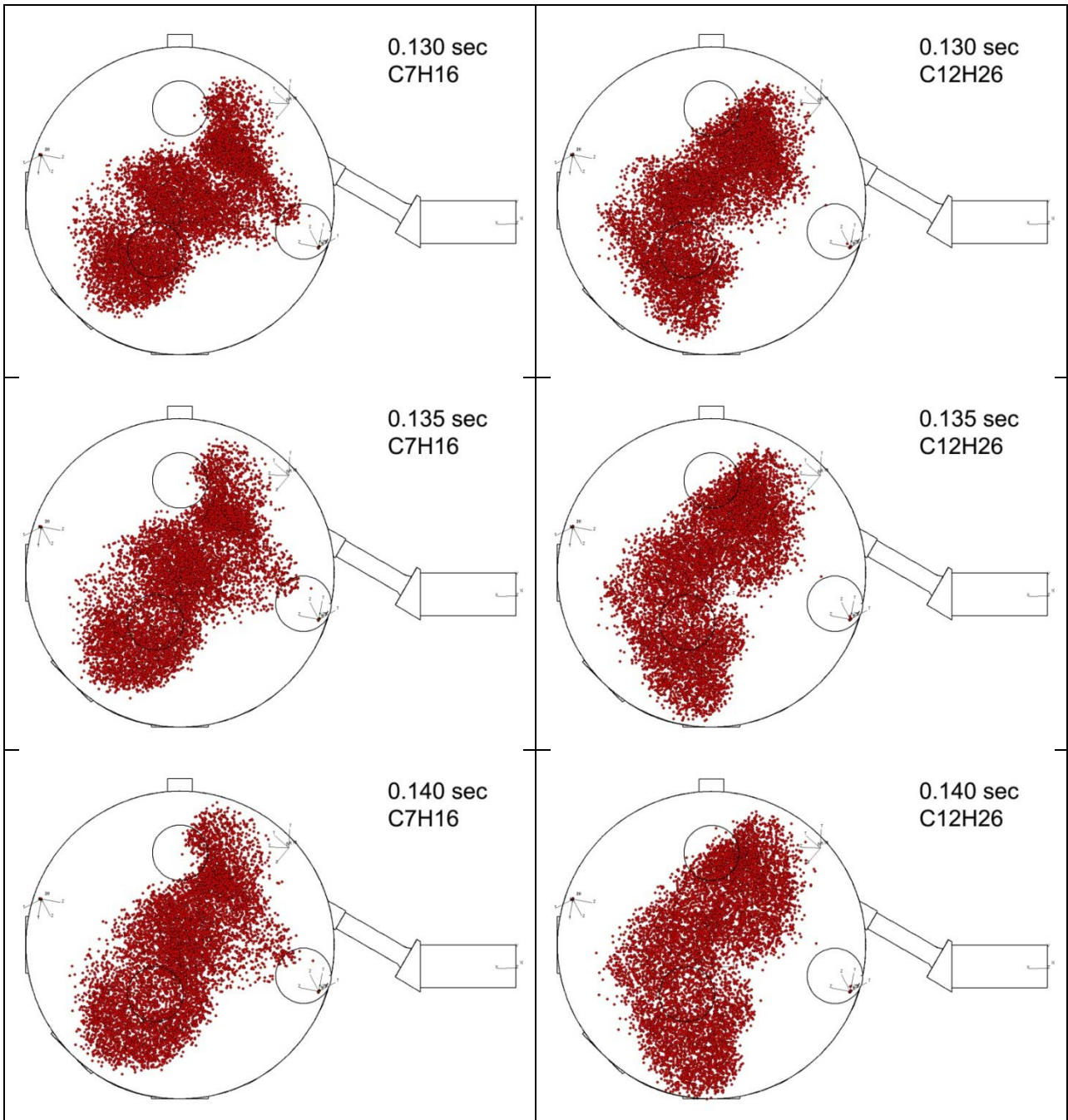


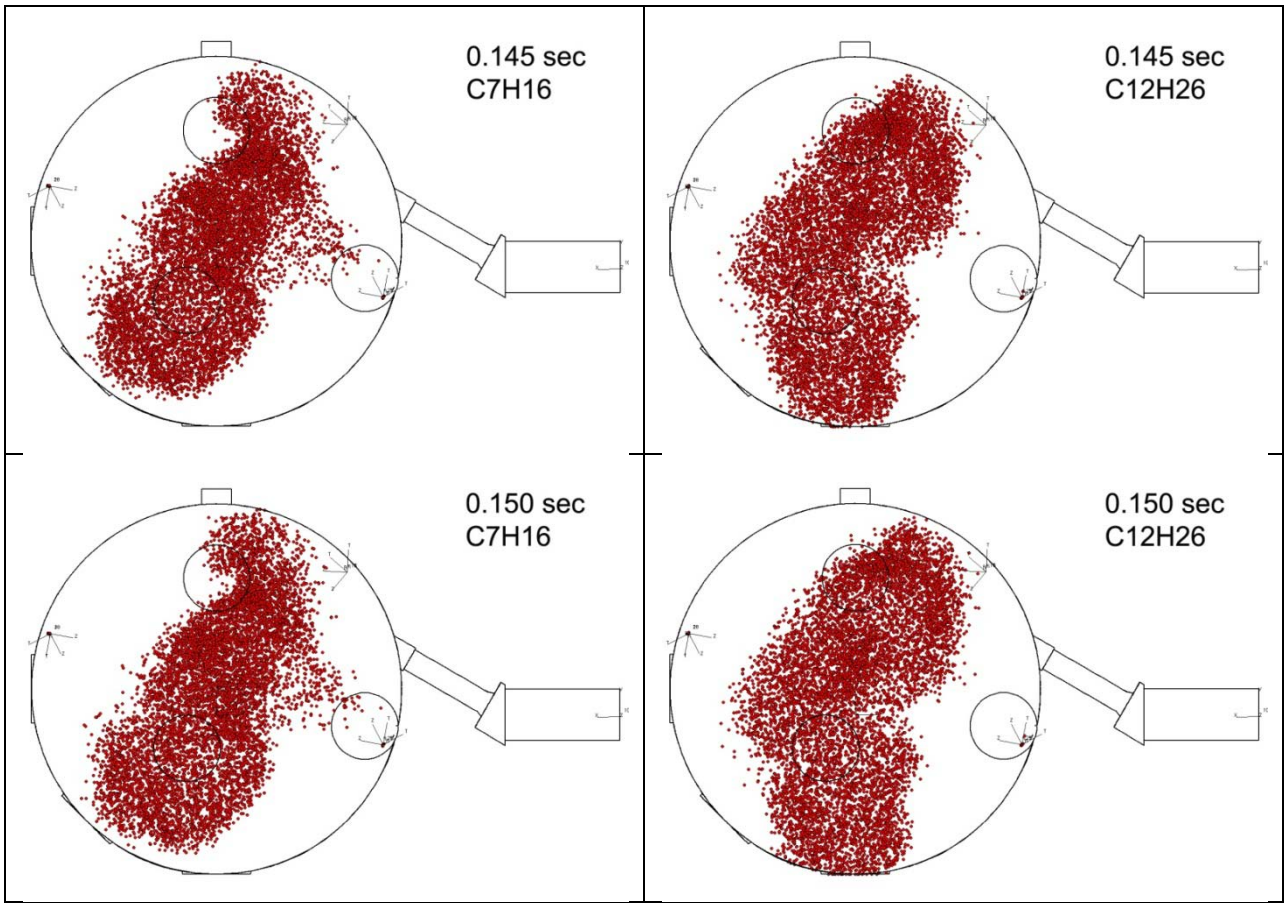
Σχήμα 4.17. Απεικόνιση έγχυσης  $C_7H_{16}$  και  $C_{12}H_{26}$  στα 65 bar με δύο εγχυτήρες.

**90 bar 2 injectors**



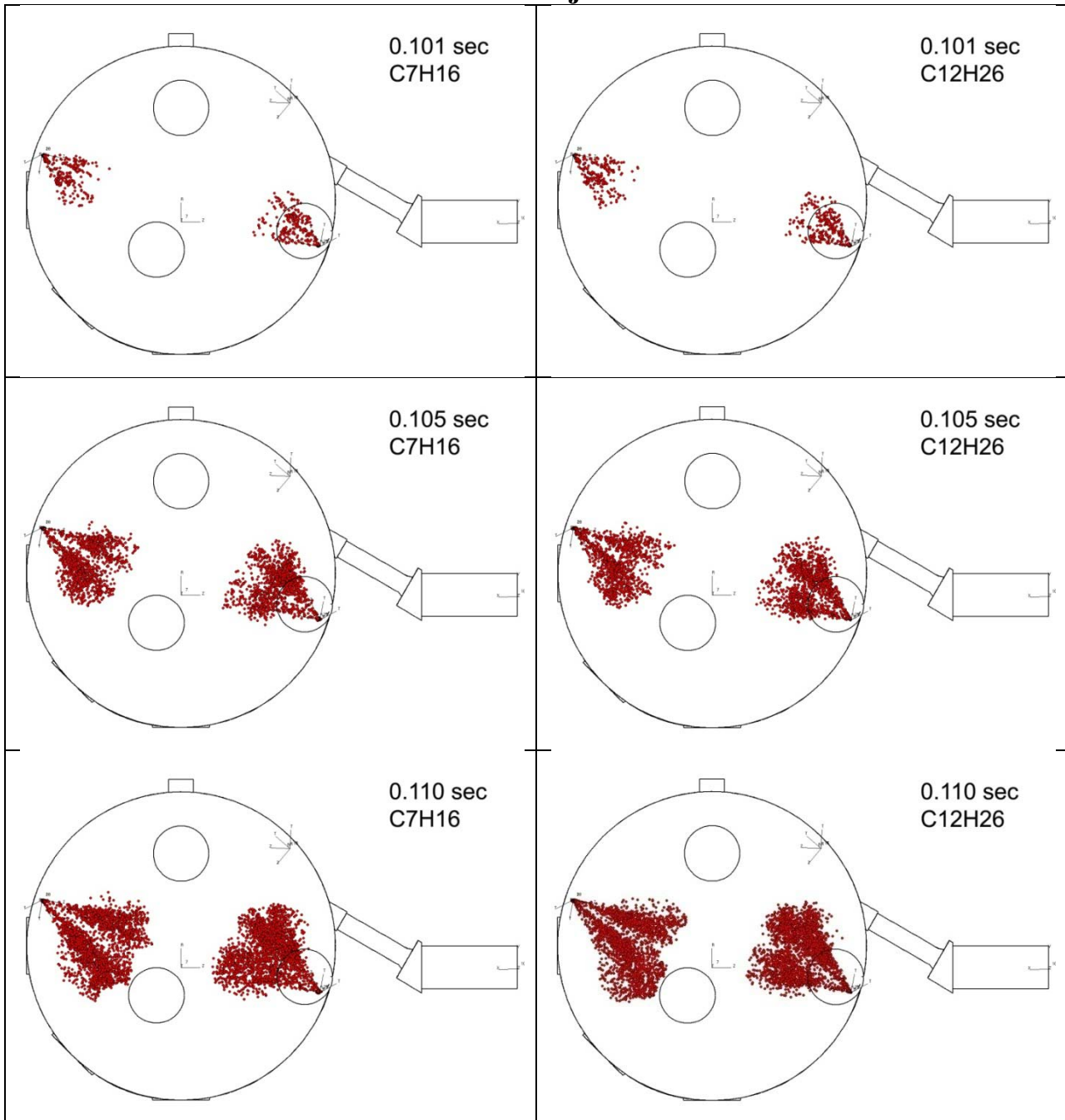




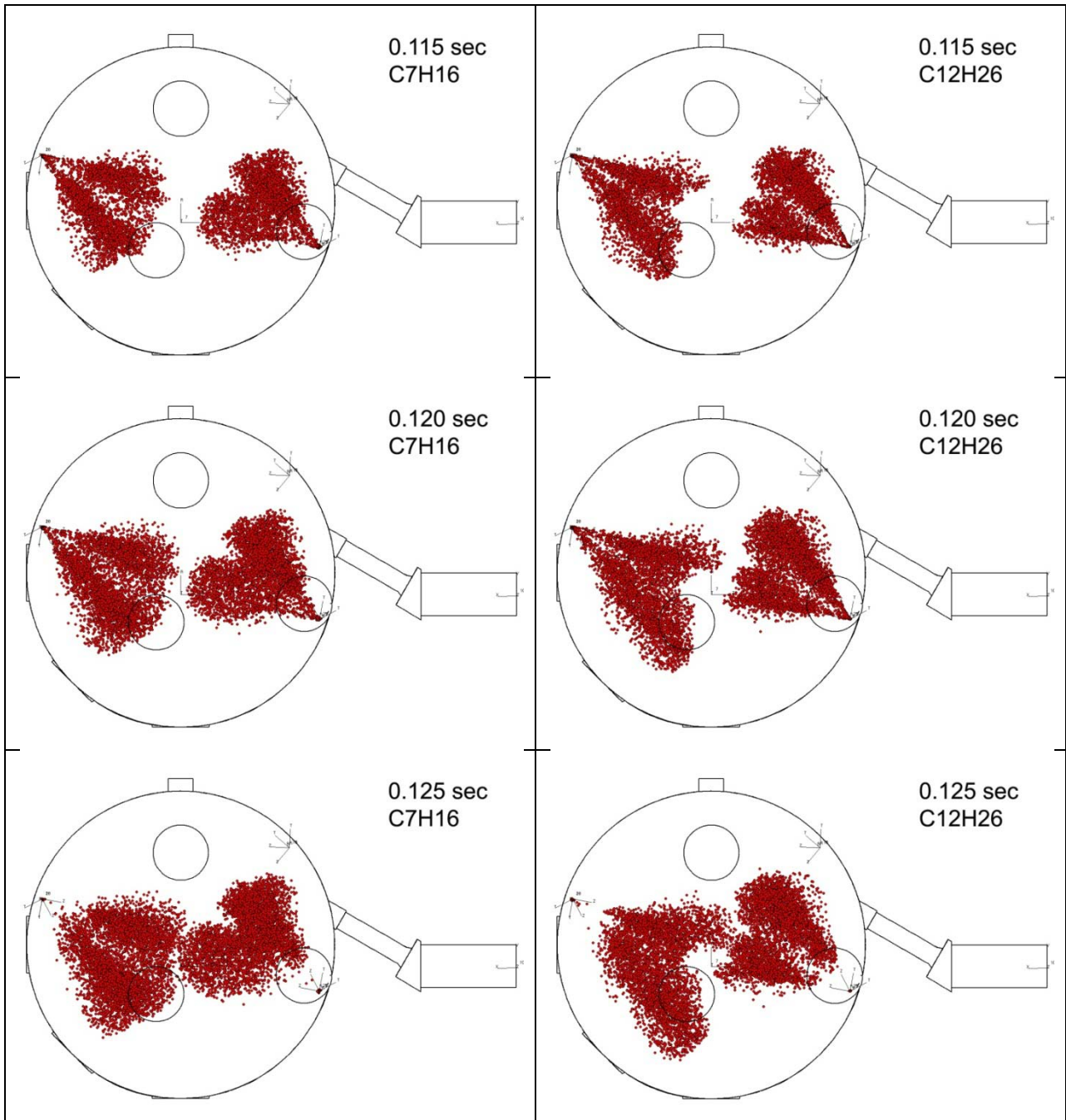


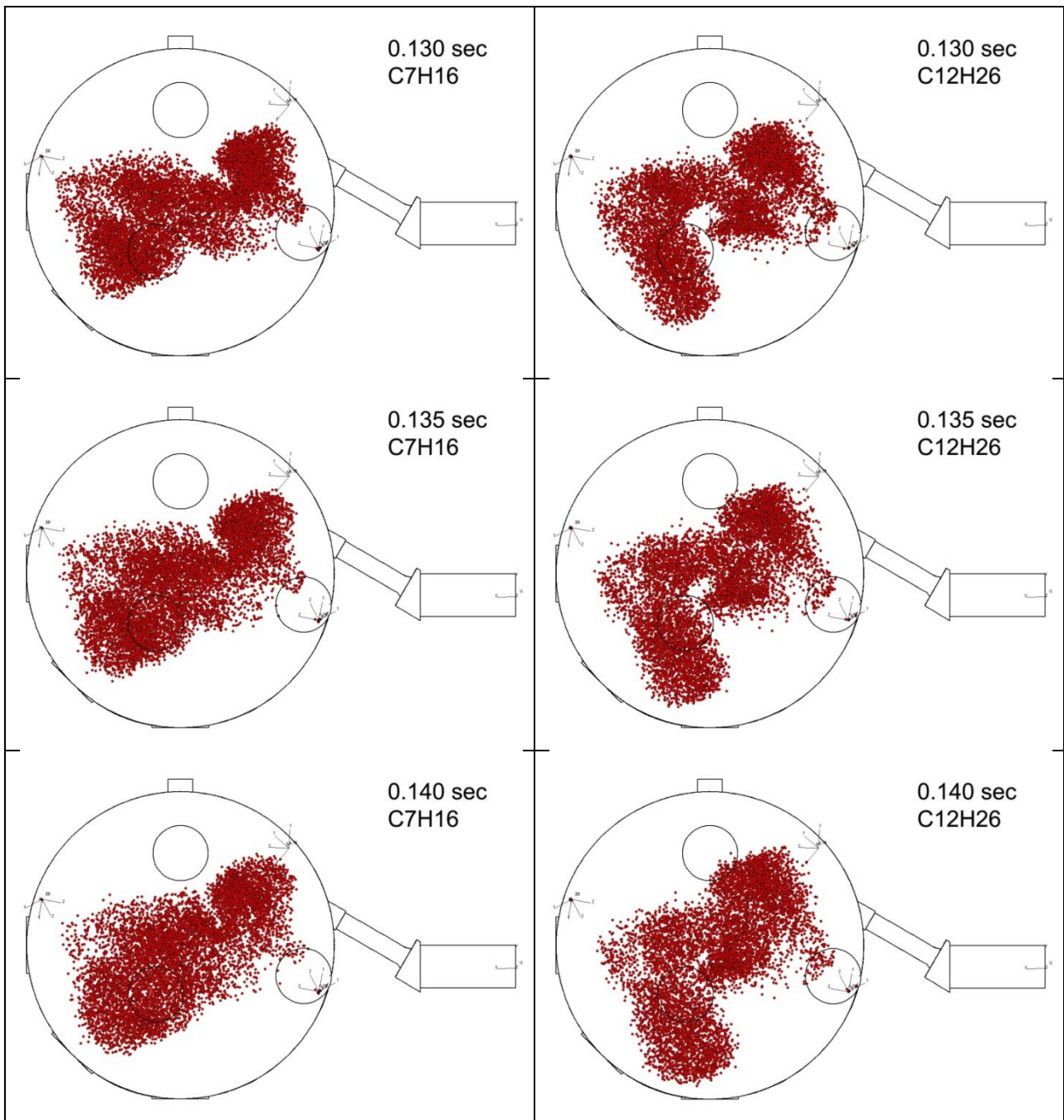
**Σχήμα 4.18.** Απεικόνιση έγχυσης  $C_7H_{16}$  και  $C_{12}H_{26}$  στα 90 bar με δύο εγχυτήρες.

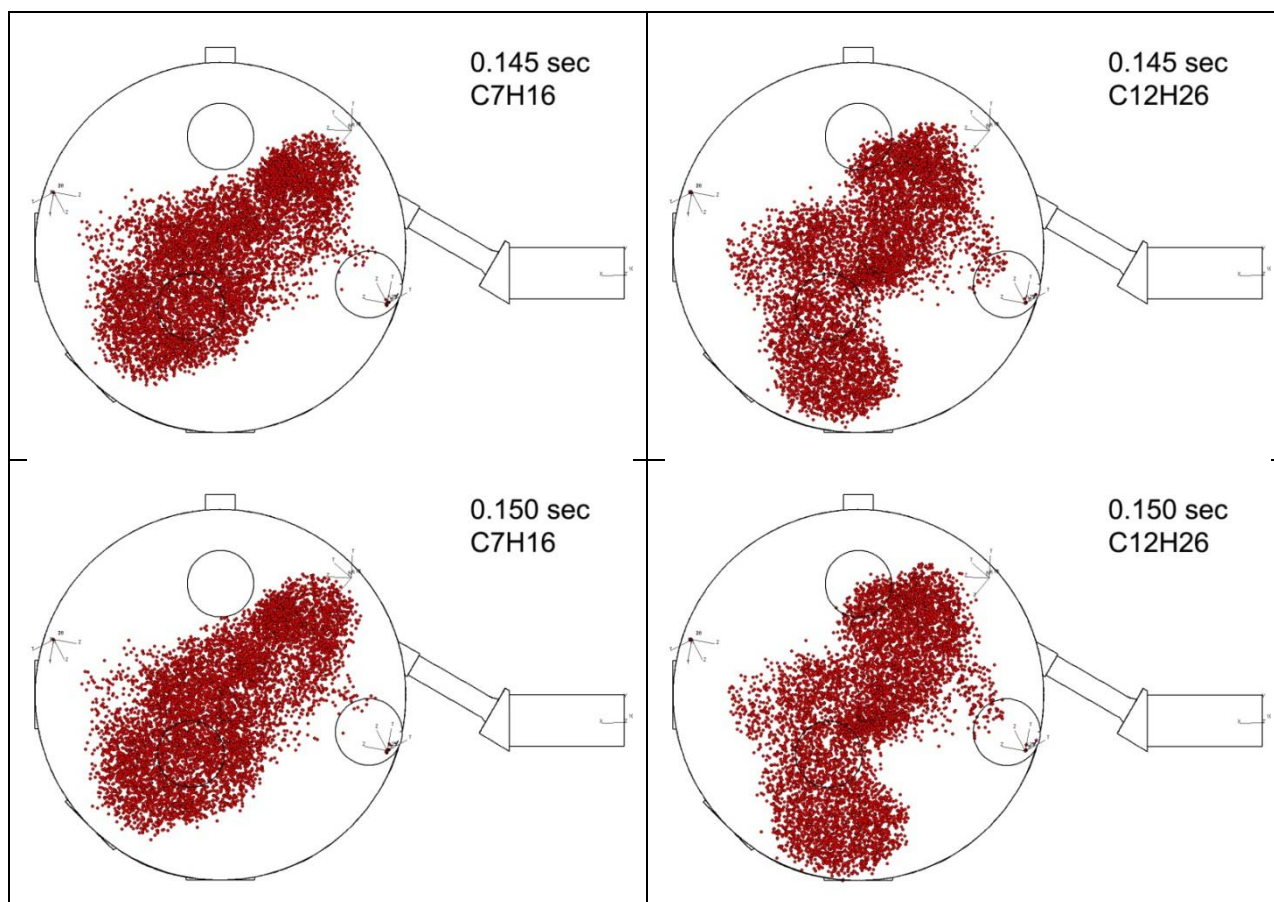
### 130 bar 2 injectors









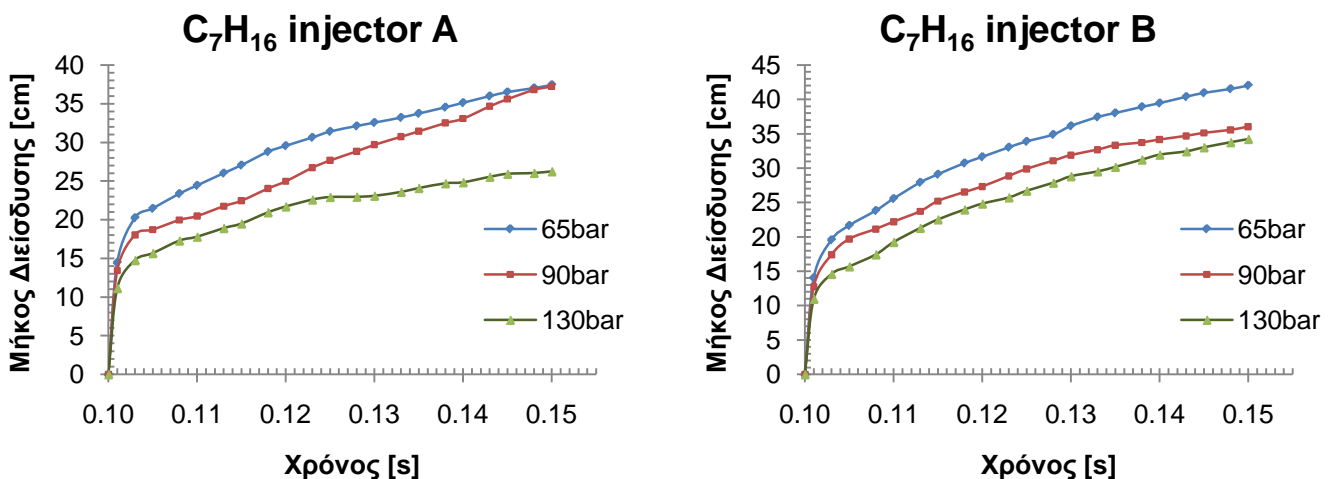


**Σχήμα 4.19.** Απεικόνιση έγχυσης  $C_7H_{16}$  και  $C_{12}H_{26}$  στα 130 bar με δύο εγχυτήρες.

Στα σχήματα 4.20, 4.21, 4.22 και 4.23 παρουσιάζονται για κάθε καύσιμο ξεχωριστά τα αποτελέσματα αναφορικά με το μήκος διείσδυσης σε πίνακες (σχήματα 4.20 και 4.22) καθώς και σε μορφή διαγραμμάτων (σχήματα 4.21 και 4.23). Σημειώνεται, ότι στις περιπτώσεις αυτές, που είναι ενεργοί μόνον οι εγχυτήρες A και B, λόγω της απλούστερης δομής των ροών του spray, οι τιμές υπολογίστηκαν για όλη την διάρκεια της παρουσίας spray στον θάλαμο καύσης. Προκειμένου να συγκριθούν τα δύο καύσιμα αναφορικά με το προκύπτον μήκος διείσδυσης, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.24 το μήκος διείσδυσης του spray των εγχυτήρων A και B σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τα δύο χρησιμοποιούμενα καύσιμα, για πιέσεις 65, 90 και 130 bar. Αντίστοιχα, σε ότι αφορά στη μέση διάμετρο Sauter εκτός από τα σχήματα 4.25 και 4.26, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter σε συνάρτηση με τον χρόνο και την πίεση εντός του θαλάμου καύσης για κάθε καύσιμο ξεχωριστά, στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter σε συνάρτηση με τον χρόνο και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο για πιέσεις 65, 90 και 130 bar.

PENETRATION LENGTH (cm) $C_7H_{16}$						
TIME (s)	65 bar		90 bar		130 bar	
	injector A	injector B	injector A	injector B	injector A	injector B
0.100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.101	14.4674	14.0750	13.4285	12.7691	11.1396	10.9636
0.103	20.2518	19.5827	18.0481	17.4019	14.7524	14.5866
0.105	21.4633	21.6646	18.7178	19.6972	15.6646	15.6867
0.108	23.3762	23.8382	19.9565	21.1512	17.2847	17.4286
0.110	24.4366	25.5719	20.4714	22.2078	17.7842	19.2278
0.113	26.0245	27.9304	21.7439	23.7205	18.9027	21.2826
0.115	27.0608	29.1114	22.4535	25.2161	19.4900	22.5191
0.118	28.7960	30.7436	24.0324	26.5234	20.9438	23.9602
0.120	29.5657	31.6504	24.9625	27.3256	21.6973	24.8186
0.123	30.6438	33.0405	26.7232	28.8560	22.5872	25.7209
0.125	31.4137	33.8902	27.6585	29.8952	22.9199	26.6889
0.128	32.1245	34.9001	28.8413	31.0737	22.9543	27.8558
0.130	32.5604	36.1427	29.6843	31.8936	23.0800	28.8041
0.133	33.2164	37.4420	30.7278	32.6847	23.5809	29.5055
0.135	33.7403	38.0260	31.4238	33.3273	24.0827	30.1606
0.138	34.5461	38.9225	32.4974	33.7358	24.6940	31.2208
0.140	35.1266	39.4642	33.0733	34.1583	24.8274	31.9368
0.143	35.9925	40.3973	34.6568	34.6853	25.5335	32.4271
0.145	36.5122	40.9542	35.5847	35.1251	25.9213	33.0095
0.148	37.0305	41.5331	36.7914	35.5540	26.0316	33.7463
0.150	37.4434	42.0280	37.2305	36.0407	26.2416	34.2166

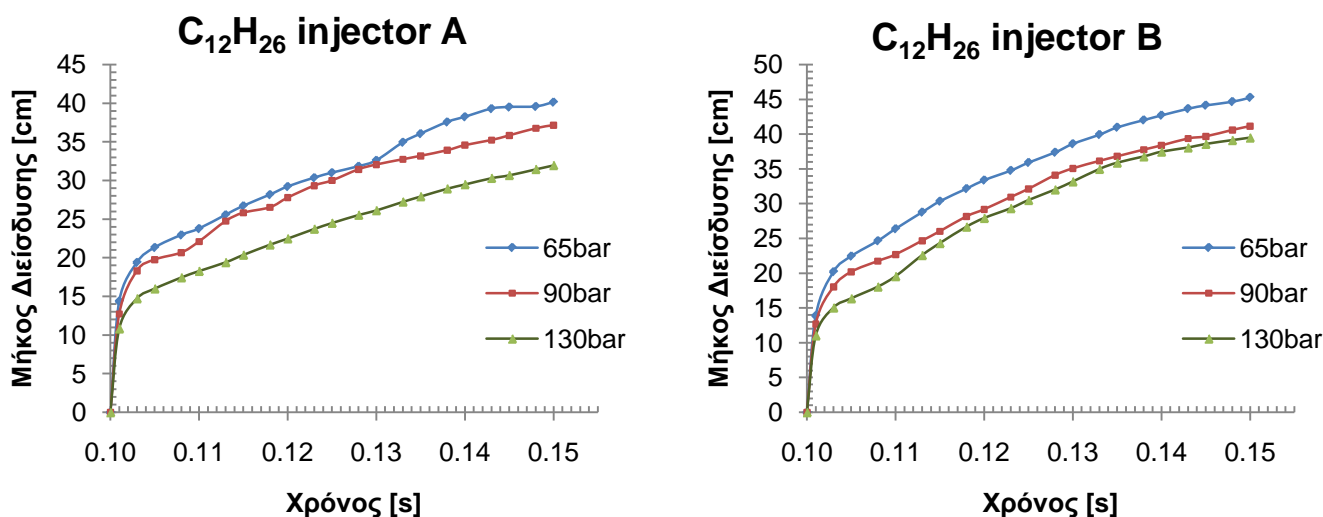
**Σχήμα 4.20.** Υπολογισθέν μήκος διείσδυσης για καύσιμο  $C_7H_{16}$  συναρτήσει του χρόνου για ενεργούς τους δύο εγχυτήρες A, B.



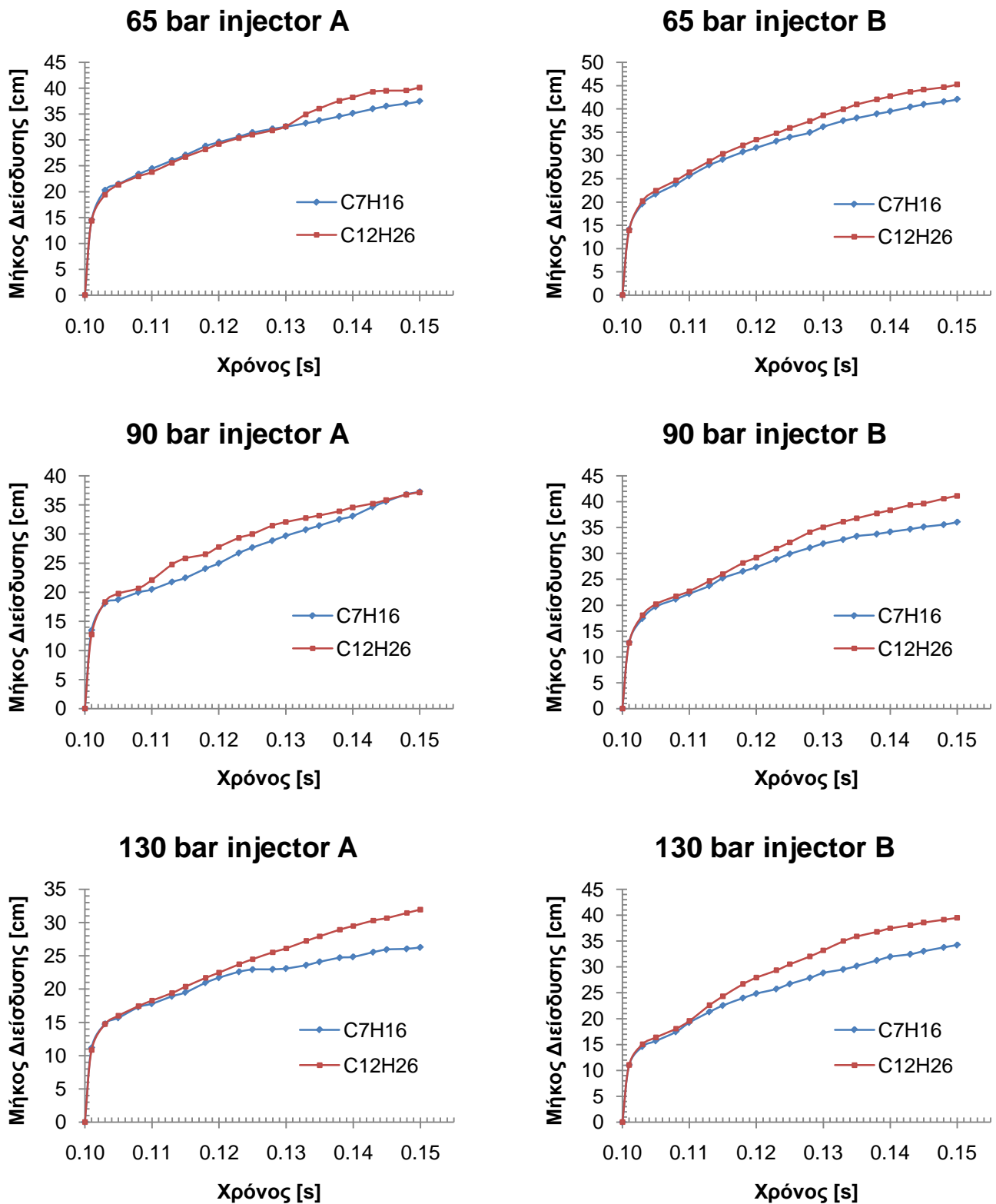
**Σχήμα 4.21.** Υπολογισθέν μήκος διείσδυσης του spray των εγχυτήρων A και B συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης. Καύσιμο  $C_7H_{16}$ .

PENETRATION LENGTH (cm) C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>						
TIME (s)	65 bar		90 bar		130 bar	
	injector A	injector B	injector A	injector B	injector A	injector B
0.100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.101	14.3844	13.8993	12.7365	12.6970	10.8315	11.0405
0.103	19.3948	20.2108	18.3187	18.0318	14.7290	15.0508
0.105	21.3284	22.4513	19.7601	20.1923	16.0014	16.3770
0.108	22.9499	24.6553	20.6656	21.7378	17.4422	18.0612
0.110	23.7737	26.3809	22.0978	22.6854	18.2741	19.5618
0.113	25.5562	28.7711	24.7377	24.6739	19.4050	22.5957
0.115	26.7163	30.3430	25.8193	26.0230	20.3666	24.3242
0.118	28.1676	32.1517	26.5205	28.1611	21.6881	26.6811
0.120	29.2124	33.3741	27.7746	29.1800	22.4787	27.9331
0.123	30.3551	34.7603	29.3258	30.9457	23.7289	29.3416
0.125	31.0060	35.9036	30.0001	32.1244	24.4959	30.5142
0.128	31.8343	37.3696	31.4400	34.1035	25.5339	32.0304
0.130	32.5998	38.5947	32.0548	35.0638	26.1229	33.1860
0.133	34.9420	39.9221	32.7359	36.1319	27.2400	34.9860
0.135	36.0565	40.9665	33.1795	36.7912	27.9282	35.8886
0.138	37.5665	42.0118	33.9072	37.7536	28.9384	36.7841
0.140	38.2388	42.6945	34.5652	38.3601	29.4880	37.4722
0.143	39.2920	43.6427	35.2240	39.3549	30.3015	38.0688
0.145	39.4988	44.1293	35.8282	39.6632	30.6725	38.5850
0.148	39.5728	44.6545	36.7538	40.5871	31.4482	39.1336
0.150	40.1308	45.2555	37.1495	41.1370	31.9567	39.4941

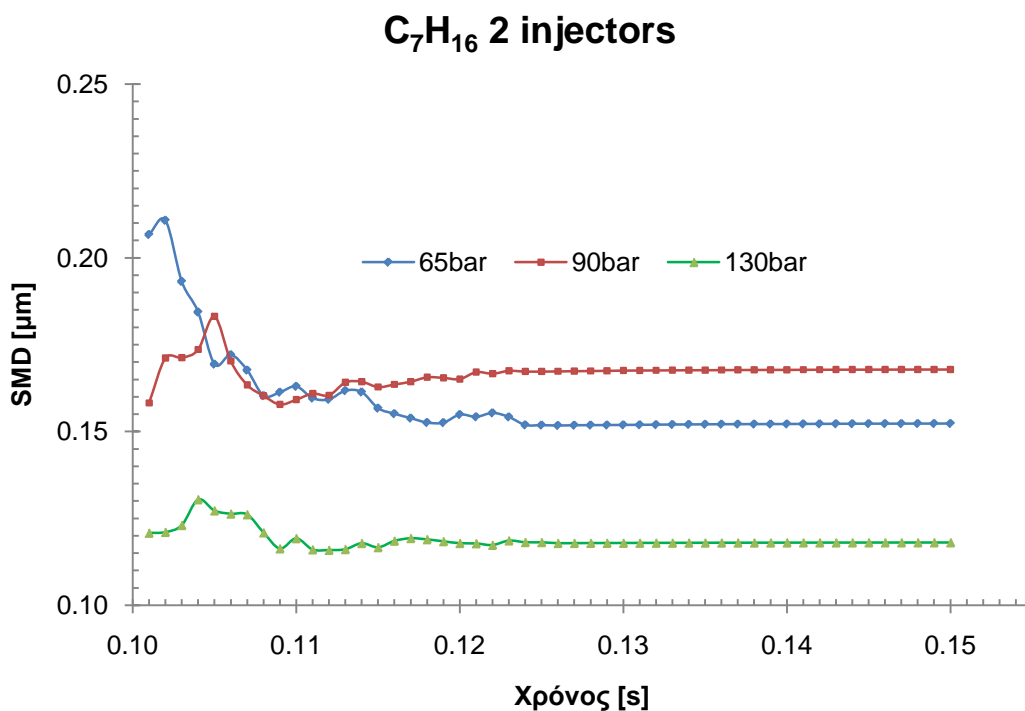
Σχήμα 4.22. Υπολογισθέν μήκος διείσδυσης για καύσιμο C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> συναρτήσει του χρόνου για ενεργούς τους δύο εγχυτήρες A, B.



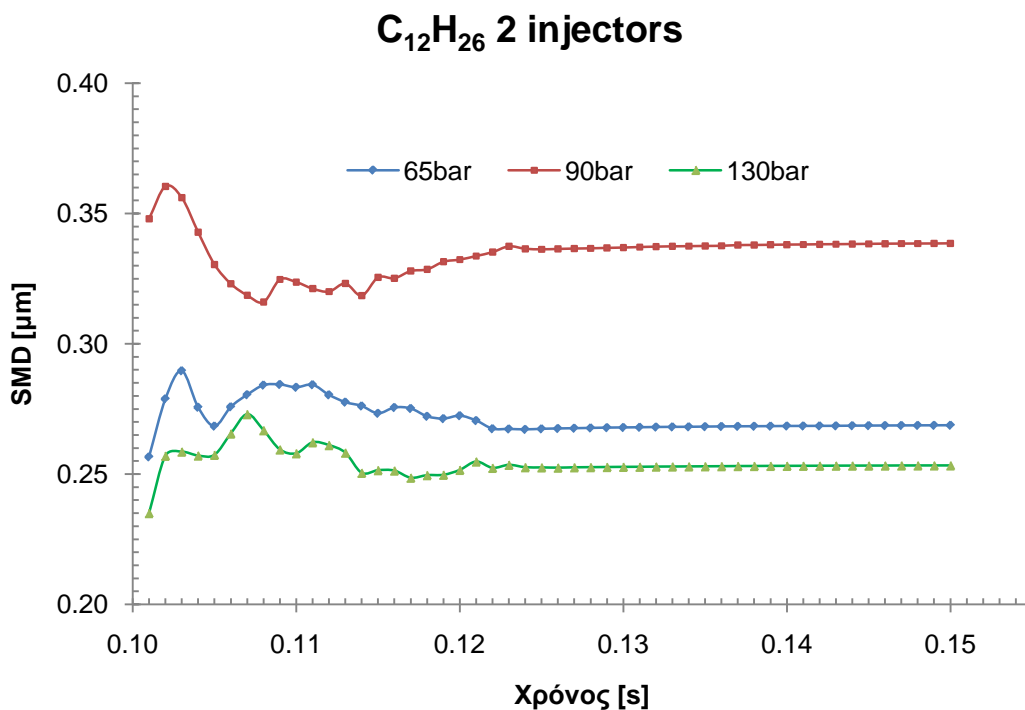
Σχήμα 4.23. Υπολογισθέν μήκος διείσδυσης του spray των εγχυτήρων A και B συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης. Καύσιμο C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>.



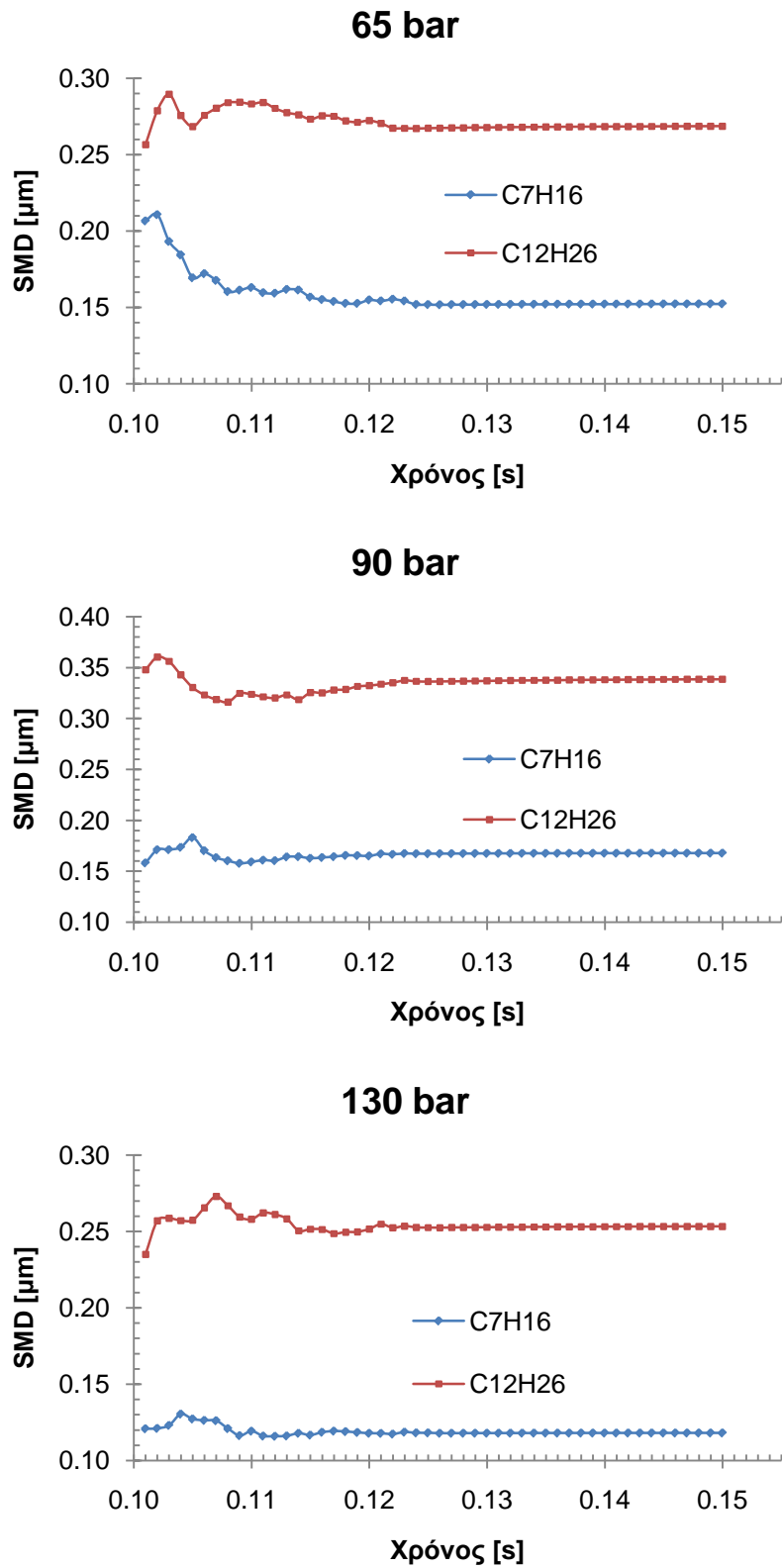
Σχήμα 4.24. Υπολογισθέν μήκος διείδυσης του spray των εγχυτήρων A και B συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικά καύσιμα, και πιέσεις 65, 90 και 130 bar.



Σχήμα 4.25. Η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter σε συνάρτηση με τον χρόνο για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης, για καύσιμο C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>.



Σχήμα 4.26. Η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter σε συνάρτηση με τον χρόνο για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης, για καύσιμο C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>.



**Σχήμα 4.27.** Η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter συναρτήσει του χρόνου και για διαφορετικά καύσιμα, για πιέσεις 65, 90 και 130 bar.



Στο σχήμα 4.17 παρατηρείται ότι για πίεση 65 bar εντός του θαλάμου καύσης και για τα δύο καύσιμα, το spray είναι αρκετά διασκορπισμένο σχετικά νωρίς. Η διαπίστωση αυτή δικαιολογείται απόλυτα εξαιτίας της σχετικά χαμηλής πίεσης, και επομένως έχουμε την εικόνα ενός σχετικά αραιού spray με έντονη διείδυση. Στο σχήμα 4.18 παρατηρείται ότι για πίεση 90 bar εντός του θαλάμου καύσης, και για τα δύο καύσιμα, ο ψεκασμός είναι λιγότερο διασκορπισμένος για τα ίδια χρονικά διαστήματα, γεγονός που δικαιολογείται από την αύξηση της πίεσης εντός του θαλάμου καύσης. Ομοίως, στο σχήμα 4.19 για πίεση 130 bar παρατηρείται η πλέον πυκνή δομή spray από τις τρεις περιπτώσεις, και άρα η μικρότερη διείδυση για τα ίδια χρονικά σημεία. Επομένως, με αύξηση της πίεσης εντός του θαλάμου καύσης, η δομή του spray είναι περισσότερο πυκνή, και χαρακτηρίζεται από μικρότερο μήκος διείδυσης.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις είναι σε αντιστοιχία και με τα σχήματα 4.21 και 4.23, όπου είναι εμφανές ότι για κάθε εγχυτήρα (A και B) ξεχωριστά, και για τα δύο καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ( $C_7H_{16}$  και  $C_{12}H_{26}$ ), το μήκος διείδυσης του spray παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές του για πίεση εντός του θαλάμου καύσης 65 bar, και τις μικρότερες για 130 bar, ενώ για πίεση εντός του θαλάμου καύσης 90 bar οι τιμές του μήκους διείδυσης είναι ενδιάμεσες των άλλων δύο περιπτώσεων.

Επίσης, μια παρατήρηση αναφορικά με την επίδραση του καυσίμου είναι πως με χρήση δωδεκανίου ( $C_{12}H_{26}$ ) το spray χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο μήκος διείδυσης, σε σχέση με το επτάνιο ( $C_7H_{16}$ ). Η διαφορά γίνεται ακόμα πιο αισθητή όσο αυξάνεται η πίεση εντός του θαλάμου καύσης, και είναι εμφανής στο σχήμα 4.24, όπου παρουσιάζεται το μήκος διείδυσης του spray των εγχυτήρων A και B σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τα δύο καύσιμα, για τις τρεις πιέσεις των προσομοιώσεων (65, 90 και 130 bar). Επομένως, με βάση τις διαφορετικές ιδιότητες των δύο καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν (σχήματα 4.6 και 4.7) είναι δυνατό να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι αυτές επιδρούν καθοριστικά στο μήκος διείδυσης του spray. Πιο συγκεκριμένα, το δωδεκάνιο χαρακτηρίζεται από υψηλότερες τιμές της επιφανειακής τάσης. Συνεπώς, τα σταγονίδια δωδεκανίου χαρακτηρίζονται από βραδύτερους ρυθμούς διάσπασης. Με βάση την κινητική μιας σφαιρικής σταγόνας, μπορεί να αποδειχτεί ότι η επιβράδυνσή της είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το μέγεθος της διαμέτρου της. Έτσι, οι (μεγαλύτερες) σταγόνες δωδεκανίου χαρακτηρίζονται από εντονότερη διείδυση εντός του θαλάμου καύσης.

Στα σχήματα 4.25 και 4.26, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter σε συνάρτηση με τον χρόνο, για διαφορετικές πιέσεις εντός του θαλάμου καύσης, ξεχωριστά για κάθε καύσιμο, ισχύει ό,τι και στις περιπτώσεις των εγχύσεων των τριών εγχυτήρων, δηλαδή τα αποτελέσματα αναφέρονται στο σύνολο του spray (καί στους δύο εγχυτήρες). Το αξιοπρόσεχτο στα σχήματα 4.25 και 4.26 είναι πως, ενώ και για τα δύο καύσιμα, στην περίπτωση πίεσης 130 bar εντός του θαλάμου καύσης οι τιμές της μέσης διαμέτρου Sauter είναι οι χαμηλότερες, στις άλλες δύο

περιπτώσεις των 65 και 90 bar παρουσιάζονται ιδιομορφίες. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση χρήσης επτανίου ( $C_7H_{16}$ ), οι τιμές της μέσης διαμέτρου Sauter για πίεση θαλάμου καύσης 90 bar στα χρονικά διαστήματα 0.1045 – 0.1059 s και 0.111 – 0.150 s είναι μεγαλύτερες από αυτές για πίεση θαλάμου καύσης 65 bar στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα (σχήμα 4.25). Αντίστοιχα, στην περίπτωση χρήσης δωδεκανίου ( $C_{12}H_{26}$ ), οι τιμές της μέσης διαμέτρου Sauter για πίεση θαλάμου καύσης 90 bar είναι σταθερά μεγαλύτερες από αυτές για πίεση 65 bar (σχήμα 4.26). Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις της έγχυσης με χρήση τριών εγχυτήρων, το μέγεθος της μέσης διαμέτρου Sauter καί στις έξι περιπτώσεις (τρεις διαφορετικές πιέσεις του θαλάμου καύσης για κάθε ένα από τα δύο καύσιμα) παραμένει σταθερό από ένα χρονικό σημείο και μετέπειτα. Αυτό το χρονικό σημείο φαίνεται να είναι καί στις έξι περιπτώσεις το σημείο που σταματά η έγχυση του καυσίμου, δηλαδή  $t = 0.1238$  s. Τέλος, με βάση το σχήμα 4.27, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης διαμέτρου Sauter σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τα δύο καύσιμα της παρούσας μελέτης (πιέσεις 65, 90 και 130 bar), συμπεραίνεται ότι η χρήση καυσίμου μεγαλύτερης επιφανειακής τάσης ( $C_{12}H_{26}$  σε σχέση με το  $C_7H_{16}$ ) έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές μέσης διαμέτρου Sauter, για τις ίδιες συνθήκες. Το γεγονός αυτό είναι απόρροια του βραδύτερου ρυθμού διάσπασης των σταγονιδίων, εξαιτίας της σταθεροποιητικής επίδρασης της επιφανειακής τάσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Συμπεράσματα - Προτάσεις

---

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η έγχυση καυσίμου σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου, για συνθήκες αντιπροσωπευτικές μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων Diesel. Ο θάλαμος καύσης αντιστοιχεί σε πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος HERCULES. Δημιουργήθηκε υπολογιστικό πλέγμα με 340000 κελιά, το οποίο περιλάμβανε και τμήμα του αγωγού εισαγωγής. Για την αριθμητική προσομοίωση έγινε χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Star-CD, και υπολογίστηκαν περιπτώσεις μη εξατμιζόμενου spray, με χρήση δύο διαφορετικών καυσίμων (επτάνιο και δωδεκάνιο), για τρεις συνθήκες πίεσης εντός του θαλάμου καύσης (65, 90 και 130 bar).

Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν, και υπολογίστηκαν χαρακτηριστικά μεγέθη του spray, συγκεκριμένα το μήκος διείδυσης και η διάμετρος SMD (Sauter Mean Diameter). Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι με αύξηση της πίεσης εντός του θαλάμου αυξάνεται ο ρυθμός διάσπασης των σταγονιδίων του spray, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαμέτρου SMD, καθώς και του μήκους διείδυσης. Αναφορικά με την επίδραση του καυσίμου, τα αποτελέσματα για δωδεκάνιο αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου SMD και του μήκους διείδυσης, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα για επτάνιο. Αυτό είναι απόρροια, κυρίως, της μεγαλύτερης τιμής της επιφανειακής τάσης του δωδεκανίου, η οποία οδηγεί σε βραδύτερους ρυθμούς διάσπασης των σταγονιδίων, και συνεπώς σε μεγαλύτερο μέγεθος σταγονιδίων, και εντονότερη διείδυση του spray.

### 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η κατανόηση της ροής του spray καυσίμου εντάσσεται στη γενικότερη έρευνα για τη βελτίωση των σύγχρονων κινητήρων Diesel. Η ρευστομηχανική του spray, είναι

ιδιαίτερα πολύπλοκη, και συνεπώς ο υπολογισμός της ροής του spray είναι εξαιρετικά σύνθετος και δυσχερής. Οι δυσκολίες καταδείχτηκαν καί στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, στην οποία υπολογίστηκε η ροή του μη εξατμιζόμενου spray καυσίμου σε θάλαμο καύσης σταθερού όγκου. Εντούτοις, από φυσική άποψη, τα αποτελέσματα συνάδουν με τις αναμενόμενες τάσεις, και θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η σύγκρισή τους με πειράματα.

Σε συνέχεια της παρούσας μελέτης, τα επόμενα βήματα πρέπει να περιλάβουν τη ρεαλιστικότερη προσομοίωση της ροής του spray, με χρήση κατάλληλων μοντέλων εξάτμισης του καυσίμου, καθώς και την προσομοίωση της ροής με παρουσία χημικών αντιδράσεων (καύση). Τέλος, θα πρέπει να τεθεί ως στόχος η προσομοίωση του spray βαρέος καυσίμου, με χρήση πρόσφατα αναπτυχθέντος μοντέλου [31].

## Πηγές

- [1] G. Stiesch (2003) “Modeling Engine Spray and Combustion Processes”, Springer-Verlag, ISBN 3-540-00682-6.
- [2] Π.Ι. Κοντούλης (2008) “Υπολογιστική Μελέτη Εναλλακτικών Στρατηγικών Έγχυσης σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
- [3] C. Baumgarten (2006) “Mixture Formation in Internal Combustion Engines”, Springer-Verlag, ISBN 103-540-30835-0.
- [4] C. Chryssakis (2005) “A Unified Fuel Spray Breakup Model for Internal Combustion Engine Applications”, Ph.D Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan.
- [5] Ν.Π. Κυρτάτος (1993) “Ναυτικοί Κινητήρες Diesel, Θέματα Σχεδίασης και Λειτουργίας”, Εκδόσεις Συμμετρία, ISBN 960-266-002-3.
- [6] Ν.Π. Κυρτάτος (2000) “Σημαντικά Θέματα Έρευνας και Εξέλιξης στους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel”, ΕΜΠ.
- [7] P.J. O'Rourke (1981) “Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays”, Ph.D. Thesis, Princeton University.
- [8] R.D. Reitz, F.V. Bracco (1986) “Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets”, The Encyclopedia of Fluid Mechanics, Gulf Publishing, Houston, Texas, Vol. 3, Chapter 10, pp. 233-249.
- [9] R.D. Reitz (1978) “Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet”, Ph.D. Thesis, Princeton University.
- [10] A. Leipertz (2005) “Spray and Atomization”, Workshop “Clean I.C. Engines and Fuels”, Louvain-la-Neuve, Presentation 07.04.05.
- [11] R.D. Reitz, F.V. Bracco (1982) “Mechanism of Atomization of Liquid Jets”, The Physics of Fluids, Vol. 25, pp. 1730-1742.
- [12] R.D. Reitz (1987) “Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays”, Atomization and Spray Technology, Vol.3, pp. 309-337.
- [13] S.P. Lin, R.D. Reitz (1998) “Drop and Spray Formation from a Liquid Jet”, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 30, pp. 85-105.
- [14] R.D. Reitz (1994) “Computer Modeling of Sprays”, Spray Technology Short Course, Pittsburgh.
- [15] G.M. Faeth, L.P. Hsiang, P.K. Wu (1995) “Structure and Breakup Properties of Sprays”, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 21, pp. 99-127.
- [16] M. Pilch, C.A. Erdman (1987) “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.

- [17] G.M. Faeth (1987) “Mixing, Transport and Combustion in Sprays”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 13, pp. 293-345.
- [18] L. Allocca, A. De Vita, L. Di Angelo (2002) “Wall-Impingement Analysis of a Spray from a Common Rail Injection System for Diesel Engines”, THIESEL 2002 Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, pp. 67–76.
- [19] A. Mohammadi, Y. Kidoguchi, K. Miwa (2002) “Effect of Injection Parameters and Wall-Impingement on Atomization and Gas Entrainment Processes in Diesel Sprays”, SAE paper 2002-01-0497.
- [20] K. Herrmann, R. Schulz, G. Weisser (2007) “Development of a Reference Experiment for Large Diesel Engine Combustion System Optimization”, PAPER NO.: 98, CIMAC Congress 2007, Vienna.
- [21] <http://www.ip-hercules.com>
- [22] K. Herrmann (2004) “HERCULES Advanced Combustion Concepts Test Facility: Spray/Combustion Chamber”, HERCULES Integrated Project Report.
- [23] K. Herrmann (2006) “Task 2.1: Combustion Process Simulation Spray/Combustion Chamber Development and Test Facility Erection Status”, Presentation 03.10.2006, Copenhagen.
- [24] K. Herrmann (2005) “Task 2.1: Combustion Process Simulation Spray/Combustion Chamber Development and Test Facility Erection Status”, Presentation 22.09.2005, Athens.
- [25] K. Herrmann, A. Kyrtatos, R. Schulz, G. Weisser (2009) “Validation and Initial Application of a Novel Spray Combustion Chamber Representative of Large Two-Stroke Diesel Engine Combustion Systems”, ICLASS, Vail, Colorado USA, July 2009.
- [26] CD adapco Group (2004) “pro-STAR COMMANDS”, STAR-CD version 3.20.
- [27] CD adapco Group (2004) “USER GUIDE”, STAR-CD version 3.20.
- [28] CD adapco Group (2004) “TUTORIALS”, STAR-CD version 3.20.
- [29] K.Y. Huh, A.D. Gosman (1991) “A Phenomenological Model of Diesel Spray Atomisation”, Proceedings, International Conference on Multiphase Flow (ICMF '91), Tsukuba, Japan.
- [30] R.D. Reitz, R. Diwakar (1986) “Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays”, SAE Technical Paper Series 860469.
- [31] N. Kyriakides, C. Chryssakis, L. Kaiktsis (2009) “Influence of Heavy Fuel Properties on Spray Atomization for Marine Diesel Engine Applications”, SAE Technical Paper 2009-01-1858, Florence, Italy.