

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Εγκατάσταση και Δοκιμές Κλειστού Κυκλώματος Ψεκαστικού Συστήματος Καυσίμου σε Υψηλές Πιέσεις.



ΡΑΠΑΝΑΚΗΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ Α.Μ. 6290  
ΛΟΥΜΑΝΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Α.Μ 6261  
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Π.Υ)

ΠΑΤΡΑ  
ΜΑΙΟΣ 2016



<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ</b> .....	1
<b>ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ</b> .....	1
<b>ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.</b> .....	1
<b>ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ</b> .....	1
<b>Εγκατάσταση και Δοκιμές Κλειστού Κυκλώματος Ψεκαστικού Συστήματος Καυσίμου σε Υψηλές Πιέσεις</b> .....	1
<b>ΡΑΠΑΝΑΚΗΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ Α.Μ. 6290</b> .....	1
<b>ΛΟΥΜΑΝΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Α.Μ 6261</b> .....	1
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	6
Ο σπουδαστής .....	7
Υπογραφή .....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	8
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	9
<b>1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ</b> .....	13
1.1 Σύντομη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	13
1.2 Διαδικασία Διάσπασης Σταγονιδίων (Atomization) .....	14
1.3 Σχηματισμός Στατικής Σταγόνας .....	16
1.4 Σχηματισμός και διάσπαση του spray (Breakup of Drops) .....	17
1.5 Διάσπαση Σταγόνας σε Ρεύμα Αέρα .....	18
1.6 Διάσπαση Υγρών Jet (Disintegration of Liquid Jets) .....	25
1.7 Επίδραση του Προφίλ των Ταχυτήτων .....	28
1.8 Μεγέθη Σταγονιδίων .....	30
1.9 Γραφική Αναπαράσταση Μεγεθών .....	31
1.10 Μαθηματικές Συναρτήσεις Κατανομών .....	32
1.10.1 Κανονική Κατανομή (Normal Distribution) .....	33
1.10.2 Λογαριθμική Κανονική Κατανομή (Log-Normal Distribution) .....	34
1.11 Εμπειρικές Συναρτήσεις Κατανομών .....	35
1.11.1 Nukiyama – Tanasawa .....	35
1.11.2 Rosin-Rambler .....	35
1.11.3 Τροποποιημένη Rosin-Rambler .....	36
1.11.4 Συνάρτηση Ανώτατου Ορίου .....	37
1.12 Χαρακτηριστικές Μέσες Διάμετροι .....	37
1.12.1 Αντιπροσωπευτικές Διάμετροι .....	38
1.12.2 Συμπεράσματα .....	39
1.13 Είδη Ακροφυσίων - Εκχυτήρων .....	39
1.13.1 Ακροφύσια δύο ρευστών. (Twin Fluid) .....	41
1.13.2 Φθορά Ακροφυσίων .....	42
1.13.3 Quick Change – Quick Connect ακροφύσια .....	43
1.14 Γενικοί Τύποι Ακροφυσίων .....	43
1.14.1 FULL CONE NOZZLES .....	43
1.14.2 FLAT NOZZLES .....	44
1.14.3 HOLLOW CONE NOZZLES .....	45
1.15 Αεροπορικές εφαρμογές .....	46
<b>2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ</b> .....	47
2.1 Κύκλος καυσίμου .....	47
2.2 Θάλαμος δοκιμών .....	47
2.3 Εξαερωτής .....	49
2.4 Αντλία καυσίμου .....	50
2.5 Ηλεκτρικό μοτέρ .....	51
2.6 Ακροφύσιο .....	52
2.7 Περιφερειακά .....	53



2.8	Η Οπτική διάταξη (PDA) αποτελείται από :	53
3	Οπτική Τεχνική Μέτρησης.....	55
3.1	Οπτική Τεχνική Ανεμομετρίας Laser - Doppler (LDA) .....	55
3.1.1	Εισαγωγή.....	55
3.1.2	Φαινόμενο Doppler .....	55
3.1.3	Μοντέλο Κροσσών Συμβολής.....	57
3.1.4	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά όγκου ελέγχου .....	58
3.1.5	Μετατόπιση Συχνότητας .....	59
3.1.6	Πηγές θορύβου .....	61
3.2	Οπτική Τεχνική Ανεμομετρίας Φάσης - Doppler (PDA) .....	62
3.2.1	Εισαγωγή.....	62
3.2.2	Σχέση μεταξύ Διαμέτρου Σωματιδίου και Διαφοράς Φάσης.....	64
3.2.3	Κλίση της Σχέσης Διαμέτρου - Φάσης .....	67
3.2.4	Διαχείριση της 2π - ασάφειας .....	68
3.2.5	Έλεγχος της Σφαιρικότητας. ....	70
3.2.6	Πηγές Σφαλμάτων του PDA.....	72
3.2.7	Λειτουργία του Οπτικού Συλλογής PDA.....	73
3.2.8	Τρόποι Σκέδασης (Βελτίωση Συνθηκών Μέτρησης).....	74
3.2.9	Βελτιστοποίηση Συνθηκών Μέτρησης. ....	76
3.2.10	Εξάρτηση του γεωμετρικού παράγοντα $\beta$ από τον δείκτη διάθλασης.....	77
3.2.11	Μεταβολή της ευαισθησίας και του εύρους μεγεθών. ....	78
3.2.12	Συνθήκες Μέτρησης Οπτικής Διάταξης. ....	78
3.2.13	Αξιολόγηση μετρήσεων σωματιδίων .....	80
3.2.14	Εκφράσεις μεγέθους των σταγονιδίων .....	82
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	87
4.1	Αξονική Εξέλιξη. ....	89
4.2	Εγκάρσια Εξέλιξη. ....	91
5	Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα. ....	95
6	Αναφορές.....	97

.Εικόνα 1:Μηχανισμοί Διάσπασης σταγονιδίων.....	11
Εικόνα 2 Διάσπαση σταγονιδίου.....	16
Εικόνα 3:Διάγραμμα Ohnesorge: συστήματα διάσπασης δέσμης .....	20
Εικόνα 4:Αναπαράσταση των συστημάτων διάσπασης.....	21
Εικόνα 5:Μήκος διάσπασης της δέσμης συναρτήσει της ταχύτητάς της, ABC: Ροή σταγόνων, CD: Διάσπαση Rayleigh, EF: Πρώτη ανεμογενής διάσπαση, FG (FH): Δεύτερη ανεμογενής διάσπαση, Πέραν του G (H): Μηχανισμός διάσπασης σε σταγονίδια [21].....	21
Εικόνα 6:Μηχανισμοί διάσπασης – Σχέση μήκους διάσπασης και ταχύτητας δέσμης.....	22
Εικόνα 7:Διάσπαση σφαιρικής σταγόνας λόγω αλληλεπίδρασης.....	25
Εικόνα 8:Σύγκριση α) ιδανικής διάσπασης πίδακα με β) πραγματική διάσπαση όπως φαίνεται από φωτογραφίες υψηλής ταχύτητας. ....	27
Εικόνα 9Διάφορες κατανομές ταχυτήτων σε πίδακες όπως αναφέρονται” .....	29
Εικόνα 10 Φάσμα μεγεθών σταγονιδίων .....	31
Εικόνα 11:Τυπικό σχέδιο συσσωρευτικής καμπύλης κατανομής μεγεθών .....	32
Εικόνα 12:Κανονική και λογαριθμική - κανονική κατανομή. ....	33
Εικόνα 13:Τυπική γραφική παράσταση Rosin-Rambler. ....	36
Εικόνα 14:Σύγκριση κατανομής Rosin-Rambler και τροποποιημένης. ....	36
Εικόνα 15:Θέσεις διαφόρων αντιπροσωπευτικών διαμέτρων. ....	39
Εικόνα 16 Διάφοροι τύποι ψεκασμού .....	40
Εικόνα 17:Ακροφύσιο Πίεσης της Delavan και της Spraying Systems.....	41
Εικόνα 18: Ακροφύσιο δύο ροών α) εσωτερική β) εξωτερική μίξη.....	41
Εικόνα 19 Φθορά ακροφυσίων .....	42
Εικόνα 20 Quick Change ακροφύσιο .....	43
Εικόνα 21 FULL CONE NOZZLES.....	44
Εικόνα 22 FULL CONE NOZZLES.....	44
Εικόνα 23 FLAT NOZZLES.....	45
Εικόνα 24 FLAT NOZZLES.....	45
Εικόνα 25 HOLLOW CONE NOZZLES.....	46
Εικόνα 26 Αεροπορικά ακροφύσια.....	46
Εικόνα 27 Θάλαμος δοκιμών.....	48
Εικόνα 28: Οπτική Διάταξη σε λειτουργία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. ....	48
Εικόνα 29: Πειραματική διάταξη - Εφαρμογή Πειραματικής Τεχνικής. ....	49
Εικόνα 30 Εξαερωτής.....	49
Εικόνα 31 Αντλία καυσίμου .....	50
Εικόνα 32 Ηλεκτρικό μοτέρ.....	50
Εικόνα 33 Εύκαμπτος σωλήνας υψηλής πίεσης .....	51
Εικόνα 34 Μανόμετρο.....	51
Εικόνα 35 Χαρακτηριστικά ακροφυσίου. (Spraying Systems Co). ....	52
Εικόνα 36: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης.....	54
Εικόνα 37: Σκέδαση φωτός από (α) μία δέσμη σε κινούμενο σωματίδιο, (β) Σκέδαση φωτός από δύο εισερχόμενες δέσμες λέιζερ. ....	56
Εικόνα 38: Μέθοδος διπλής ακτίνας (Tropea et al. 2007). ....	56
Εικόνα 39: Διαμόρφωση κροσσών κατά τη συμβολή δύο δεσμών λέιζερ (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	58
Εικόνα 40: Επίπεδα έντασης φωτός στον όγκο ελέγχου (Tropea et al. 2007). ....	58
Εικόνα 41: Διαστάσεις όγκου ελέγχου κατά τη συμβολή δύο ακτίνων λέιζερ (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	59
Εικόνα 42: Σχέση ταχύτητας-συχνότητας α) χωρίς, β) με μετατόπιση συχνότητας (Tropea 2007). 60	60
Εικόνα 43: Doppler burst και φιλτραρισμένο σήμα με την dc συνιστώσα να έχει απομακρυνθεί. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	62
Εικόνα 44: Η διαφορά Doppler που εμφανίζεται σε έναν φωτοανιχνευτή (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	62
Εικόνα 45: Η σχέση των κροσσών με την ταχύτητα του σωματιδίου και τη συχνότητα της κυματομορφής. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	63
Εικόνα 46: Ανίχνευση φωτός από δύο φωτοπολλαπλασιαστές σε διαφορετική γωνία σκέδασης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	63
Εικόνα 47: Εξάρτηση της διαφοράς φάσης από τη διάμετρο του σωματιδίου (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	64



Εικόνα 48:Σχηματική παράσταση των γωνιών του οπτικού συστήματος (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	65
Πίνακας 3.2 Κυριότερα Χαρακτηριστικά Οπτικών.....	66
Εικόνα 49:Ορισμός των κυριότερων τρόπων σκέδασης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	66
Εικόνα 50:Το αποτέλεσμα της αλλαγής της γωνίας $\psi$ και της γωνίας $\theta$ στην κλίση της συνάρτησης διαμέτρου σωματιδίου-φάσης. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	68
Εικόνα 51:Η διαφορά φάσης που προκαλείται από σωματίδια αυξανόμενων διαμέτρων και η περίπτωση διαφοράς φάσης μεγαλύτερης από $2\pi$ . (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	69
Εικόνα 52:Επιλογή της μοναδικής σωστής τιμής $\Phi 13$ με τη βοήθεια δύο ζευγών φωτοδιόδων.(BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	69
Εικόνα 53:Η διαφορά $\Delta D$ στη διάμετρο αντιστοιχεί στη διαφορά των δύο φάσεων και οφείλεται στη μη σφαιρικότητα του σωματιδίου. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	70
Εικόνα 54:Επίδραση της αβεβαιότητας στην εκτίμηση της διαφοράς φάσης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	71
Εικόνα 55:Διάγραμμα κριτηρίου αξιολόγησης σφαιρικότητας σωματιδίων (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	71
Εικόνα 56:Η επίδραση της τροχιάς (trajectory effect) σε όρους γεωμετρικής οπτικής (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	73
Εικόνα 57:Υποβάθμιση του σκεδαζόμενου φωτός λόγω του ανοίγματος σχισμής (slit effect). (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	74
Εικόνα 58:Φακός συλλογής και φωτοπολλαπλασιαστές. ....	74
Εικόνα 59:Εστίαση δέσμης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	74
Εικόνα 60:Ορισμός Γωνιών σκέδασης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	75
Εικόνα 61:Πολικό διάγραμμα κατανομής έντασης σκεδαζόμενου φωτός σταγόνων νερού σε αέρα. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).....	77
Εικόνα 62:Η επίδραση της σχέσης δείκτη διάθλασης - γωνίας σκέδασης στον γεωμετρικό παράγοντα. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics). ....	79
Εικόνα 63:Ο γεωμετρικός παράγοντας $\beta$ ως συνάρτηση της γωνίας σκέδασης $\varphi$ για διάφορους δείκτες διάθλασης. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics) ....	79
Εικόνα 64:Τυπικά σήματα κροσσών –bursts (Tropea 2007). ....	81
Εικόνα 65:Ανίχνευση και έλεγχος σωματιδίου με χρήση τριών επιπέδων. ....	81
Πίνακας 3.3 Μέσοι Διάμετροι και Εφαρμογές ..... 84	84
Εικόνα 66:Σημεία Μετρήσεων. ....	87
Εικόνα 67:Εικόνα οπτικού σήματος (Doppler burst - κροσσοί συμβολής) στον παλμογράφο. ....	87
Εικόνα 68:Κατανομή της μέσης τιμής κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας κατάντι της ροής. 89	89
Εικόνα 69:Κατανομή της μέσης διαμέτρου των σταγονιδίων. ....	90
Εικόνα 70:Εγκάρσιες Κατανομές μέσων κατακόρυφων συνιστωσών της ταχύτητας σε πιέσεις. ...	91



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην πειραματική εγκατάσταση θαλάμου δοκιμών για τον χαρακτηρισμό ροής δέσμης καυσίμου σε υψηλές πιέσεις. Η όλη διάταξη είναι τοποθετημένη στο Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών και στον συγκεκριμένο χώρο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του χαρακτηρισμού της δέσμης πετρελαίου κίνησης.

Κίνητρο για την παρούσα πτυχιακή εργασία αποτέλεσε το πρόβλημα της καταλληλότητας και επάρκειας καυσίμων όπως αυτό τέθηκε στην έκθεση Vision 2020 του Γνωμοδοτικού Ευρωπαϊκού Συμβουλίου για την Αεροναυτική. Σύμφωνα με την έκθεση δεν αναμένεται ανάπτυξη νέων κινητήρων αεροσκαφών, μέχρι τουλάχιστον το 2020 ο CFM 56 θα κυριαρχεί τόσο στα επιβατικά όσο και στα πολεμικά αεροσκάφη οπότε η προσπάθεια έγγυται στη βελτίωση της σύστασης του καυσίμου που μπορεί να διαχειριστεί ο συγκεκριμένος τύπος turbojet.

Η νομοθεσία για τις εκπομπές ρύπων καυσίμων αεροσκαφών ως γνωστόν καθορίζονται από την Παγκόσμια Οργάνωση Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organisation – ICAO) και την Επιτροπή Αεροπορικής Περιβαλλοντικής Προστασίας (Comission Aviation Enviromental Protection – CAEP). Οι κανονισμοί γίνονται όλο και πιο αυστηροί τα τελευταία χρόνια προσφέροντας το κίνητρο για σχεδιασμό νέων κινητήρων που θα παράγουν χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>.

Δεδομένου ότι οι κατασκευάστριες εταιρίες δεν προτίθενται να παρουσιάσουν νέους κινητήρες πριν το 2020 η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται με τη βελτίωση των καυσίμων που παραδοσιακά είναι τύποι κηροζίνης, με τον εμπλουτισμό αυτών με τύπους εναλλακτικών καυσίμων (βιοκαυσίμων) μικρότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα, για λόγους μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub>, καθαρότερου περιβάλλοντος, μείωση του κόστους μεταφοράς με στόχο την αύξηση ή τουλάχιστον τη διατήρηση των εσόδων των εταιριών. Για παράδειγμα στο παρελθόν με την εισαγωγή του CFM-56 η μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> έφτασε το 80%.

Η χρήση των υπαρχόντων τύπων κινητήρων, η ασφάλεια πτήσης όσο και επί εδάφους, η σταθερότητας αποθήκευσης αλλά πολύ περισσότερο οι αυστηρές απαιτήσεις σε καύσιμα υψηλού ενεργειακού περιεχομένου περιορίζει το είδος των εναλλακτικών καυσίμων σε τύπου κηροζίνης. Τα εναλλακτικά αυτά καύσιμα δηλ. παράγονται από πετρέλαιο ώστε να είναι συμβατά με την υπάρχουσα τεχνολογία κινητήρων αεροσκαφών διατηρώντας παρόμοια χαρακτηριστικά με την κηροζίνη. Τα εναλλακτικά καύσιμα δηλ. έχουν ως βάση την κηριζίνη και είναι εμπλουτισμένα με χαμηλές περιεκτικότητες προσθέτων ώστε να παρουσιάζουν παρόμοια υψηλή απόδοση καύσης, βελτιωμένη καύση χωρίς υπόλοιπα, μειωμένη περιεκτικότητα σε άνθρακα με τελικό αποτέλεσμα την ελάττωση εκπομπών ρύπων.

Με αναφορά το πλαίσιο όπως αναπτύχθηκε παραπάνω, στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας ο στόχος είναι η μελέτη της ισόθερμης κατάστασης ψεκασμού ως πλαίσιο αναφοράς για την μετέπειτα δοκιμή σε συνθήκες καύσης. Επισημαίνεται ότι ο χαρακτηρισμός δέσμης αν και αποτελεί μια τετριμμένη διαδικασία, εντούτοις αποτελεί κρίσιμη διαδικασία για την μετέπειτα συμπεριφορά των υγρών καυσίμων κατά την καύση τους. Ειδικότερα επιδιώκεται συνθήκη ψεκασμού σε υψηλές πιέσεις ώστε να προσεγγίζεται όσο το δυνατόν ο ψεκασμός καυσίμου σε αεροπορικό κινητήρα. Ειδικότερα για να επιτευχθεί η συνθήκη προσομοίωσης θα πρέπει οι πιέσεις δοκιμών να προσεγγίζουν τα 50bar που είναι και η πίεση σε πραγματικές συνθήκες. Με αυτό το





στόχο έχει σχεδιαστεί θάλαμος δοκιμών και στην εργασία αυτή δοκιμάστηκε ως καύσιμο το πετρέλαιο κίνησης σε πιέσεις ψεκασμού έως και 18bar. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε αντλία πετρελαίου με δυνατότητα πίεσης λειτουργίας έως και 25bar, ενώ το ακροφύσιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν γενικού τύπου (generic) full – cone.

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα Παν/κό Υπότροφο κ.Βούρο Α., υπεύθυνο καθηγητή για την παρούσα εργασία, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Ευχαριστούμε το προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνικής Θερμοδυναμικής για τη φιλοξενία στις εγκαταστάσεις του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την υπομονή και στήριξη που μας παρείχαν κατά την πραγματοποίηση της εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής  
(Ονοματεπώνυμο)

.....  
Υπογραφή



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη εγκατάστασης και οι δοκιμές ψεκαστικού συστήματος καυσίμου – πετρελαίου κίνησης σε υψηλές πιέσεις εντός θαλάμου δοκιμών σε ισόθερμες συνθήκες.

Πιο αναλυτικά η δομή της εργασίας υποδιαιρείται σε κεφάλαια ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια να αναλυθούν διαδικασίες που σχετίζονται με τη δυναμική των σταγονιδίων, όπως η διαδικασία δημιουργίας σταγονιδίων και τα στάδια διάσπασης αυτών. Καταγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μελέτη της δυναμικής σταγονιδίων. Βασικό σύγγραμμα για τη μελέτη αποτέλεσε το βιβλίο *Sprays and atomization* του Lefebvre A.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης. Περιγράφεται αναλυτικά ο κύκλος καυσίμου, ο θάλαμος δοκιμών η αντλία καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε με τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία της και όλα τα δευτερεύοντα μέρη της διάταξης. Τέλος δίνονται τα χαρακτηριστικά του ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη του ψεκασμού καυσίμου, που ως τέτοιο χρησιμοποιήθηκε πετρέλαιο κίνησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς η οπτική μέθοδος παρακολούθησης της ροής. Δίνονται οι βασικές αρχές της τεχνικής Ανεμμομετρίας Laser – Doppler και η επέκταση αυτής γνωστή ως Ανεμομετρία Φάσης – Doppler κύριο πλεονέκτημα της οποίας είναι η ταυτόχρονη μέτρηση μιας συνιστώσας της ταχύτητας παράλληλα με τη μέτρηση του μεγέθους σταγονιδίων. Βασικό σύγγραμμα αποτέλεσε το υλικό της κατασκευάστριας εταιρίας (*Dantec PDA User's Guide*) καθώς και τμήμα της διδακτορικής διατριβής του κ.Βούρου Α. (2013).

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διαδικασία κατά τις δοκιμές (καταγραφή – επεξεργασία μετρήσεων) καθώς και το πρόγραμμα εργασίας για την καταγραφή της ροής δέσμης σταγονιδίων. Επίσης στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η ανάλυση των μετρήσεων και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Καταγράφονται οι διαφοροποιήσεις ως προς προηγούμενες εργασίες επί του θέματος (λειτουργία γρναζωτής αντλίας), τονίζονται τα σημεία βελτίωσης της πειραματικής διαδικασίας ενώ δίνεται και το βασικό πλάνο για τη συνέχιση της μελέτης σε επόμενες εργασίες, με το ζητούμενο να είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών καύσης.





## Εισαγωγή

Η ευαισθητοποίηση του κοινού και η πολιτική ανησυχία για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανάπτυξης της βιομηχανίας καθώς επίσης και η συνεχόμενη αύξηση της ζήτησης ενέργειας λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της ευημερίας, καθιστά αναγκαία την προσπάθεια εύρεσης νέων πόρων για την κάλυψη των αναγκών μας (φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες, βιοκαύσιμα). Καθώς το ενδιαφέρον για το περιβάλλον αυξάνεται, το ίδιο κάνει και η προσπάθεια βελτίωσης της ήδη πολύ επιβαρυσμένης ατμόσφαιρας του πλανήτη που σχετίζεται με την αντιμετώπιση των ΝΟx και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη.

Συμμετέχοντας στην κοινή αυτή προσπάθεια ο τομέας των αερομεταφορών εξετάζει εναλλακτικές λύσεις για το πρόβλημα της καταλληλότητας και της επάρκειας καυσίμων. Στην έκθεση Vision 2020 που έγινε από το γνωμοδοτικό συμβούλιο για την αεροναυτική έρευνα στην Ευρώπη το 2001 τέθηκαν στόχοι για τη μείωση του θορύβου και των εκπομπών που παράγονται από την ολοένα αυξανόμενη παγκόσμια αερομεταφορά. Η νομοθεσία για τις εκπομπές, που καθορίζονται από τη διεθνή οργάνωση πολιτικής αεροπορίας International Civil Aviation Organisation (ICAO) και την επιτροπή για την αεροπορική περιβαλλοντική προστασία Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP), γίνονται όλο και πιο αυστηροί δημιουργώντας έτσι μία ισχυρή κινητήρια δύναμη για τη διερεύνηση νέων σχεδίων κινητήρων αεροσκαφών που παράγουν λιγότερο CO<sub>2</sub> και εκπομπές ΝΟx.

Από την άλλη πλευρά, οι αεροπορικές εταιρείες πρέπει να μειώνουν συνεχώς το κόστος λειτουργίας τους προκειμένου να αυξηθεί ή τουλάχιστον να διατηρήσουν τα έσοδα τους στα ίδια επίπεδα. Αυτό το εισάγει μία επιπλέον πρόκληση αφού οι κινητήρες πρέπει να σχεδιαστούν για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς και το άμεσο κόστος λειτουργίας. Η εκπομπή CO<sub>2</sub> είναι ευθέως ανάλογη με την κατανάλωση καυσίμου. Για παράδειγμα, στο παρελθόν οι εκπομπές CO<sub>2</sub> των αεροσκαφών είχαν μειωθεί σημαντικά, κυρίως μέσω της βελτίωσης των κινητήρων, με πρόσθετες μειώσεις στις αντιστάσεις πτήσης (άτρακτος). Έχοντας ως στόχο τη μείωση των εκπομπών κατά 80% ενώ παράλληλα η παγκόσμια ζήτηση επιβατικών αερομεταφορών συνεχίζει να αυξάνεται με ρυθμό 5% ετησίως, το μόνο μέτρο που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση των αεροπορικών εκπομπών ρύπων είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων μικρότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Η χρήση των υπαρχόντων τύπων κινητήρων, η ασφάλεια, η σταθερότητα αποθήκευσης και οι αυστηρές απαιτήσεις σε καύσιμα υψηλού ενεργειακού περιεχομένου περιορίζει το είδος των εναλλακτικών καυσίμων, σε τύπου κηροζίνης παραγόμενη από πετρέλαιο. Για να μην απαιτείται άμεσα η αλλαγή της υπάρχουσας τεχνολογίας κινητήρων αεροσκαφών, κάτι που θα κόστιζε πολύ στις εταιρείες, τα καύσιμα θα πρέπει να έχουν χαρακτηριστικά παρόμοια με την κηροζίνη και να είναι εμπλουτισμένα με χαμηλές περιεκτικότητες προσθέτων. Η αυξημένη απόδοση καύσης, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, η βελτιωμένη χωρίς υπόλοιπα καύση καθώς και η μειωμένη περιεκτικότητα σε άνθρακα καύσιμα έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση εκπομπών ρύπων. Αυτά είναι μερικά από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κινητήρων turbojet και αεροπορικών καυσίμων αυτής της γενιάς.

Οι γενικές κατηγορίες αεροπορικών καυσίμων είναι:

- Βενζίνη αεροπορίας (aviation gasoline)
- Καύσιμα για στροβιλοκινητήρες (turbine ή jet fuel)
- Καύσιμα για αεροπορικά βλήματα (missile fuel)



Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα και διακινούμενα αεροπορικά καύσιμα στην Ελλάδα και διεθνώς είναι τα καύσιμα στροβιλοκινητήρων (Jet Fuel) που ακολουθούν:

- JET A-1: Το σημαντικότερο καύσιμο της πολιτικής αεροπορίας. Παράγεται από επεξεργασμένη κηροζίνη με προσθήκη προσθέτων (αντιστατικών, αντιοξειδωτικών, βελτίωσης της λιπαντικότητας κ.λπ.).
- JET B: Παράγεται με ανάμιξη κηροζίνης με βαριά νάφθα.
- JP-8: Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο καύσιμο της πολεμικής αεροπορίας, αντίστοιχο με τα καύσιμα της πολιτικής αεροπορίας (αντίστοιχο του JET A1 με προσθήκη ενός επιπλέον αντιπαγωτικού προσθέτου).
- JP-4: Καύσιμο της πολεμικής αεροπορίας, συγκεκριμένης πτητικότητας η οποία επιτυγχάνεται με ανάμιξη κηροζίνης με βαριά νάφθα.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται με σκοπό την επιδίωξη των παραπάνω απαιτήσεων λέγονται “Drop-in” Biofuels. Τα drop-in βιοκαύσιμα είναι καύσιμα υδρογονανθράκων ουσιαστικά παρόμοια με τα καύσιμα βενζίνη, πετρέλαιο. Τα καύσιμα αυτά μπορούν να προκύψουν από μια ποικιλία πρώτων υλών βιομάζας, συμπεριλαμβανομένων των υπολειμμάτων των καλλιεργειών, ξυλώδη βιομάζα, ενεργειακές καλλιέργειες, και φύκια. Ο στόχος για τα drop-in βιοκαύσιμα είναι να καλύψουν τις υπάρχουσες ντίζελ, βενζίνη και αεροπορικές μηχανές, αφού θα πρέπει να ικανοποιούν τις αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές ποιότητας των αεροπορικών καυσίμων. Πρέπει ακόμα να ελεγχθούν για πιθανές άγνωστες επιπτώσεις και συμπεριφορές οι οποίες δεν καταγράφονται στις προδιαγραφές που αναπτύχθηκαν για καύσιμα που παράγονται παραδοσιακά από το πετρέλαιο. Τα drop-in στα καύσιμα βρίσκονται σε φάση έρευνας και ανάπτυξης, η τρέχουσα εστίαση αποσκοπεί στην αντικατάσταση της βενζίνης, ντίζελ, και τα καύσιμα αεριωθουμένων.

Σε αυτό το πλαίσιο οι έρευνες εστιάστηκαν στην δημιουργία εναλλακτικών καυσίμων με διαφορετική προέλευση. Έτσι λοιπόν έχουμε τους ακόλουθους τύπους εναλλακτικών καυσίμων:

- GTL (Gas to liquid)
- CTL (Coal to liquid)
- BTL (biomass to liquid)

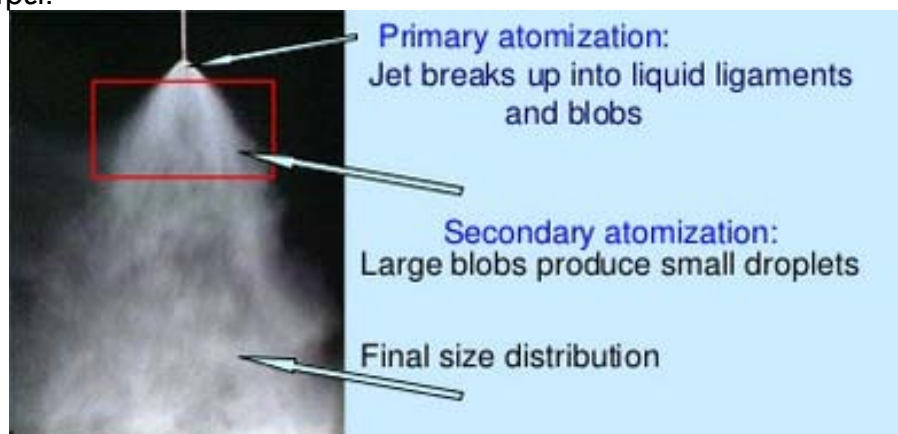
Τα καύσιμα αυτού του εναλλακτικού είδους συνηθίζεται να αναφέρονται ως xTL και όπως δηλώνει και το όνομα τους δείχνει τον τρόπο προέλευσής τους. Ανεξάρτητα από την υπόσταση της πρώτης ύλης, το τελικό προϊόν- εναλλακτικό καύσιμο θα είναι σε υγρή μορφή. Τα GTL καύσιμα αναφέρονται σε καύσιμα που προέκυψαν μέσω σταδιακής διαδικασίας μετατροπής φυσικού αερίου ή άλλων αέριων υδρογονανθράκων σε υδρογονάνθρακες μεγαλύτερων χημικών αλυσίδων όπως βενζίνα ή πετρέλαιο. Μέσω αυτής της σταδιακής διαδικασίας υδρογονάνθρακες που περιέχουν μεθάνιο με ένα μόνο βήμα μετατρέπονται σε μεθανόλη. Τα CTL καύσιμα αναφέρονται σε καύσιμα που προέκυψαν από τη διαδικασία μετατροπής του ορυκτού άνθρακα σε υγρό υδρογονάνθρακα-καύσιμο. Σήμερα το 50% του ορυκτού άνθρακα χρησιμοποιείται για CTL καύσιμο. Το ποσοστό αυτό τα επόμενα χρόνια πέσει δραματικά με την ανάπτυξη της Coal-to-Chemicals. Τέλος τα BTL καύσιμα είναι υγρά καύσιμα που προέκυψαν μέσω μιας διαδικασίας πολλών σταδίων από βιομάζα. Επίσης αυτό που μένει είναι να αξιολογηθούν οι περιβαλλοντικές, οικονομικές επιπτώσεις που είναι ως αποτέλεσμα της χρήσης των εναλλακτικών αεροπορικών καυσίμων.



Η κηροζίνη είναι ένα λεπτόρευστο απόσταγμα δωδεκανίου σε ποσοστό 70% και υδρογονανθράκων σε ποσοστό 30% με χαμηλό σημείο ανάφλεξης ( $<36^{\circ}\text{C}$ ). Τα εναλλακτικά καύσιμα που θα αντικαταστήσουν στο άμεσο μέλλον την κηροζίνη θα αποτελούνται από ένα μίγμα προϊόντων υδρογονανθράκων και κατάλληλων επιλεγμένων μονοκυκλικών, δικυκλικών αρωματικών υδρογονθράκων και νάφθες. Τα εναλλακτικά καύσιμα θα πρέπει να είναι πλήρως χαρακτηρισμένα ως προς τις φυσικές τους ιδιότητες, την πυκνότητα, το ιξώδες, τη θερμογόνο δύναμη και του λόγου ανάμιξης. Εκτός από τις παραπάνω ιδιότητες, πολύ σημαντικά είναι τα χαρακτηριστικά ψεκασμού και ατμοποίησης των υγρών καυσίμων γιατί οι διαδικασίες ψεκασμού και εξάτμισης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του κινητήρα και τις εκπομπές αερίων από τη διαδικασία της καύσης.

Στις μηχανές εσωτερικής καύσης τα υγρά καύσιμα σχηματίζουν ένα νέφος (spray) μετά τον ψεκασμό από το ακροφύσιο. Κατά τη διαδικασία του ψεκασμού το καύσιμο διασπάτε σε σταγονίδια με αποτέλεσμα ο βαθμός ατμοποίησης του να αυξάνεται περίπου 200 φορές. Μελετώντας την ροή του καυσίμου, καθώς εξέρχεται από ένα ακροφύσιο ( εικόνα ) το σπρέι μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές ανάλογα με τη συγκέντρωση του πλήθους των σωματιδίων. Στην περιοχή πολύ κοντά στο ακροφύσιο έχουμε έναν πυρήνα ροής, ο οποίος διασκορπίζεται στη συνέχεια σε μικρότερα τμήματα και καταλήγουν σε σταγονίδια (primary atomization). Στη δεύτερη περιοχή (secondary atomization) λόγω του κωνικού σχήματος του σπρέι και της ατμοποίησης ποσότητας καυσίμου η συγκέντρωση άρα και οι αποστάσεις των σταγονιδίων αυξάνονται.

Η απόδοση μιας μηχανής εσωτερικής καύσης επίσης εξαρτάται από το μέγεθος των σταγονιδίων που παράγονται από το ακροφύσιο. Επίσης η διάσπαση και η εξάτμιση παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση της καύσης. Το σπρέι είναι ένα σύνθετο σύστημα που χαρακτηρίζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως η κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων, η συγκέντρωση πλήθους σταγονιδίων καθώς και οι ταχύτητές τους. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν το σχήμα του σπρέι και την καύση. Κατά τη διαδικασία τα περισσότερα σωματίδια εξατμίζονται σε ομάδες και η αντίδραση γίνεται στη διεπιφάνεια ατμού- αέρα που περιβάλλει το νέφος αυτό. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες ψεκασμού ενός σπρέι είναι η παρουσία και η θέση των ζωνών ανακυκλοφορίας μέσα στο σπρέι. Καθώς τα σταγονίδια βρίσκονται κοντά στον πυρήνα υπάρχει πιθανότητα να συμβαίνουν συγκρούσεις μεταξύ αυτών λόγω διαφορετικών ταχυτήτων. Το αποτέλεσμα της σύγκρουσης μπορεί να είναι η συγχώνευση δύο σταγονιδίων, η ανάκλαση ή η διάσπαση τους. Ένα συχνό φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ιδιότητες του σπρέι είναι η παρουσία ζωνών ανακυκλοφορίας μέσα στο σπρέι.



**.Εικόνα 1:Μηχανισμοί Διάσπασης σταγονιδίων.**



Συμπερασματικά οι ιδιότητες ψεκασμού έχουν άμεση σχέση με τη διαδικασία της καύσης. Για αυτό το λόγο τα εναλλακτικά καύσιμα πρέπει να περάσουν μέσα από λεπτομερή πειράματα αξιολόγησης και μελέτης τους σε ψεκασμό. Πιο συγκεκριμένα οι μετρήσεις αυτές θα έχουν να κάνουν με τη μέτρηση του μεγέθους σταγονιδίων μέσω της χαρακτηριστικής διαμέτρου Sauter (SMD), αξονικών και εγκάρσιων κατανομών ταχυτήτων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, κατασκευή και οι δοκιμές πειραματικής διάταξης η οποία θα μπορεί να προσομοιάζει την ατμοποίηση των καυσίμων στις συνθήκες λειτουργίας του ακροφυσίου του αεροσκάφους. Στην μελέτη υπάρχει πρόβλεψη για πιέσεις μεγαλύτερες των 35 bar η οποία θα ρυθμίζεται από τη διάμετρο οπής του ακροφυσίου και τις στροφές του κινητήρα.



# 1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ

## 1.1 Σύντομη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα πειραματικών εργασιών αναφορικά με τη συμπεριφορά εναλλακτικών καυσίμων κατά τον ψεκασμό τους από ακροφύσια ειδικού τύπου κατά την διαδικασία της καύσης τους. Σε πολλές επίσης από τις εργασίες η πειραματική τεχνική είναι ίδια ή παρεμφερής με την τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία (PDA). Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά μερικές σχετικές εργασίες και συζητούνται τα αποτελέσματα αυτών.

Θεωρητικές και πειραματικές εργασίες σε συνθήκες καύσης υπό σταθερό ψεκασμό ανέδειξαν μια σχέση ανάμεσα στον ψεκασμό και την εξάτμιση του τγρού καυσίμου και το ρυθμό καύσης της φλόγας. Ο Spalding [1] καθιέρωσε θεωρητικά αυτή τη σχέση μέσω του αριθμού μεταφοράς  $B$  (transfer number), ο οποίος υπολογίστηκε επίσης σε πειράματα διαφορετικών διατάξεων. Έτσι, χαρακτηριστικοί χρόνοι εξάτμισης των σταγονιδίων μεγαλύτεροι από τη χαρακτηριστική κλίμακα χρόνου της τύρβης αποκάλυψαν μια ισχυρή επίδραση της εξάτμισης των σταγονιδίων στο ρυθμό καύσης (combustion rate) [2]. Ο Sornek [3] παρατήρησε ότι αυξανόμενης της έντασης της τύρβης αυξάνεται ο ολικός ρυθμός εξάτμισης ενός σπρέι κηροζίνης, οδηγώντας σε μια κατάσταση, όπου το καύσιμο ανμιγνυόταν τόσο αποτελεσματικά με τον αέρα, που έμοιαζε με ένα αεριώδες είδος. Σε μια άλλη πειραματική μελέτη με καύσιμο την κηροζίνη αεροσκαφών, βρέθηκε ότι η θερμοκρασία της ροής και το μέσο μέγεθος της σταγόνας αποτελούν σημαντικούς παράγοντες επηρεασμού την εξάτμιση του σπρέι. Στη συγκεκριμένη μελέτη το ακροφύσιο ψεκασμού ήταν τύπου περιδίνησης πίεσης (swirl pressure atomizer) και ο ψεκασμός γινόταν εντός μιας ροής ρεύματος αέρα [4].

Πιο βασικές πειραματικές και θεωρητικές μελέτες πραγματοποιήθηκαν με σπρέι μεθανόλης σε διατάξεις αντίθετης ροής (counter flow) [5] και ομοαξονικού ακροφυσίου ριπής αέρος (air – blast) [6], με σκοπό τη διερεύνηση της δομής της φλόγας, του αναπτυσσόμενου ροικού πεδίου και την εξάτμιση του σπρέι. Ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα είναι η επίδραση του υγρού σπρέι στη σταθεροποίηση της φλόγας. Ο Chigier [7] μελέτησε αυτή την επίδραση τόσο σε ισόθερμες συνθήκες, όσο και σε συνθήκες καύσης. Παρατήρησε την επίδραση της επιτάχυνσης σε συνθήκες φλόγας εντός ενός σπρέι κηροζίνης τύπου δακτυλίου τόσο για τις μεγάλες όσο και για τις μικρές σταγόνες. Επίσης αξιοσημείωτο ήταν το γεγονός ότι, η παρουσία των μικρών σταγόνων ήταν υψίστης σημασίας στην διαδικασία σταθεροποίησης της φλόγας.

Πολλές πειραματικές μελέτες με σπρέι κηροζίνης σε σταθεροποιημένης φλόγας καυστήρες [8-10] και σε ροές με εμόδιο (bluff-body) [11] ;έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά και μηχανισμούς σταθεροποίησης της φλόγας, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της διαμέτρου των σταγονιδίων. Λίγες πειραματικές μελέτες έχουν γίνει σε φλόγες σπρέι που παρουσιάζουν αστάθειες καύσης. Ο ενεργός έλεγχος (active – control) των αυτοενισχυόμενων ταλαντώσεων από το υγρό καύσιμο βρέθηκε να είναι ευαίσθητος στον ψεκασμό [12-13]. Η συμπεριφορά του ψεκασμού ενός βασικού ακροφυσίου ριπής αέρος (air – blast), μελετήθηκε υπό μια εξαναγκασμένη ταλάντωση, οδηγώντας σε μια σχεδόν σταθερή (quasi – steady) συσχέτιση, ανάμεσα στην ταχύτητα και τη διάμετρο των σταγονιδίων [14].





Η περίπτωση μιας ταλαντούμενης στρωτής κωνικού τύπου φλόγας σπρέι που υποβάλλεται σε ακουστικές αστάθειες μελετήθηκε με μέθοδο DNS (direct numerical simulation), η οποία ήταν ικανή να προβλέψει τη συνάρτηση μεταφοράς φλόγας (flame transfer function), σε καλή συμφωνία με πειραματικά δεδομένα [15]. Επίσης πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση για διάφορες διατάξεις αεριοστροβίλων καυστήρων (gas turbine combustors) έχει πραγματοποιηθεί [16 – 18].

Μια πειραματική διερεύνηση σχετικά με τη δυνατότητα μιας "διαλείπουσας" (intermittent) προσέγγισης ενεργητικού ελέγχου για την καταστολή των ασταθειών καύσης σε θαλάμους καύσης υγρών καυσίμων έχει πραγματοποιηθεί πιο πρόσφατα από τον Conrad [19]. Οι μετρούμενες ποσότητες περιελάμβαναν τα πλάτη των ασταθειών, την αξονική εξάρτηση του μέσου και του κυμαινόμενου πλάτους έκλυσης θερμότητας, καθώς και τα χαρακτηριστικά των ζωνών ανακυκλοφορίας, που όλα έδειξαν να εξαρτώνται από τις ιδιότητες του σπρέι καυσίμου. Οι ερευνητές σε αυτή την εργασία κατέληξαν στο ότι η μεταβολή στην παροχή αέρα είχε σαν αποτέλεσμα σημαντικές μεταβολές στο σχήμα του σπρέι καθώς και σε όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας (αξονική, εφαπτομενική και ακτινική).

Η μεταβολή στις ιδιότητες του σπρέι χαρακτηρίστηκε χρησιμοποιώντας μια διάταξη δύο συνιστωσών (PDPA - Phase Doppler Particle Analyzer). Η μέθοδος αυτή είναι μια επίσης διαδεδομένη τεχνική, (πέρα από την PDA – Phase Doppler Anemometry), για την μέτρηση της διαμέτρου των σταγονιδίων, των αξονικών και εφαπτομενικών ταχυτήτων καθώς και της ογκομετρικής παροχής. Το οπτικό σύστημα προσδιόριζε την εξάρτηση των δημιουργούμενων ιδιοτήτων του σπρέι, ως προς το λόγο παροχής του αέρα. Σε ότι αφορά την οπτική διάταξη, στον οπτικό δρόμο του PDPA χρησιμοποιήθηκαν: ένας φακός μεταφοράς με εστιακή απόσταση  $f = 300\text{mm}$  και ένας φακός συλλογής εστιακής απόστασης  $f = 750\text{mm}$ . Το οπτικό συλλογής τοποθετήθηκε σε γωνία  $30^\circ$  σε θέση σκέδασης προς τα εμπρός (forward scattering) ως προς το οπτικό συλλογής. Με αυτή την τοπολογία το PDPA μπορούσε να καταγράψει μεγέθη σταγονιδίων στο εύρος (0.7–220)  $\mu\text{m}$ .

## 1.2 Διαδικασία Διάσπασης Σταγονιδίων (Atomization)

Τα φαινόμενα ψεκασμού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλά τεχνικά συστήματα και βιομηχανικές εφαρμογές. Ανάμεσα σε αυτά μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η καύση με ψεκασμό εναλλακτικών καυσίμων στους κινητήρες αεροσκαφών.

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 [20]. Ο ρυθμός ατμοποίησης είναι ανάλογος με την επιφάνεια του υγρού καυσίμου. 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





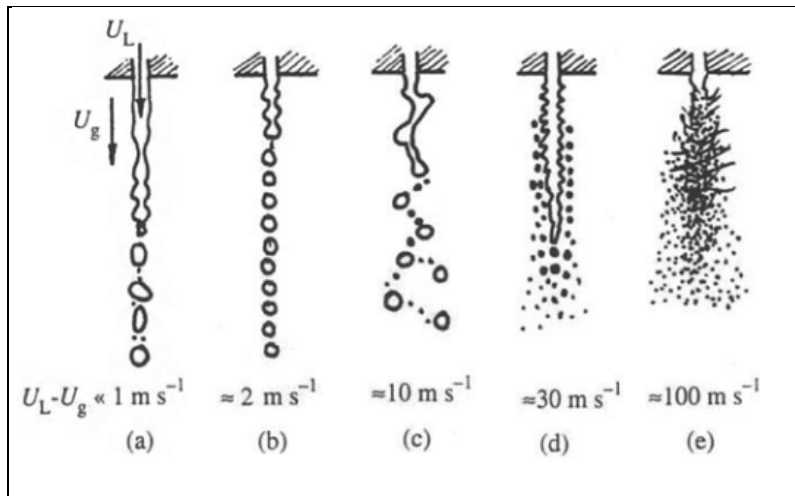
προφίλ και οι ταχύτητες έγχυσης του καυσίμου επηρεάζουν τις διεργασίες της έναυσης, της καύσης (ρυθμός έκλυσης θερμότητας), καθώς και τον σχηματισμό των κύριων ρύπων. Η προκύπτουσα χρονική μεταβολή της πίεσης επιδρά στα επίπεδα του θορύβου, και στην ειδική κατανάλωση του καυσίμου.

Συνεπώς, η λεπτομερής κατανόηση των διεργασιών ψεκασμού του καυσίμου είναι μεγάλης 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 αέρια φάση του αλλά και με την ίδια τη φλόγα [21]. Επιπλέον, οι θάλαμοι καύσης των μηχανών, στους οποίους σχηματίζεται η δομή της δέσμης και των σταγονιδίων καυσίμου (spray), αντιπροσωπεύουν ένα 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 τη μελέτη του σύνθετου φαινομένου του ψεκασμού και έτσι τις περισσότερες φορές δημιουργούνται διατάξεις προσομοίωσης προκειμένου να αναγνωρισθούν τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά των καυσίμων. Για παράδειγμα στην κοντινή περιοχή του ακροφυσίου (near field), το δημιουργούμενο σπρέι είναι πολύ πυκνό με αποτέλεσμα οι μετρήσεις της τρισδιάστατης δομής (μεγέθη σταγονιδίων, ταχύτητες κλπ) να είναι ακόμη πιο δυσχερείς, επειδή η πυκνή περιοχή δεν επιτρέπει ικανοποιητική οπτική πρόσβαση του εσωτερικού πυρήνα της.

Στη διαδικασία αυτή ένας όγκος υγρού μετατρέπεται σε μικρές σταγόνες. Είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη διασπορά ενός υγρού, κυρίως καυσίμου, έτσι ώστε να διανείμει το υγρό πάνω από μια συγκεκριμένη περιοχή με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας του υγρού για καλύτερη καύση, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερη καύση. Στην πραγματικότητα εξαλείφεται η σταθεροποιητική επίδραση της επιφανειακής τάσης με την εφαρμογή εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται ονομάζονται εκχυτήρες. Χαρακτηριστικό του κάθε εκχυτήρα είναι το ακροφύσιο. Ανάλογα με τον τύπο του ακροφυσίου πετυχαίνουμε διαφορετική διασπορά ενός καυσίμου ανάλογα με την λειτουργία που θέλουμε να εκτελεστεί. Ο μηχανισμός διάσπασης σε σωματίδια έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες και αν και οι πρωτοπόροι άρχισαν να μελετούν τη διαδικασία περισσότερο από εκατό χρόνια πριν, το θέμα εξακολουθεί να είναι εξαιρετικά αμφιλεγόμενο.

Η επιφανειακή τάση κρατάει το υγρό σε ένα σφαιρικό σχήμα, αφού έτσι έχει μικρότερη ενέργεια στην επιφάνεια. Το ιξώδες του υγρού επίσης προσπαθεί να σταθεροποιήσει το σχήμα με αντίσταση σε κάθε προσπάθεια αλλαγής της γεωμετρίας. Βέβαια οι αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν στην επιφάνεια του υγρού μπορούν να προκαλέσουν διάσπαση. Η διάσπαση αυτή εμφανίζεται όταν οι αεροδυναμικές δυνάμεις υπερβούν την δύναμη της επιφανειακής τάσης. Πολλές από τις σταγόνες που προήλθαν από την αρχική διάσπαση είναι ασταθείς και στη συνέχεια προχωρούν σε επιπλέον διάσπαση σε μικρότερες. Έτσι το τελικό εύρος μεγέθους του σταγονιδίου ενός spray εξαρτάται και από το δεύτερο στάδιο διάσπασης (secondary atomization). Η γνώση του μηχανισμού διάσπασης είναι αναγκαία για τον σχεδιασμό όλων των ακροφυσίων.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα η διάσπαση ενός υγρού για τη δημιουργία σπρέι είναι μια απλή διαδικασία ή οποία γίνεται χαοτική όσο αυξάνει η ταχύτητα της ροής.



**Εικόνα 2 Διάσπαση σταγονιδίου**

Ένας ιδανικός ψεκασμός καυσίμου μέσα σε έναν κινητήρα, θα ήταν ένας ψεκασμός σταγόνων ίδιου μεγέθους που σημαίνει ομοιόμορφη καύση στον κινητήρα. Παρόλ' αυτά στην πράξη δεν υπάρχει συσκευή ψεκασμού που να έχει σχεδιαστεί ώστε να προκαλεί ομοιόμορφο ψεκασμό. Προς το παρόν τα ψεκαστικά συστήματα που χρησιμοποιούνται παρέχουν υψηλό βαθμό ομοιογένειας. Συνοψίζοντας, η κύρια λειτουργία νεφελοποίησης είναι:

- Η δημιουργία μιας υψηλής αναλογίας επιφάνειας προς μάζα υγρού με αποτέλεσμα υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης
- Η παραγωγή σταγονιδίων με επιθυμητό σχήμα μέγεθος και πυκνότητα

Στα συστήματα έγχυσης καυσίμου οι εγχυτήρες (μπεκ) είναι τα εξαρτήματα μέσω των οποίων το καύσιμο διασκορπίζεται στο θάλαμο καύσης. Το μπεκ παραλαμβάνει το καύσιμο σε υψηλή πίεση και με την βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένων ακροφυσίων διασκορπίζουν το καύσιμο στο θάλαμο καύσης του κινητήρα. Το καύσιμο ψεκάζεται με υψηλή πίεση, της οποίας η μέγιστη τιμή φτάνει τα 1200bar. Το ακροφύσιο του εγχυτήρα παίζει σπουδαίο ρόλο στο τρόπο διασκορπισμού του καυσίμου. Η διάμετρος και το μήκος της οπής καθώς και η όλη η γεωμετρία του ακροφυσίου καθορίζουν τον τρόπο διασκορπισμού του καυσίμου μέσα στον θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν κατά πολύ την ισχύ εξόδου, την κατανάλωση του καυσίμου και τις εκπομπές καυσαερίων. Πλέον έχει δημιουργηθεί μία ευρεία γκάμα μοντέλων ψεκασμού και γωνίων ψεκασμού, επίπεδη σπρέι, σταθερή ροή, πλήρη κώνο, κοίλο κώνο, σπρέϋ, οβάλ και τετράγωνο με γωνίες από 0 ° έως 170 ° ανάλογα με τη διεργασία που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε. Τα ακροφύσια δημιουργούνται από διάφορα υλικά, ώστε να είναι ανθεκτικά στη φθορά, στη θερμοκρασία και στη διάβρωση.

### 1.3 Σχηματισμός Στατικής Σταγόνας

Ο στοιχειώδης σχηματισμός ψεκασμού είναι μια κρεμασμένη σταγόνα που είναι ημιστατική περίπτωση. Υγρό εκρέει αργά από ένα στόμιο και όταν η δύναμη της βαρύτητας υπερβεί την δύναμη που το προσκολλά στο στόμιο, το υγρό πέφτει και σχηματίζεται μια σταγόνα.



Αν  $d_0$  η διάμετρος του λεπτού κυκλικού σωλήνα η μάζα της σταγόνας είναι

$$m_D = \frac{\pi d_0^3 \sigma}{8} \quad (1.3.1)$$

Το μέγεθος της σφαιρικής σταγόνας που αντιστοιχεί στην  $m_D$  είναι

$$D = \left( \frac{6d_0^3 \sigma}{\rho_L g} \right)^{1/3} \quad (1.3.2)$$

Αν η διάμετρος του λεπτού σωλήνα είναι  $1 \mu\text{m}$  θα προκύψουν σταγόνες  $3.6 \mu\text{m}$  για το νερό και  $2.6 \mu\text{m}$  για κηροζίνη. Αν η διάμετρος του σωλήνα γίνει  $10 \mu\text{m}$  τότε η σταγόνα νερού θα είναι  $784 \mu\text{m}$  και  $560 \mu\text{m}$  για κηροζίνη. Για την απομάκρυνση μιας σταγόνας από μία οριζόντια βρεγμένη επιφάνεια, φαινόμενο που εμφανίζει και δύναμη βαρύτητας και δύναμη επιφανειακής τάσης οι Tamada και Shiback δίνουν το μέγεθος της σταγόνας από τη σχέση:

$$D = 3.3 \left( \frac{\sigma}{\rho_L \cdot g} \right)^{0.5} \quad (1.3.3)$$

Η τελευταία εξίσωση δείχνει ότι σταγόνες που σχηματίζονται αργά με την δράση της βαρύτητας επάνω σε ένα υγρό φιλμ θα είχαν διάμετρο  $9 \mu\text{m}$  για το νερό  $5 \mu\text{m}$  για την κηροζίνη. Με τον τρόπο αυτό, ο μηχανισμός πραγματοποιείται με αργό ρυθμό και δίνει μεγάλες σταγόνες. Σε πρακτικές εφαρμογές ο μηχανισμός αυτός είναι συνήθως αναποτελεσματικός αφού έχουμε υψηλούς ρυθμούς ροής και πολύ λεπτή διαμέριση. Η δύναμη βαρύτητας είναι σημαντική μόνο για τον σχηματισμό μεγάλων σταγόνων και γίνεται αμελητέα για σταγόνες από  $1$  έως  $300 \mu\text{m}$ .

#### 1.4 Σχηματισμός και διάσπαση του spray (Breakup of Drops)

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 σπηλαιώσης, 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.[21]

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). 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. 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 [21]. 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 στα επόμενα. 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,

Για παράδειγμα, 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, θα πρέπει να λαμβάνεται επίσης υπόψη και η 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.

## 1.5 Διάσπαση Σταγόνας σε Ρεύμα Αέρα

Στην διαδικασία αυτή ένας όγκος υγρού μετατρέπεται σε μικρές σταγόνες. Στην πραγματικότητα εξαλείφεται η σταθεροποιητική επίδραση της επιφανειακής τάσης με την εφαρμογή εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων. Η δράση της επιφανειακής τάσης είναι να κρατήσει το υγρό σ' ένα σφαιρικό σχήμα, αφού έτσι έχει μικρότερη ενέργεια στην επιφάνεια. Το ιξώδες του υγρού επίσης προσπαθεί να σταθεροποιήσει το σχήμα με αντίσταση σε κάθε προσπάθεια αλλαγής της γεωμετρίας.

Από την άλλη μεριά αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν στην επιφάνεια του υγρού μπορούν να προκαλέσουν διάσπαση. Έτσι αυτή εμφανίζεται όταν οι αεροδυναμικές δυνάμεις υπερβούν την δύναμη επιφανειακής τάσης. Βέβαια πολλές από τις μεγαλύτερες σταγόνες που προκλήθηκαν με την αρχική διαδικασία διάσπασης είναι ασταθείς και προχωρούν σε επιπλέον διάσπαση σε μικρότερες. Έτσι το τελικό εύρος μεγεθών σταγόνας που παράγεται σε ένα spray εξαρτάται και από αυτό το δεύτερο στάδιο. Η γνώση του μηχανισμού διάσπασης είναι αναγκαία για τον σχεδιασμό όλων των ακροφυσίων.

Μια αυστηρή μαθηματική λύση θα απαιτούσε την ακριβή γνώση της κατανομής της αεροδυναμικής πίεσης επάνω στη σταγόνα. Πάντως, μόλις η σταγόνα αλλάξει σχήμα, αλλάζει και η κατανομή της πίεσης γύρω από αυτή και είτε υπάρχει σχέση ισορροπίας μεταξύ των εξωτερικών αεροδυναμικών δυνάμεων και των εσωτερικών λόγω επιφανειακής τάσης και ιξώδους είτε η παραμόρφωση συνεχίζεται οδηγώντας σε διάσπαση της σταγόνας.



Σε συνθήκες ισορροπίας η εσωτερική πίεση σε κάθε σημείο της επιφάνειας της σταγόνας  $P_i$  θα ισορροπεί την εξωτερική αεροδυναμική  $P_A$  και την πίεση λόγω επιφανειακής τάσης  $P_\sigma$ .

$$P_i = P_A + P_\sigma = \text{σταθερό} \quad (1.5.1)$$

και για σφαιρική σταγόνα,  $P_\sigma = \frac{4\sigma}{D}$ . (1.5.2)

Είναι φανερό ότι μια σταγόνα μένει σταθερή όσο μια αλλαγή στην πίεση του αέρα μπορεί να αντισταθμιστεί από αντίστοιχη μεταβολή της  $P_\sigma$  ώστε η  $P_i$  να είναι σταθερή. Αν η  $P_A$  είναι μεγάλη σε σχέση με την  $P_\sigma$  τότε καμιά σημαντική μεταβολή της  $P_A$  δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από αντίστοιχη μεταβολή της  $P_\sigma$ . Σ' αυτήν την κατάσταση η εξωτερική πίεση  $P_A$  μπορεί να αλλάξει το σχήμα της σταγόνας σε τέτοια έκταση που οδηγεί σε αλλαγή της  $P_\sigma$  και τελικά να διασπάσει τη σταγόνα σε μικρότερες. Γ' αυτές τις μικρότερες σταγόνες η υψηλότερη τιμή της  $P_\sigma$  μπορεί να είναι αρκετή για να συνοδεύσει τις αλλαγές της  $P_A$ . Αν αυτό δεν συμβαίνει ακολουθεί νέα υποδιαίρεση, έως ότου η  $P_\sigma$  γίνει αρκετά μεγάλη. Τότε η κατάσταση είναι σταθερή και δεν συμβαίνει περαιτέρω διαίρεση. Οι συλλογισμοί αυτοί μας επιτρέπουν να ορίσουμε ένα κρίσιμο μέγεθος σταγόνας στο οποίο σταματά η διαδικασία της διάσπασης.

Βασιζόμενοι στη σχετική ταχύτητα και στις ιδιότητες του υγρού και του περιβάλλοντα αέρα, η διάσπαση της υγρής δέσμης ελέγχεται από διαφορετικούς μηχανισμούς. Οι μηχανισμοί αυτοί συχνά χαρακτηρίζονται από την απόσταση μεταξύ της εξόδου του ακροφυσίου και του σημείου σχηματισμού της πρώτης σταγόνας (αναφερόμενο και ως μήκος διάσπασης), καθώς και του μεγέθους του σταγονιδίου που παράγονται.

Σύμφωνα με τον Reitz [36], η διαδικασία διάσπασης μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τέσσερα στάδια: 1) τη διάσπαση κατά Rayleigh, 2) το πρώτο και 3) δεύτερο ανεμογενές στάδιο (wind induced regime) και 4) το στάδιο του ψεκασμού (atomization regime). Για να δοθεί μια ποσοτική έκφραση της διαδικασίας διάσπασης της δέσμης, ο Ohnesorge απέδειξε ότι η διαδικασία αποσύνθεσης μπορεί να περιγραφεί από:

-Τον αριθμό Weber,  $We = \frac{\rho_l u^2 D}{\sigma}$  (1.5.3)

-Τον αριθμό Reynolds,  $Re = \frac{\rho_l u D}{\mu_l}$  (1.5.4)

Ο αριθμός Weber είναι χρήσιμος στην ανάλυση του σχηματισμού των σταγονιδίων, στα οποία η αλληλεπίδραση μεταξύ υγρού και αερίου είναι εμφανής. Μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μέτρο της σχετικής σημαντικότητας της αδρανείας των υγρών σε σχέση με την επιφανειακή τους τάση. Ο Ohnesorge προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω δημιούργησε έναν νέο αδιάστατο αριθμό ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις σχετικές ιδιότητες των υγρών: επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια υγρού - αερίου (N/m),  $\rho_l$ : πυκνότητα του υγρού ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu_l$  δυναμικό ιξώδες του υγρού, όπως επίσης και της διαμέτρου  $D$  των σταγονιδίων. Αξιοσημείωτο είναι ότι στον χαρακτηριστικό αυτό αριθμό περιλαμβάνονται μόνο οι ιδιότητες του υγρού που ψεκάζεται ενώ απουσιάζει η ταχύτητα της δέσμης.

Ο αριθμός Ohnesorge δίνεται  $Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma \rho_l D}}$  (1.5.5)

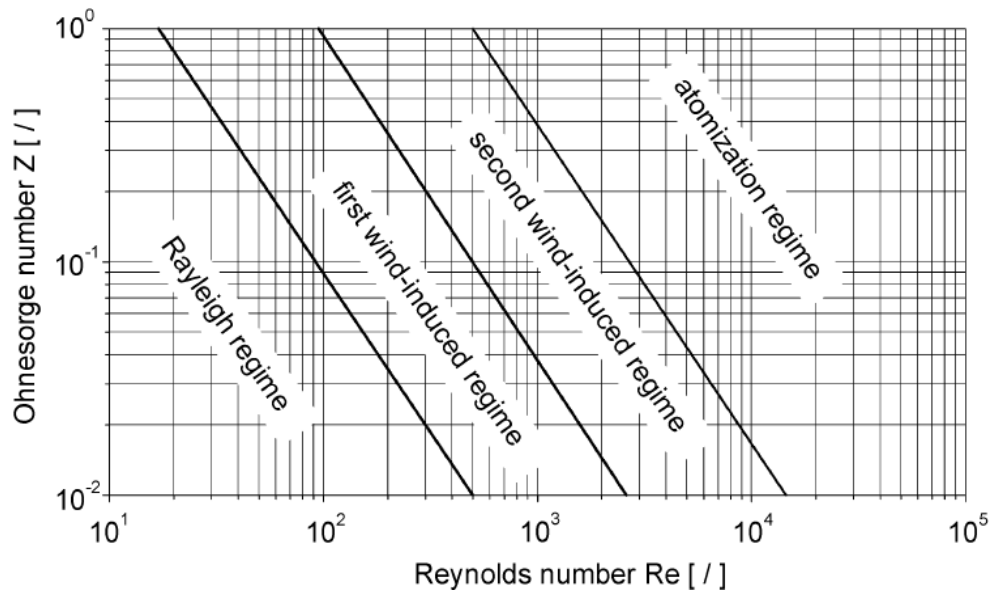
Ο αριθμός Ohnesorge είναι ο λόγος της ιξώδους δύναμης του υγρού προς τη δύναμη της επιφανειακής τάσης του σταγονιδίου. Επίσης παίζει ένα σημαντικό ρόλο στο δευτερεύοντα ψεκασμό (Secondary Atomization). Μαθηματικά, αν ο αριθμός  $We$





υπερβαίνει το  $We_{crit}$ , επέρχεται ο μηχανισμός (SA). Για υγρά με χαμηλό ιξώδες,  $We_{crit} = 6$  to 13 για  $Oh < 0.1$ ,  $We_{crit} \sim Oh^2$  για  $Oh > 0.1$ .

Στο Σχήμα 2.1 ο αριθμός  $Oh$  δίνεται ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds. Για σταθερές συνθήκες, τα όρια μεταξύ των τεσσάρων σταδίων διάσπασης, μπορούν να χαραχθούν. Παρ όλα αυτά, έχει αποδειχθεί ότι περιλαμβάνοντας μόνο τις ιδιότητες της υγρής φάσης κατά την περιγραφή των περιοχών – μηχανισμών διάσπασης εμφανίζεται ανεπάρκεια, επειδή ο ψεκασμός μπορεί να επηρεαστεί μέσω αύξησης της πυκνότητας του αερίου.



**Εικόνα 3: Διάγραμμα Ohnesorge: συστήματα διάσπασης δέσμης**

Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες, έχουμε σταγονοειδή ροή και δεν μπορεί να σχηματισθεί δέσμη. Μια αύξηση της  $u$  επιδρά στο σχηματισμό ενός μήκους δέσμης μη διασπασμένου, που αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας (διάσπαση Rayleigh). Τα σταγονίδια είναι αποκομμένα από τη δέσμη και το μέγεθός τους είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο της εξόδου του ακροφυσίου, (σχήμα 2.2α).

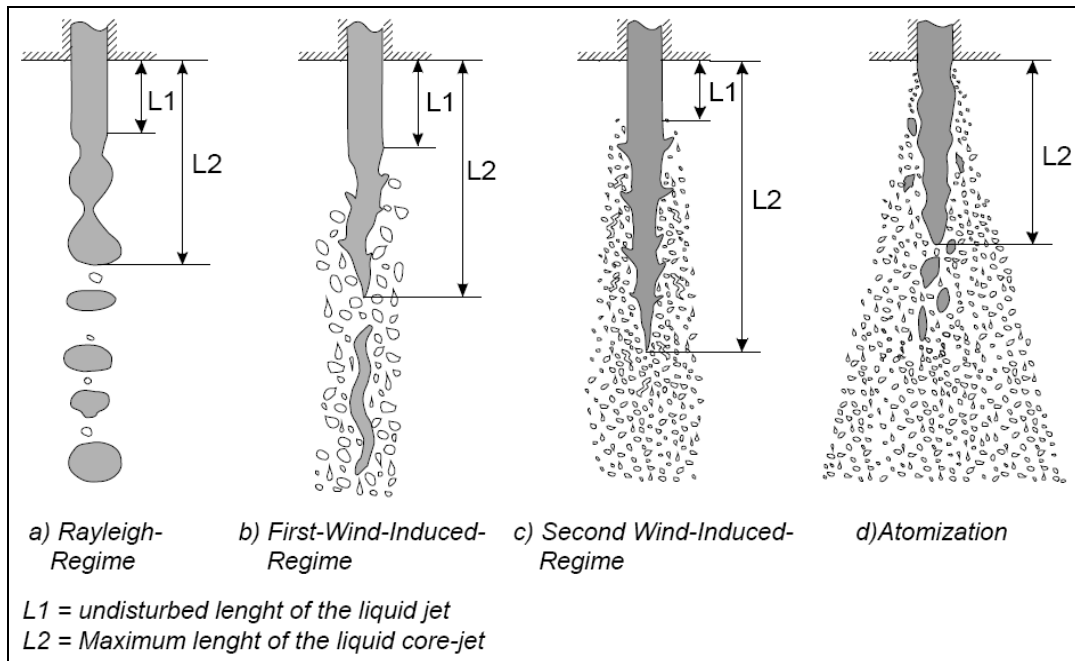
Μια περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα της δέσμης επιδρά στο μήκος διάσπασής της, παραμένοντας όμως πολλαπλάσιο της διαμέτρου. Το μέσο μήκος των σταγονιδίων μειώνεται και βρίσκεται τώρα στο εύρος της διαμέτρου του ακροφυσίου. Αυτά αποτελούν τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού διάσπασης που αναφέρεται ως πρωτογενής ανεμογενής (first-wind-induced regime), όπου οι σχετικές δυνάμεις του μηχανισμού Rayleigh ενισχύονται από αεροδυναμικές δυνάμεις (σχήμα 2.2b).

Κατά τον μηχανισμό δευτερογενούς ανεμογενούς διάσπασης (second-wind-induced regime), η ροή εντός του ακροφυσίου γίνεται τυρβώδης. Η διάσπαση της δέσμης επέρχεται τώρα εξ αιτίας της ασταθούς ανάπτυξης μικρού μήκους κύματος επιφανειακών κυμάτων που ξεκίνησαν από την τυρβώδη δέσμη και ενισχύθηκαν από αεροδυναμικές δυνάμεις, ως επακόλουθο της σχετικής ταχύτητας μεταξύ αερίου και υγρού (σχήμα 2.2c). Η διάμετρος των σταγονιδίων που προκύπτουν είναι μικρότερη από τη διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ το μήκος διάσπασης μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds (τμήμα FG σχήματος 2.3). Η δέσμη δεν διασπάται πλέον ως σύνολο. Εξαιτίας του διαχωρισμού μικρών σταγονιδίων από την επιφάνεια της δέσμης, η διαδικασία διάσπασης ξεκινά από την επιφάνεια και σταδιακά διαβρώνει τη δέσμη, έως ότου η τελευταία διασπαστεί πλήρως. Ενώ το μήκος της ανέπαφης επιφάνειας μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας δέσμης, το μήκος του πυρήνα ενδέχεται να αυξηθεί [33].

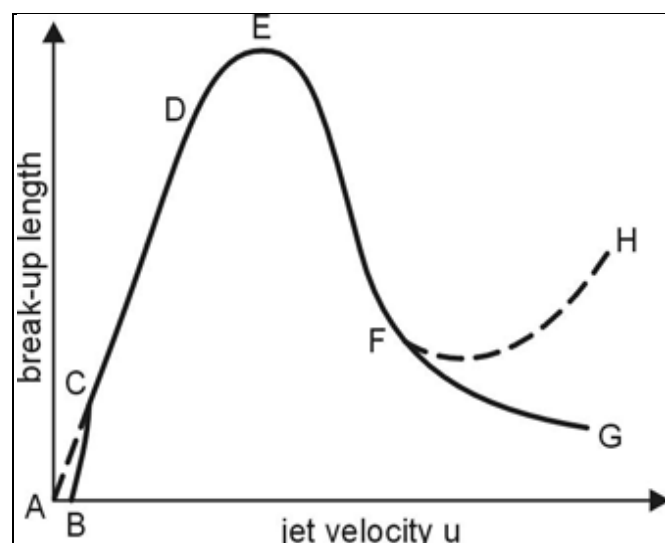




Ο μηχανισμός ψεκασμού επιτυγχάνεται όταν το μήκος της ανέπαφης επιφάνειας πλησιάσει στο μηδέν. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται κωνική δέσμη και η γωνία απόκλισης της δέσμης ξεκινά αμέσως αφότου η τελευταία εξέλθει του ακροφυσίου, δηλαδή το μέγιστο της γωνίας δέσμης παρατηρείται εντός του ακροφυσίου. Ενδέχεται, ωστόσο, να υπάρξει και ανέπαφος ή τουλάχιστον πυκνός πυρήνας μεγάλων ποσοτήτων υγρού αρκετές διαμέτρους στα κατάντη του ακροφυσίου. Αυτή είναι η σχετική κατάσταση της δέσμης καυσίμων μηχανών. Τα προκύπτοντα σταγονίδια είναι πολύ μικρότερα από τη διάμετρο του ακροφυσίου.



**Εικόνα 4: Αναπαράσταση των συστημάτων διάσπασης**



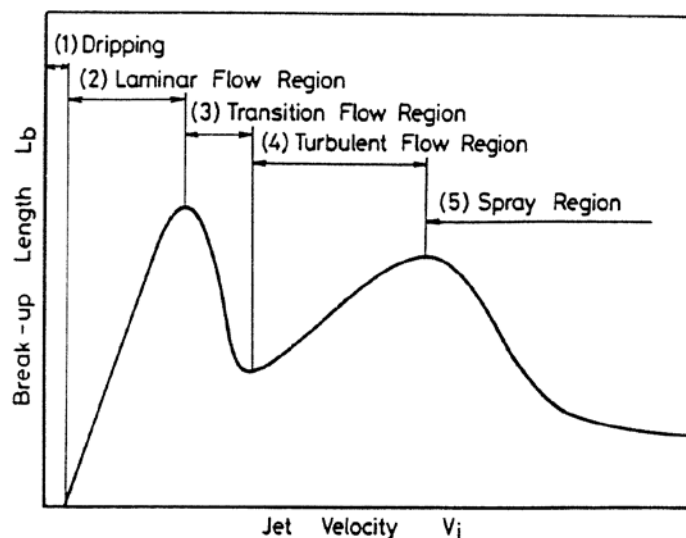
**Εικόνα 5: Μήκος διάσπασης της δέσμης συναρτήσει της ταχύτητάς της, ABC: Ροή σταγόνων, CD: Διάσπαση Rayleigh, EF: Πρώτη ανεμογενής διάσπαση, FG (FH): Δεύτερη ανεμογενής διάσπαση, Πέραν του G (H): Μηχανισμός διάσπασης σε σταγονίδια [21]**



Η θεωρητική περιγραφή της διάσπασης δέσμης στο σύστημα ψεκασμού καυσίμου είναι πολύ πιο σύνθετη από οποιοδήποτε άλλο σύστημα, καθώς η διαδικασία διάσπασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες ροής του υλικού εντός του ακροφυσίου, οι οποίες είναι συνήθως άγνωστης και χαοτικής φύσεως. Εκτός αυτού, η επαλήθευση μοντέλων είναι επίσης δύσκολη, διότι τα πειράματα είναι εξαιρετικά περίπλοκα λόγω των υψηλών ταχυτήτων, των μικρών διαστάσεων και της πολύ πυκνής δέσμης.

Καθώς η δέσμη διασπάται περαιτέρω προς τα κατόντη της άκρης του ακροφυσίου, ο τυπικός ψεκασμός περιλαμβάνει: α) τη διαδικασία πρωτογενούς διάσπασης δέσμης καυσίμου και β) τη διαδικασία δευτερογενούς διάσπαση δέσμης καυσίμου. Οι κύριες δυνάμεις που επενεργούν στη διαδικασία ψεκασμού καυσίμου είναι: 1) υδροδυναμική δύναμη ή δύναμη αδράνειας εξαιτίας διακυμάνσεων/διαταραχών, 2) αεροδυναμική δύναμη εξαιτίας της αντίστασης υγρού/διατμητικής δύναμης και 3) δύναμη ιξώδους εξαιτίας της αντίστασης στην αλλαγή γεωμετρίας του υγρού και 4) δυνάμεις επιφανειακής τάσης εξαιτίας ενός ελάχιστου ποσού ενέργειας επιφάνειας. Οι πρώτες δύο αποτελούν δυνάμεις διάσπασης, ενώ οι δυο δεύτερες δυνάμεις συνοχής. Οι μηχανισμοί που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση εσωτερικών δυνάμεων όπως α) ο στροβιλισμός, β) η αδράνεια και γ) η μεταφορά ορμής μεταξύ των εγκάρσιων επιπέδων μιας δέσμης ευθύνονται κατά κύριο λόγο για την πρωτογενή διάσπαση δέσμης καυσίμου. Στο στάδιο αυτό οι δυνάμεις διάσπασης υπερβαίνουν τις δυνάμεις συνοχής με αποτέλεσμα τη δημιουργία ταλαντώσεων στην επιφάνεια του υγρού, οι οποίες ακολούθως διασπούν τον υγρό όγκο σε σταγόνες. Η δευτερογενής διάσπαση δέσμης καυσίμου παρατηρείται όταν μεγαλύτερα σταγονίδια ή ποσότητες υγρού διασπαστούν σε μικρότερα σταγονίδια. Η διάσπαση ενός μόνο σταγονιδίου σε ένα αέριο προκαλείται είτε από μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα είτε από στροβιλισμό. Η δευτερογενής διάσπαση δέσμης καυσίμου προκύπτει εξαιτίας αναλογιών δύο δυνάμεων (two-force ratios) που επενεργούν στη σταγόνα. Αν τα αεροδυναμικά φορτία ξεπεράσουν τις δυνάμεις λόγω της επιφανειακής τάσης, το σταγονίδιο θα υποστεί επιπλέον παραμόρφωση.

Εκτεταμένες πειραματικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στα φαινόμενα διάσπασης δεσμών χαμηλής ταχύτητας. Η εικόνα δείχνει πιο λεπτομερικά το μήκος διάσπασης, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής (ψεκασμού καυσίμου) δέσμης και περιγράφει το συνεχές τμήμα της υγρής στήλης ή του αδιάσπαστου μήκους ως συνάρτηση της ταχύτητας δέσμης.



Εικόνα 6: Μηχανισμοί διάσπασης – Σχέση μήκους διάσπασης και ταχύτητας δέσμης



Κατά την κίνηση των σταγονιδίων και ως επακόλουθο στη διαδικασία ψεκασμού καυσίμου, ο αριθμός Stokes (St) αποτελεί άλλη μια σημαντική παράμετρο. Ο St ορίζεται ως η αναλογία του χρόνου απόκρισης ορμής του σταγονιδίου προς το χρόνο απόκρισης

$$\text{ενός συστήματος ροής: } St = St = \frac{\tau_p}{\tau_c} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot u_c}{18 \cdot \mu_c \cdot L} \quad (1.5.6)$$

Στα σωματίδια (φυσάλιδες/σταγονίδια) που αιωρούνται στο υγρό παρατηρούνται οι εξής δύο καταστάσεις: α) αν ο  $St \ll 1$ , τα σωματίδια έχουν επαρκή χρόνο να ανταποκριθούν στις αλλαγές ταχύτητας της ροής, β) αν ο  $St \gg 1$ , το σωματίδιο δεν έχει χρόνο να ανταποκριθεί στις αλλαγές ταχύτητας του υγρού και η ταχύτητά του επηρεάζεται ελάχιστα από την αλλαγή ταχύτητας του υγρού.

Δέσμη, η οποία αποτελείται από διασκορπισμένα σταγονίδια με μεγαλύτερους ρυθμούς διάδοσης/διάχυσης/εξάπλωσης μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη θερμότητα και μεταφορά μάζας. Επιπλέον, καθώς τα μεγέθη των σταγονιδίων μειώνονται, η ενέργειά τους μεταφέρεται πιο εύκολα στο περιβάλλον υγρό, κάτι το οποίο θα είχε σίγουρα ως αποτέλεσμα την κατάλληλη ανάμιξη/ενσωμάτωση με τα περιβάλλοντα υγρά. Εκτός αυτού, σε διαδικασίες κατά τις οποίες η τροφοδότηση είναι ανάγκη να εισαχθεί σε εγκάρσια ροή υγρού, τα σταγονίδια στη δέσμη πρέπει να έχουν αρκετή ορμή για να διαπεράσουν την εν λόγω εγκάρσια ροή υγρού. Τέτοιου είδους χαρακτηριστικά της δέσμης είναι επιθυμητά σε ένα ακροφύσιο τροφοδοσίας.

Η διάσπαση σταγονιδίων σε μια δέσμη οφείλεται σε αεροδυναμικά φορτία (τριβή και πίεση), τα οποία προκαλούνται από τη σχετική ταχύτητα  $u_{rel}$  μεταξύ σταγονιδίου και περιβάλλοντος αέρα. Τα αεροδυναμικά αυτά φορτία καταλήγουν σε ασταθή ανάπτυξη κυμάτων στον περιβάλλοντα αέρα / υγρή διεπιφάνεια ή στο ίδιο το σταγονίδιο εξολοκλήρου, η οποία τελικά οδηγεί στη διάσπαση και το σχηματισμό μικρότερων σωματιδίων. Τα σταγονίδια αυτά υποβάλλονται εκ νέου σε διάσπαση λόγω αεροδυναμικών φορτίων. Από την άλλη πλευρά, η δύναμη επιφανειακής τάσης προσπαθεί να διατηρήσει το σταγονίδιο σφαιρικό και αντιδρά στη δύναμη παραμόρφωσης. Η επιφανειακή τάση εξαρτάται από την καμπυλότητα της επιφάνειας: όσο πιο μικρό το σταγονίδιο τόσο υψηλότερη είναι η δύναμη επιφανειακής τάσης και τόσο υψηλότερη η κρίσιμη σχετική ταχύτητα που οδηγεί σε ασταθή παραμόρφωση και διάσπαση του σταγονιδίου.

Ο αριθμός Eötvös (Eo) μετρά τη σημασία των δυνάμεων επιφανειακής τάσης σε σύγκριση με τις ολικές δυνάμεις (body forces). Μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της δύναμης πλευστότητας δια της δύναμης επιφανειακής τάσης, αλλιώς αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός Eötvös σχετίζεται με την ολοκλήρωση ή διάσπαση των σταγονιδίων. Βρέθηκε ότι για τιμές  $Eo < 16$  είναι αδύνατον να υπάρξει περαιτέρω διάσπαση. Ο αριθμός Eötvös ορίζεται ως:

$$Eo = \frac{\Delta \rho g L^2}{\sigma} \quad (1.5.7)$$

Όπου:

$\Delta \rho$  είναι η διαφορά πυκνότητας μεταξύ δύο φάσεων ( $\text{kg/m}^3$ ),

$g$  είναι η βαρυτική επιτάχυνση ( $\text{m/s}^2$ ),

$L$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος, συνήθως η διάμετρος σταγονιδίου (m),

$\sigma$  είναι η επιφανειακή τάση (N/m).

Ένας υψηλός Eo δείχνει ότι το σύστημα είναι σχετικά ανεπηρέαστο από την επιφανειακή τάση, ενώ ένας χαμηλός αριθμός (τυπικά  $Eo < 1$  αποτελεί προϋπόθεση) δείχνει ότι η επιφανειακή τάση επικρατεί. Οι ενδιάμεσες ενδείξεις είναι δηλωτικές ισορροπίας μεταξύ τους.



Τρεις είναι οι παράγοντες που διέπουν τη διάσπαση της σταγόνας. Η δυναμική πίεση, η επιφανειακή τάση και το ιξώδες. Για υγρά με μικρό ιξώδες η αλλαγή του σχήματος της σταγόνας καθορίζεται από το κλάσμα των αεροδυναμικών δυνάμεων που παριστάνεται με  $0.5 \rho_A \cdot u_R^2$ . Προς τις δυνάμεις τάσης  $\sigma/D$  όσο μεγαλύτερος ο αριθμός Weber τόσο οι παραμορφωτικές εξωτερικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης που τείνουν να επαναφέρουν το σχήμα. Για κάθε υγρό η αρχική συνθήκη για διάσπαση εμφανίζεται όταν η αεροδυναμική δύναμη γίνει ίση με την δύναμη επιφανειακής τάσης.

$$C_D \frac{\pi D^2}{4} 0.5 \cdot \rho_A \cdot U_R^2 = \pi D \sigma \quad (1.5.8)$$

ή

$$\left( \frac{\rho_A U_R^2 D}{\sigma} \right)_{crit} = \frac{8}{C_D} \quad (1.5.9)$$

όπου ο δείκτης  $crit$  δείχνει ότι έχουμε την κρίσιμη κατάσταση. Στο 1ο μέλος είναι ο αριθμός Weber οπότε ισχύει:

$$We_{crit} = \frac{8}{C_D} \quad (1.5.10)$$

Για μια σχετική ταχύτητα  $u_R$  το μέγιστο σταθερό μέγεθος σταγόνας λαμβάνεται από

$$\text{τη σχέση } D_{max} = \frac{8\sigma}{C_D \rho_A U_R^2} \quad (1.5.11)$$

$$\text{ενώ η κρίσιμη ταχύτητα προκύπτει } U_{R_{crit}} = \left( \frac{8\sigma}{C_D \rho_A D} \right)^{0.5} \quad (1.5.12)$$

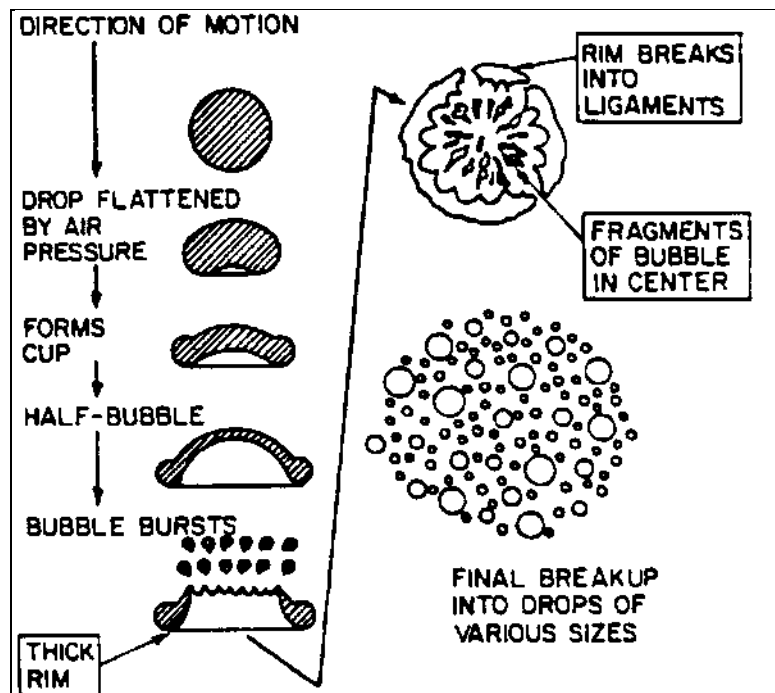
Για υγρά με επιφανειακή τάση μεταξύ 0.028 και 0.475 kg/s<sup>2</sup> η κρίσιμη ταχύτητα δίνεται ως

$$U_{R_{crit}} \propto \left( \frac{\sigma}{D} \right)^{0.5} \quad (1.5.13)$$

$$\text{Ειδικότερα για το νερό προκύπτει } U_{R_{crit}} = \frac{784}{\sqrt{D}} \quad (1.5.14)$$

όπου  $u_R$  σε m/s και  $D$  σε  $\mu\text{m}$ .

Μια σταγόνα που ξαφνικά εκτίθεται σε ένα γρήγορο ρεύμα αέρα αλλάζει σχήμα και παρουσιάζει μια κυρτή επιφάνεια στο ρεύμα αέρα. Οι άκρες του κυπελλοειδούς οδηγούνται προς τα έξω σαν λεπτό φύλλο και ακολούθως σε πολύ λεπτά στοιχεία που σπάνε σε σταγονίδια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Εικόνα 7: Διάσπαση σφαιρικής σταγόνας λόγω αλληλεπίδρασης

Για σταγόνα που πέφτει ελεύθερα υπολογίστηκε  $We_{crit} = 22$  και για σταγόνα που εκτίθεται απότομα σε ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας  $We_{crit} = 13$ . Για να λάβει υπ' όψη το

ιξώδες ο Hinze χρησιμοποίησε τον τύπο

$$Z = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (1.5.15)$$

Αυτό το αδιάστατο μέγεθος παριστά το κλάσμα μιας εσωτερικής δύναμης ιξώδους προς μία δύναμη επιφανειακής τάσης (interfacial). Η δύναμη επιφανειακής τάσης ανά μονάδα

επιφάνειας παριστάνεται σαν  $\frac{\sigma}{D}$  ενώ η δύναμη τριβής ανά μονάδα επιφάνειας τ δίνεται

από το γινόμενο του ιξώδους επί την βαθμίδα ταχύτητας  $\frac{\delta u}{\delta x}$  μέσα στην σταγόνα  $\mu_i \frac{\delta u}{\delta x}$ .

## 1.6 Διάσπαση Υγρών Jet (Disintegration of Liquid Jets)

Όταν ένα jet αναδύεται από το ακροφύσιο σαν ένα συνεχόμενο σώμα κυλινδρικής μορφής η κατάσταση ανταγωνισμού μεταξύ διασπαστικών και συνεκτικών δυνάμεων οδηγούν σε ταλαντώσεις και αναταραχές. Σε ευνοϊκές συνθήκες οι ταλαντώσεις ενισχύονται και το υγρό σώμα διασπάται σε σταγόνες. Αυτή η διαδικασία πολλές φορές αναφέρεται σαν πρωτεύουσα διάσπαση (primary atomization). Αν οι σχηματισμένες σταγόνες υπερβαίνουν την κρίσιμη διάσταση τότε διασπώνται σε ακόμα μικρότερα σταγονίδια και ο μηχανισμός αυτός λέγεται δευτερεύουσα διάσπαση (secondary atomization).

Το φαινόμενο της διάσπασης ενός πίδακα έχει γίνει αντικείμενο θεωρητικής αλλά και πρακτικής έρευνας εδώ και πολλά χρόνια. Τα παρακάτω αναφέρονται σε υγρά jet που διασκορπίζονται μέσα σε αέρα. Μπορούν να επεκταθούν σε κάθε συνδυασμό υγρού (σε φάση διασποράς) και αερίου (συνεχής φάση), αλλά τα εμπιστευόμαστε κυρίως όταν το



περιβάλλον αέριο είναι αέρας. Οι περισσότερες ενδιαφέρουσες ιδιότητες είναι το συνεχές μήκος (continuous length), που δίνει ένα μέτρο του ρυθμού ανάπτυξης της κατανομής και η κατανομή των μεγεθών. Επίσης ενδιαφέρον είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διάσπαση. Οι πρώτες έρευνες για τέτοια φαινόμενα έγιναν από τους Bidone και Savart. Ο πρώτος ασχολήθηκε με τις γεωμετρικές μορφές που παράγονται από ακροφύσιο με μη κυκλική τομή ενώ ο δεύτερος έδωσε τα πρώτα ποσοτικά δεδομένα.

Τα αποτελέσματά του έδειξαν πως αν η διάμετρος του πίδακα κρατιόταν σταθερή το συνεχές μήκος του υγρού είναι ανάλογο με την ταχύτητά του. Επίσης παρατήρησε ότι για σταθερή ταχύτητα του jet το μήκος του είναι ανάλογο της διαμέτρου του. Ο Plateau σημείωσε ότι η κυλινδρική μορφή του υγρού είναι ασταθής αν το μήκος του υπερτερεί της περιμέτρου του. Αλλιώς θα δημιουργηθούν δύο σταγόνες που το άθροισμα των επιφανειών τους θα είναι μικρότερο από εκείνο της κυλινδρικής μορφής. Οι διατυπώσεις που βοήθησαν να κατανοηθούν τα δεδομένα της έρευνας του Savart και ακόμα τέθηκαν σαν βάση για την θεωρία για τη σταθερότητα του jet του Rayleigh. Στις πρώτες του έρευνες ο Rayleigh χρησιμοποίησε τη μέθοδο μικρών διαταραχών για να ορίσει τις αναγκαίες συνθήκες για την κατάρρευση ενός υγρού πίδακα που εισάγεται σε αέριο μικρής ταχύτητας. Ο Rayleigh συγκρίνει την επιφανειακή ενέργεια (που ορίζεται το γινόμενο της επιφανειακής τάσης επί την επιφάνεια) της διαταραγμένης διαμόρφωσης με αυτήν της σταθερής κολώνας υγρού. Μετά υπολόγισε τη δυναμική ενέργεια της διαταραγμένης φάσης

$$E_s = \frac{\pi\sigma}{2d} [\gamma^2 + n^2 - 1] b_n^2 \quad (1.6.1)$$

όπου  $E_s$ : πιθανή ενέργεια επιφάνειας,  $d$  η διάμετρος της δέσμης,  $b_n$  ο σταθερός όρος της σειράς Fourier,  $\gamma = \frac{2\pi r}{\lambda}$  κυματριθμός (αδιάστατη ποσότητα),  $n$ : οποιοσδήποτε θετικός ακέραιος (μαζί με το μηδέν).

Για μη συμμετρικές διαταραχές  $n \gg 1$  και η  $E_s$  είναι πάντα θετική, δείχνοντας ότι το σύστημα είναι πάντα σταθερό σε αυτή την κλίμακα διαταραχής. Όταν  $n=0$  και  $\gamma < 1$  που ισχύει για συμμετρικές διαταραχές η εξίσωση (2.18) δείχνει ότι  $E_s < 0$  δηλαδή ότι το σύστημα δεν είναι σταθερό σε αυτό το είδος της διαταραχής. Επομένως ένα jet υγρού που επηρεάζεται από επιφανειακές δυνάμεις θα γίνει ασταθές σε οποιαδήποτε αξονοσυμμετρική διαταραχή που το μήκος κύματος της είναι  $\lambda > \pi d$  δηλαδή  $\gamma < 1$ .

Το συμπέρασμα από τα λεγόμενα του Rayleigh για το σπάσιμο υγρών jet με στρωτή ροή είναι ότι οι διαταραχές σε ένα jet με μήκη κύματος μεγαλύτερο από την περιφέρειά τους θα μεγαλώσουν. Ακόμα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μια κλάση αερίων διαταραχών θα μεγαλώσει πιο γρήγορα και θα καθορίσει το σπάσιμο. Παρόλο που στην πραγματικότητα τα υγρά είναι παχύρρευστα, τυρβώδη και εκτίθενται σε διάφορες επιρροές από το περιβάλλον τα συμπεράσματα αυτά βρήκαν γενική αναγνώριση σαν πρώτες επιτυχημένες προσεγγίσεις.

Η εργασία του Rayleigh έδειξε ότι το σπάσιμο του jet είναι ένα δυναμικό πρόβλημα και άρα είναι σημαντικός και ο ρυθμός της διαδικασίας. Δεχόμενος ότι ο όρος  $b_n$  είναι ανάλογος στο  $\exp(qt)$  όπου  $q$  η εκθετική αύξηση της διαταραχής ότι ο εκθετικός ρυθμός ανάπτυξης της πιο γρήγορης διαταραχής

$$q_{\max} = 0.97 \left( \frac{\sigma}{\rho_L d^3} \right)^{0.5} \quad (1.6.2)$$

$$\text{και } \lambda_{\text{opt}} \text{ που αντιστοιχεί στο } q_{\max} \text{ είναι } \lambda_{\text{opt}} = 4.51d. \quad (1.6.3)$$





Μετά το σπάσιμο ο κύλινδρος μήκους  $4.51 d$  γίνεται μια σφαιρική σταγόνα έτσι ώστε

$$4.51d \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{6} D^3 \text{ και τότε } D = 1.89 d. \quad (1.6.4)$$

Έτσι από το μηχανισμό του Rayleigh φάνηκε ότι ο μέσος όρος της διαμέτρου είναι σχεδόν διπλάσιος του μη διαταραγμένου jet.

Στην Εικ.8α φαίνεται το σπάσιμο κατά την άποψη του Rayleigh και στο (b) φαίνεται η ίδια εξέλιξη βασισμένη σε πραγματικές φωτογραφίες. Οι σταγόνες στην πραγματικότητα συνενώνονται και έτσι προκύπτει ένας συνδυασμός μεγάλων σταγόνων και άλλων πολύ μικρότερων τους που χαρακτηριστικά μπορούμε να τις ονομάσουμε δορυφόρους τους.

Μια πιο γενική θεωρία για την διάσπαση ενός jet σε χαμηλές ταχύτητες αναπτύχθηκε από τον Weber, που επέκτεινε την ανάλυση του Rayleigh για να συμπεριλάβει παχύρρευστα υγρά. Αυτός υποστήριξε ότι οποιαδήποτε διαταραχή προξενεί διαδοχικές συμμετρικές ταλαντώσεις.

Αν το μήκος κύματος της αρχικής διαταραχής είναι μικρότερο από το  $\lambda_{\min}$ , η επιφανειακή τάση τείνει να εξαλείψει την διαταραχή, ενώ αν το  $\lambda > \lambda_{\min}$  η επιφανειακή τάση φροντίζει για την ανάπτυξη της διαταραχής, που οδηγεί τελικά στην διάσπαση. Υπάρχει πάντως ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος που είναι το πιο ικανοποιητικό για την διαμόρφωση σταγόνων:

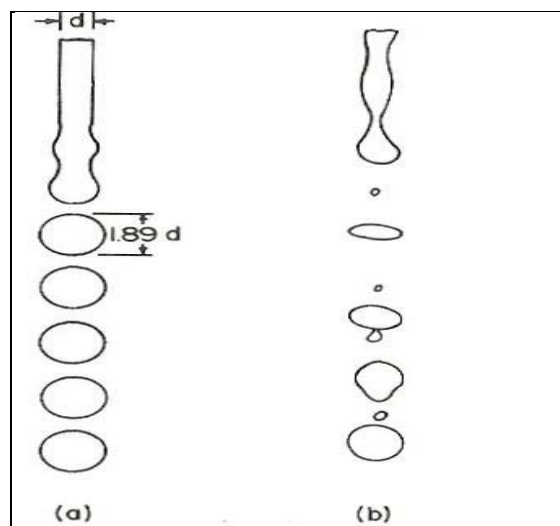
$$\lambda_{\min} = \pi d = 3.14 d \quad (1.6.5)$$

$$\lambda_{\text{opt}} = \sqrt{2\pi d} = 4.44 d \quad (1.6.6)$$

ενώ για παχύρρευστα υγρά:

$$\lambda_{\min} = \pi d \quad (1.6.7)$$

$$\lambda_{\text{opt}} = \sqrt{2\pi d} \left( 1 + \frac{3\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma d}} \right)^{0.5} \quad (1.6.8)$$



**Εικόνα 8: Σύγκριση α) ιδανικής διάσπασης πίδακα με β) πραγματική διάσπαση όπως φαίνεται από φωτογραφίες υψηλής ταχύτητας.**

Ο Weber μετά εξέτασε την επίδραση της αντίστασης του αέρα. Έτσι βρήκε ότι η διένεξη του αέρα μικραίνει μαζί με το μήκος κύματος της διαταραχής αλλά και το όπτιμο μήκος κύματος. Σε σύγκριση με τα προηγούμενα που ισχύουν για μηδενική ταχύτητα αέρα, αν ο αέρας έχει ταχύτητα 15m/s προκύπτει:



$$\lambda_{\min}=2.2d$$

(1.6.9)

$$\lambda_{\text{opt}}=2.8d$$

(1.6.10)

Επίσης ο Weber σκέφτηκε την περίπτωση όπου ο αέρας θα δημιουργούσε κύματα και έδειξε ότι αυτό θα μπορούσε να συμβεί όταν ο αέρας έχει μια σχετικά μεγάλη ταχύτητα. Για γλυκερίνη η ταχύτητα αυτή βρέθηκε 20m/s, και σ' αυτήν την περίπτωση η θεωρητική απόσταση της διάσπασης από το στόμιο του ακροφυσίου. Γενικότερα αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα μειώνεται η απόσταση της διάσπασης.

## 1.7 Επίδραση του Προφίλ των Ταχυτήτων

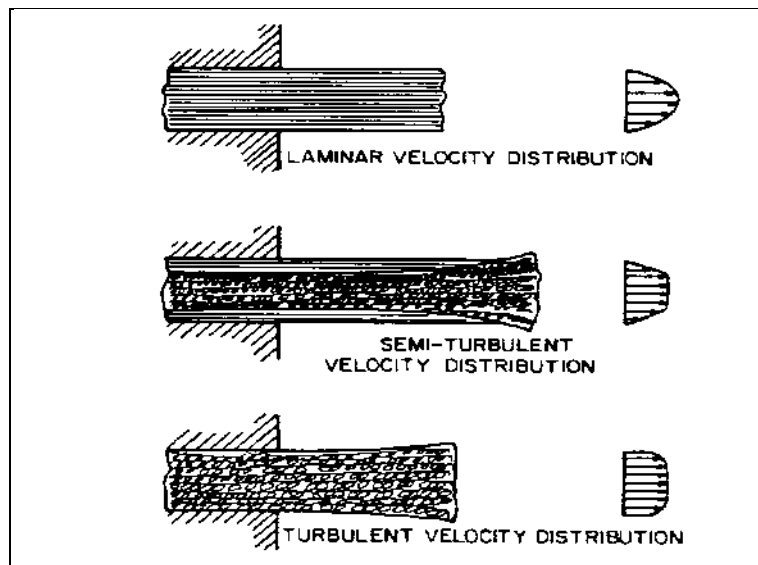
Είναι πιθανό ότι κάποιες ιδιομορφίες και ανωμαλίες που σχετίζονται με την σταθερότητα του jet ξεκινούν από τις διαφορές του προφίλ των ταχυτήτων και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά του, όπως αυτό εξέρχεται από το ακροφύσιο.

Ο Schweitzer έδωσε μια εξαιρετική ποσοτική περιγραφή της τύρβης. Ο πίδακας φεύγει από το jet είτε σε στρωτή είτε σε τυρβώδεις καταστάσεις. Όταν τα κομμάτια του υγρού πέφτουν με την μορφή ρεύματος παράλληλα στον άξονα του αγωγού η ροή είναι στρωτή. Όταν οι σταγόνες διαγράφουν τροχιές η κάθε μία με τυχαίο τρόπο, αυτό σημαίνει ότι έχουν διάφορες εγκάρσιες συνιστώσες της ταχύτητας και η ροή είναι τυρβώδης. Η στρωτή ροή ενισχύεται από την απουσία διαταραχών, από μια κυκλική είσοδο στο ακροφύσιο και από υψηλό ιξώδες του υγρού, ενώ η τυρβώδης ενισχύεται από υψηλές ταχύτητες ροής, μεγάλη διάμετρο αγωγού, από προεξοχές στη ροή, και από την ταχύτητα της επιφάνειας.

Σε ένα λείο αγωγό χωρίς διαταραχές στην ροή, μια αρχικά στρωτή ροή μπορεί να παραμένει στρωτή παρόλο που ο Reynolds ξεπέρασε την κρίσιμη τιμή, αλλά όταν συμβαίνει αυτό μια μικρή διαταραχή είναι ικανή να κάνει τη ροή τυρβώδη. Όπως σημείωσε ο Schweitzer υπάρχει μια γενική τάση για συσχέτιση της τυρβώδους ροής με τιμές του Reynolds μεγαλύτερες από την κρίσιμη, αν και στην πραγματικότητα η ροή είναι μερικές φορές στρωτή με τιμές του Re μεγαλύτερες της κρίσιμης και μπορεί να είναι τυρβώδεις ή ημι-τυρβώδεις (semi-turbulent) με τιμές του Re μικρότερες της κρίσιμης. Μια ημι-τυρβώδης ροής είναι ένας συνδυασμός ενός τυρβώδους πυρήνα και ένα στρωτό μέρος στα άκρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds μπορεί να καθοριστεί σαν η τιμή κάτω από την οποία οι διαταραχές σε μια ροή μέσα σε ένα μακρύ κυλινδρικό αγωγό θα εξαλειφτούν. Πάνω από αυτή την τιμή οι διαταραχές στην ροή ποτέ δεν εξαλείφονται όσο μάκρος και αν είναι ο αγωγός. Έτσι η τιμή του για αγωγούς βρέθηκε από τον Schiller να είναι γύρω στο 2320. Σε προσπάθειες να οριστικοποιήσουμε το προφίλ της ταχύτητας σε ένα εξερχόμενο jet πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν μακρικούς σωλήνες σαν ακροφύσια για να βεβαιώσουν ότι το jet αρχικά έχει ένα πλήρως ανεπτυγμένο στρωτό ή τυρβώδες προφίλ.

Τα ακροφύσια είναι συνήθως μικρούς μεγέθους, με μικρά ανοίγματα για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πίεσης. Η τυρβώδης κατάσταση της ροής στην έξοδο του ακροφυσίου δημιουργείται από την κατάσταση της ροής αντίθετα προς το ρεύμα του ανοίγματος και από διαταραχές που παράγονται καθώς το ρεύμα ακουμπά σε προεξοχές και μέσα στο άνοιγμα. Για ένα δοσμένο ακροφύσιο όλοι αυτοί οι συντελεστές είναι σταθεροί και η φύση της ροής, στρωτής, τυρβώδης ή ημιτυρβώδης είναι καθορισμένοι από τον αριθμό Reynolds.



**Εικόνα 9** Διάφορες κατανομές ταχυτήτων σε πίδακες όπως αναφέρονται

Η επίδραση του προφίλ των ταχυτήτων στο jet είναι μεγάλη. Με στρωτή ροή η κατανομή των ταχυτήτων αμέσως μετά το άνοιγμα σχηματίζει μια παραβολική καμπύλη που ξεκινά από το 0 στα τοιχώματα και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή στο κέντρο του αγωγού. Αν η έγχυση του jet γίνεται σε ακίνητο ή αργά πολύ κινούμενο αέρα δεν υπάρχει υπολογίσιμη διαφορά ανάμεσα στο πιο εξωτερικό μέρος του jet και του αέρα.

Συμπερασματικά, οι απαραίτητες συνθήκες για να γίνει διάσπαση (atomization) από δυνάμεις τριβής του αέρα δεν υπάρχουν. Πάντως μετά από κάποια απόσταση η συνδυασμένη επίδραση δυνάμεων τριβής του αέρα και επιφανειακών τάσεων δημιουργούν επιφανειακές ανομοιομορφίες που τελικά οδηγούν σε διάσπαση.

Αν η ροή στο άνοιγμα είναι πλήρης τυρβώδης η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας οδηγεί στη διάλυση του επιφανειακού φιλμ και ακολουθεί αργότερα διάσπαση. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν το εγχυόμενο jet είναι πλήρως τυρβώδες δεν χρειάζονται αεροδυναμικές δυνάμεις για διάσπαση (breakup). Ακόμα και αν το τοποθετήσουμε σε ένα χώρο θα διασπαστεί αργά κάτω από την επίδραση της ίδιας του της τύρβης.

Αν το jet είναι ημι-τυρβώδες το κυκλικό μέρος της στρωτής ροής που περιβάλλει τον τυρβώδη πυρήνα τείνει να αποτρέψει τα υγρά σωματίδια στον πυρήνα να φτάσουν και να διαλύσουν την επιφάνεια του jet. Την ίδια ώρα η επιρροή της τύρβης με τον αέρα είναι μηδενική λόγω της μικρής σχετικής ταχύτητας ανάμεσα στην επιφάνεια του jet και του αέρα. Έτσι η διάσπαση του jet δεν παρουσιάζεται κοντά στην έξοδο του ανοίγματος. Πάντως αργότερα ο πιο γρήγορος πυρήνας κομματιάζει το προστατευτικό στρωτό στρώμα και μετά διασπάται. Εναλλακτικά, συμβαίνει μια ανακατανομή της ενέργειας ανάμεσα στην στρωτή ή τυρβώδη συνιστώσα της ροής που προκαλεί ένα επίπεδο προφίλ ταχυτήτων. Αυτή η διαδικασία μεταφέρει στην επιφάνεια του jet υγρά σωματίδια με ακτινικές συνιστώσες της ταχύτητας. Αυτά τα σωματίδια διασπών την επιφάνεια του jet και οδηγούν στην γενικότερη διάσπαση.

Είναι γνωστό ότι η κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ενός αερίου ή υγρού που ρέει εξαρτάται πολύ από το προφίλ των ταχυτήτων. Για παράδειγμα σε ροή σε σωλήνα με στρωτή ροή (παραβολικό προφίλ) η κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας είναι ακριβώς διπλάσια από ότι θα ήταν σε μια ροή με επίπεδο προφίλ με το μέσο όρο ταχυτήτων.



Σύμφωνα με τους McCarthy και Molloy μπορεί να οριστεί μια ποσότητα  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \int_0^A U_r^3 dA / U^3 A \quad (1.7.1)$$

όπου  $U_r$  είναι η τυπική ταχύτητα του ρευστού και  $U$  η μέση για μια επιφάνεια  $A$ . για τις 3 διαφορετικές καταστάσεις έχουμε:

- Για επίπεδο προφίλ:  $\varepsilon=1$
- Για πλήρως ανεπτυγμένο τυρβώδες:  $\varepsilon=1.1$  με  $1.2$
- Για πλήρως ανεπτυγμένο στρωτό:  $\varepsilon=2$

Έτσι για ροή σε σωλήνα η ποσότητα  $\varepsilon$  παριστάνει τον λόγο της κινητικής ενέργειας προς την ισοδύναμη κινητική ενέργεια σε ροή με επίπεδο προφίλ (plugflow).

Όταν ένα πλήρως ανεπτυγμένο στρωτό jet αναδύεται από ένα ακροφύσιο το παραβολικό του προφίλ μετατρέπεται σε ένα επίπεδο προφίλ με ίδιο μέσο όρο ταχυτήτων. Αυτή η διαδικασία συνοδεύεται από μια μεταβολή του  $\varepsilon$  από 2 σε 1 που εμπλέκει μια υπολογίσιμη ανακατανομή ενέργειας μέσα στο jet, και που οδηγεί στην δημιουργία δυνάμεων που μπορεί να εμφανιστούν βίαια και να οδηγήσουν στο «εκρηκτικό» σπάσιμο του jet (burstingbreakup).

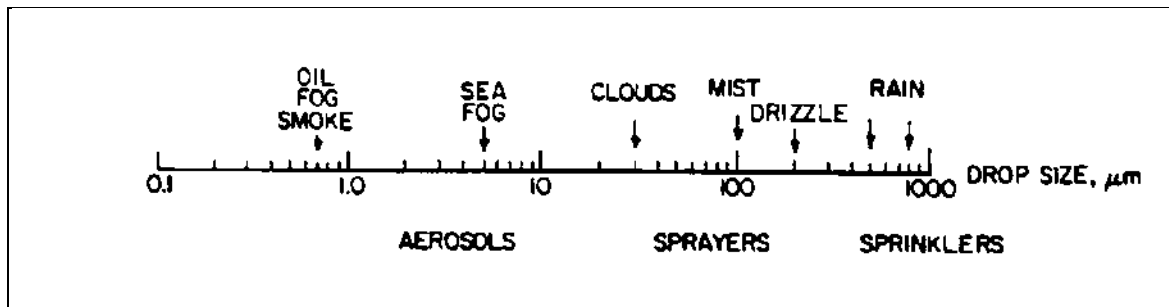
Για jet υψηλών ταχυτήτων είναι γενικά αποδεκτό ότι η επίδραση του περιβάλλοντα αέρα ή αερίου είναι η βασική αιτία της διάσπασης αν και η τύρβη έχει μεγάλη συνεισφορά. Για να ξεκαθαριστεί η επίδραση αυτών των 2 στη διάσπαση ορίστηκαν δύο τύποι αυτής. Ο πρώτος (primary) είναι αυτός που προέρχεται από εσωτερικές δυνάμεις, όπως δυνάμεις λόγω τύρβης, δυνάμεις αδράνειας, επιφανειακής τάσης ή αυτές που προκαλούνται από την αλλαγή του profile. Ο δεύτερος πάντα εμπλέκει την επίδραση των αεροδυναμικών δυνάμεων μαζί με όλες τις προηγούμενες. Οι αεροδυναμικές δυνάμεις είναι εκείνες που διαλύουν τις σταγόνες σε ακόμα μικρότερα σταγονίδια.

## 1.8 Μεγέθη Σταγονιδίων

Ένα ψεκαστικό σύστημα γενικά μελετάται σαν ένα σύστημα σταγόνων που απορροφάται σε μια συνεχή αέρια φάση. Παράδειγμα από φυσικά τέτοια συστήματα είναι η βροχή, νέφος, ομίχλη, το ψιλόβροχο και το νέφος που αναπτύσσεται στους καταρράκτες.

Το σχήμα 2.4 δείχνει στην κλίμακα του μεγέθους των σταγόνων όπως αυτές εμφανίζονται σε διάφορα φυσικά φαινόμενα και επίσης όπως παράγονται από τα πιο κοινά ακροφύσια. Τα πιο κοινά ακροφύσια παράγουν σταγόνες με διαμέτρους από λίγα  $\mu\text{m}$  έως  $500\mu\text{m}$ . Λόγω της ετερογενούς φύσης της διαδικασίας παραγωγής drops οι ροϊκές γραμμές που δημιουργούνται από τους διάφορους μηχανισμούς ψεκασμού ποικίλουν σε διαμέτρους όπως και οι παραγόμενες σταγόνες.

Πρακτικά τα ακροφύσια δεν παράγουν νέφη, όπου οι σταγόνες περιγράφονται από ομοιόμορφη κατανομή σε κάθε κατάσταση λειτουργίας. Αντίθετα, το νέφος μπορεί να παρατηρηθεί σαν ένα φάσμα από διασπάσεις σταγόνων που κατανέμονται γύρω από μια αυθαίρετη καθορισμένη μέση τιμή. Μόνο κάτω από ειδικές καταστάσεις, μπορούμε να πάρουμε ένα καλό ομογενές ψεκασμό. Έτσι εκτός από τη μέση τιμή της διαμέτρου των σταγόνων ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό είναι η κατανομή που περιέχει.

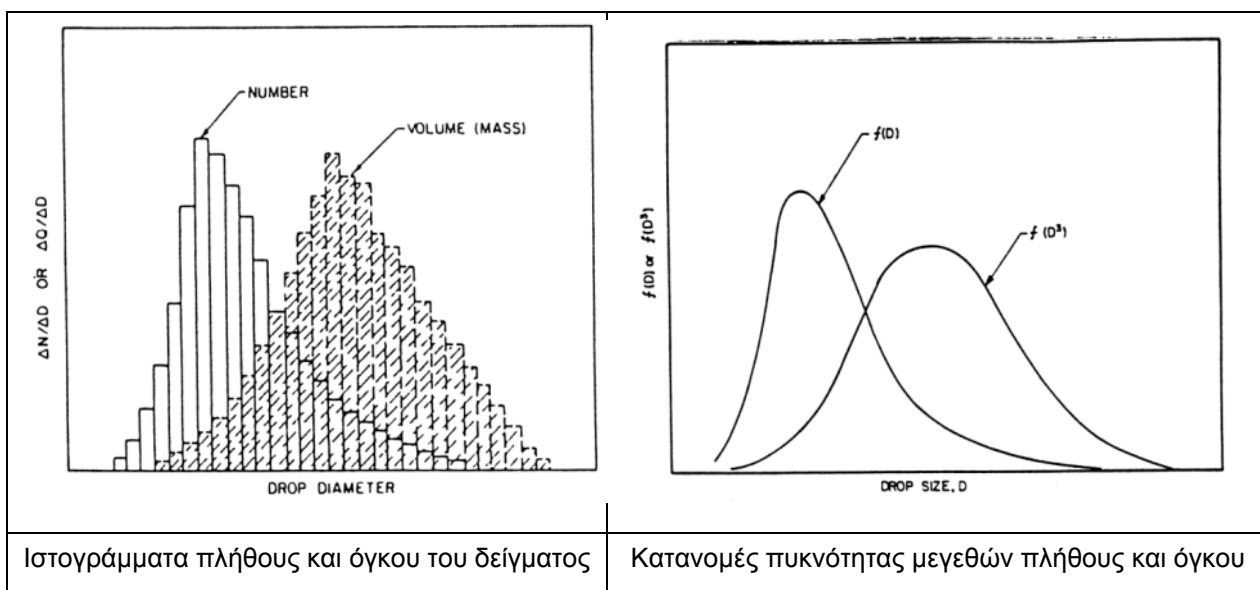


Εικόνα 10 Φάσμα μεγεθών σταγονιδίων

### 1.9 Γραφική Αναπαράσταση Μεγεθών

Μια διδακτική εικόνα από κατανομές μεγέθους σταγόνων μπορούμε να αποκτήσουμε δημιουργώντας ένα ιστόγραμμα όπου διατάσσονται οι αριθμοί των σταγόνων των οποίων οι διαστάσεις πέφτουν ανάμεσα στα όρια  $D - \frac{\Delta D}{2}$  και όρια  $D + \frac{\Delta D}{2}$ .

Αν αντί του αριθμού των σταγόνων, χρησιμοποιήσουμε μια κλίμακα μεγέθους μάζας ή όγκου σταγόνων ανάμεσα σε  $D + \frac{\Delta D}{2}$ ,  $D - \frac{\Delta D}{2}$ , όρια τότε το αποτέλεσμα είναι το ιστόγραμμα να μετατοπιστεί προς τα δεξιά λόγω του βάρους των μεγαλύτερων σταγόνων (Σχήμα 2.5). Μικραίνοντας το  $\Delta D$ , το ιστόγραμμα υποδεικνύει το σχήμα της καμπύλης συχνότητας (πυκνότητα πιθανότητας) που μπορεί να εκτιμηθεί σαν ένα χαρακτηριστικό του spray αρκεί να στηρίζεται σε ένα μεγάλο δείγμα (Σχήμα 2.6).



Οι συνηθισμένες τιμές μπορούν να δοθούν με εναλλακτικούς τρόπους:





- Σαν τον αριθμό σταγόνων που έχουν συγκεκριμένη διάμετρο
  - Το κλάσμα των σταγόνων με συγκεκριμένη διάμετρο προς όλες
  - Το κλάσμα των σταγόνων με συγκεκριμένο εύρος διαμέτρων προς το συνολικό
- Είναι γεγονός ότι διαγράμματα συχνότητας πιθανότητας μπορούν να κατασκευαστούν κατευθείαν από την κατανομή μεγέθους σταγόνας σχεδιάζοντας το:

$$\frac{\Delta N_i}{N \Delta D_i} = f(D) \text{ ή } \frac{\Delta Q_i}{Q \Delta D_i} = f(D)$$

όπου  $\Delta N$ : η αύξηση του αριθμού των σταγόνων στο διάστημα  $D_i, D_i + \Delta D_i$ .

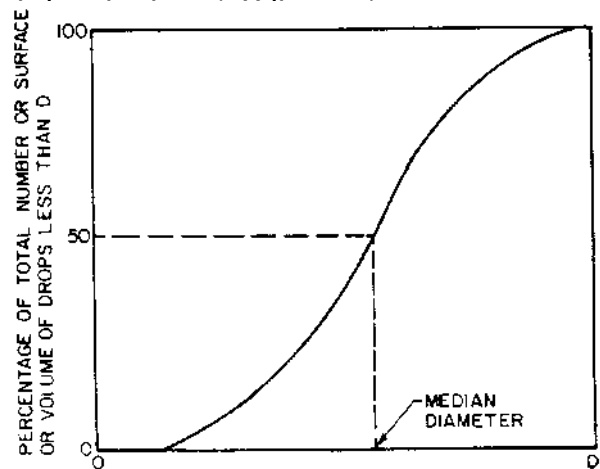
$\Delta Q$ : είναι η αύξηση του όγκου σε διάστημα  $D_i, D_i + \Delta D_i$ .

Το  $\Delta Q_i$  μπορεί να παρθεί από τον τύπο:

$$\Delta Q_i = \Delta N_i \left( \frac{\pi}{6} \right) \left[ 0.5(D_{i_1} + D_{i_2}) \right]^3 \quad (1.9.1)$$

όπου  $D_{i_1}, D_{i_2}$  το ανώτατο και κατώτερο όριο στο εύρος του  $\Delta D_i$ .

Επιπρόσθετα για να αναπαραστήσουμε την κατανομή μεγέθους σταγόνων με συχνότητα πιθανότητας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αθροιστική συνάρτηση. Αυτή είναι το ολοκλήρωμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας και δείχνει την αναλογία στο συνολικό αριθμό σταγόνων το ποσοστό εκείνων που έχουν κάτω από μία τιμή διαμέτρου ή την αναλογία της συνολικής επιφάνειας ή όγκου του spray που έχουν οι σταγόνες κάτω από μία τιμή διαμέτρου (Σχήμα 2.7).



Εικόνα 11:Τυπικό σχέδιο συσσωρευτικής καμπύλης κατανομής μεγεθών

### 1.10 Μαθηματικές Συναρτήσεις Κατανομών

Επειδή η γραφική παράσταση της κατανομής μεγέθους σωματιδίων είναι εργαστηριακή και δεν σχετίζεται εύκολα με πειραματικά αποτελέσματα πολλοί δοκίμασαν να την αντικαταστήσουν με μαθηματικές εκφράσεις με παραμέτρους που λαμβάνονται από ένα ορισμένο αριθμό μετρήσεων σταγόνων. Οι μαθηματικές εκφράσεις θα έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Παρέχουν ικανοποιητική προσέγγιση στα δεδομένα μεγέθους σταγόνας
- Παρέχουν την επέκταση σε τιμές μεγέθους σταγόνας έξω από την περιοχή μετρήσεων



- Επιτρέπουν τον εύκολο υπολογισμό των μέσων τιμών διαμέτρων και άλλων παραμέτρων ενδιαφέροντος
- Να συνδέσουν μεγάλο μέγεθος δεδομένων
- Ιδεατά, να συνδέονται με την κατανόηση βασικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα στο φαινόμενο της διάσπασης της ροής.

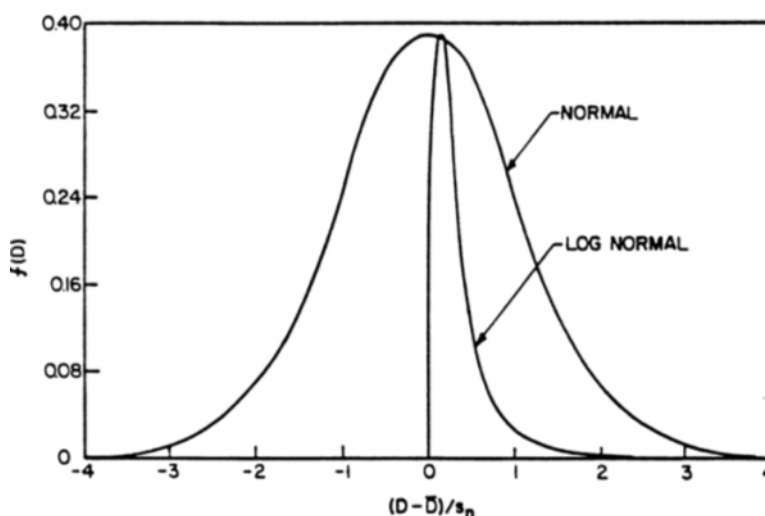
Λόγω της απουσίας βασικού μηχανισμού ή μοντέλου πάνω στο οποίο θα μπορούσαμε να χτίσουμε μία θεωρία για την κατανομή του μεγέθους των bubbles έχουν προταθεί διάφορες συναρτήσεις, βασισμένες είτε στις θεωρίες πιθανότητας είτε σε εντελώς εμπειρικούς συλλογισμούς που επιτρέπουν την μαθηματική αναπαράσταση των μετρημένων κατανομών μεγέθους σταγόνων. Μερικές τέτοιες συναρτήσεις είναι οι: κανονική, log-normal, Nukiyama-Tanasawa, Rosin-Rambler και άνω ορίου κατανομές. Λόγω του ότι οι βασικοί μηχανισμοί που σχετίζονται με τη διάσπαση σε σταγόνες δεν είναι τέλεια κατανοητοί και καμιά κατανομή δεν μπορεί να αναπαραστήσει όλα τα δεδομένα, είναι συνήθως αναγκαίο να δοκιμάσουμε διάφορες συναρτήσεις για να δούμε ποια ταιριάζει με τα εμπειρικά δεδομένα.

### 1.10.1 Κανονική Κατανομή (Normal Distribution)

Η συνάρτηση είναι βασισμένη στην τυχαία εμφάνιση μιας δοσμένης διαμέτρου. Είναι συγκριτικά εύκολη να χρησιμοποιηθεί αλλά η εφαρμογή της περιορίζεται σε διαδικασίες που είναι τυχαίες στη φύση και όπου δεν εμφανίζονται ιδιαίτερες προτιμήσεις. Συνήθως εκφράζεται σε όρους που δίνουν τον αριθμό σταγόνων με συγκεκριμένη διάμετρο.

$$\frac{dN}{dD} = f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_n} \exp\left[-\frac{1}{2s_n^2}(D - \bar{D})^2\right] \quad (1.10.1)$$

όπου  $S_n$  ένα μέτρο της απόκλισης των διαφόρων  $D$  από τη μέση  $\bar{D}$ . Το  $S_n$  αναφέρεται και ως τυπική απόκλιση (standard deviation) και το  $S_n^2$  είναι μία ποσότητα που συνήθως βρίσκεται σε πίνακες. Η κατανομή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Το εμβαδό κάτω από την καμπύλη από το  $-\infty$  έως το  $+\infty$  ισούται με 1 και οι περιοχές δεξιά και αριστερά του  $y$  άξονα είναι ίσες. Το ολοκλήρωμα της κανονικής καμπύλης είναι η αθροιστική κανονική καμπύλη  $F(D)$ .



Εικόνα 12:Κανονική και λογαριθμική - κανονική κατανομή.



$$\text{Αν ορίσουμε } t = \frac{D - \bar{D}}{s_n} \quad (1.10.2)$$

και θέσουμε  $\bar{D}=0$  και  $S_n=1$  τότε η  $F(D)$  περιγράφεται

$$F(D) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \int_{-\infty}^D \exp\left(-t^2/2\right) dt \quad (1.10.3)$$

και η τιμή της βρίσκεται σε πίνακες.

### 1.10.2 Λογαριθμική Κανονική Κατανομή (Log-Normal Distribution)

Έχει βρεθεί ότι πολλές κατανομές μεγέθους σταγόνων στη φύση ακολουθούν την κατανομή καμπύλης αν σαν παράμετρος χρησιμοποιηθεί αντί για την διάμετρο ο λογάριθμος. Έτσι

$$\frac{dN}{dD} = f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ds_g} \exp\left[-\frac{1}{2s_g^2}(\ln D - \ln \bar{D}_{ng})^2\right] \quad (1.10.4)$$

όπου  $D_{ng}$ : ο γεωμετρικός μέσος των σταγόνων

και  $S_g$ : η γεωμετρική τυπική απόκλιση

Οι συναρτήσεις αυτού του τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα για να περιγράψουν κατανομές επιφάνειας ή όγκου.

Κατανομή επιφάνειας

$$f(D^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ds_g} \exp\left[-\frac{1}{2s_g^2}(\ln D - \ln \bar{D}_{sg})^2\right] \quad (1.10.5)$$

Όγκου :

$$f(D^3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ds_g} \exp\left[-\frac{1}{2s_g^2}(\ln D - \ln \bar{D}_{vg})^2\right] \quad (1.10.6)$$

Οι σχέσεις μεταξύ  $D_{ng}$ ,  $D_{sg}$  και  $D_{vg}$  δίνονται παρακάτω:

$$\text{Επιφάνεια } \ln \bar{D}_{sg} = \ln \bar{D}_{ng} + 2s_g^2 \quad (1.10.7)$$

$$\text{Όγκος } \ln \bar{D}_{vg} = \ln \bar{D}_{ng} + 3s_g^2 \quad (1.10.8)$$

$$\text{SMD } \ln \bar{D}_{vsg} = \ln \bar{D}_{ng} + 2.5s_g^2 \quad (1.10.9)$$



## 1.11 Εμπειρικές Συναρτήσεις Κατανομών

Διάφορες εμπειρικές σχέσεις έχουν προταθεί για να χαρακτηρίσουν την κατανομή μεγέθους ενός spray. Κανείς όμως δεν μπορεί να πει ποια είναι η καλύτερη καθώς η επιλογή του ποια θα ταιριάζει στα δεδομένα εξαρτάται από τους μηχανισμούς διάσπασης που λαμβάνουν χώρα κάθε φορά. Παρακάτω δίνονται μερικές τέτοιες συναρτήσεις.

### 1.11.1 Nukiyama – Tanasawa

Μια σχετικά απλή εμπειρική συνάρτηση που περιγράφει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή είναι η παρακάτω:

$$\frac{dN}{dD} = \alpha D^p \exp-(bD)^q \quad (1.11.1)$$

Αυτή η έκφραση περιέχει 4 ανεξάρτητες σταθερές  $a$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $q$ .

Οι περισσότερες από τις πιο κοινά διαδεδομένες συναρτήσεις απλούστευσης ή τυποποίησης αυτής. Ένα παράδειγμα είναι η παρακάτω συνάρτηση με  $p=2$ :

$$\frac{dN}{dD} = \alpha D^2 \exp-(bD)^q \quad (1.11.2)$$

Διαιρώντας την εξίσωση με το  $Q^2$  και λογαριθμίζοντας τη σχέση παίρνουμε:

$$\ln\left(\frac{1}{D^2} \frac{dN}{dD}\right) = \ln \alpha - bD^q \quad (1.11.3)$$

Για οποιοδήποτε σετ δεδομένων η τιμή του  $q$  μπορεί να υποτεθεί και έτσι να πάρουμε ένα διάγραμμα  $\ln(D^{-2} dN/dD) = f(D^q)$ . Αν η υποτεθείσα τιμή του  $q$  είναι σωστή το διάγραμμα θα αποφέρει μια ευθεία γραμμή απ' όπου οι τιμές των  $a$ ,  $b$  θα μπορούν να καθοριστούν.

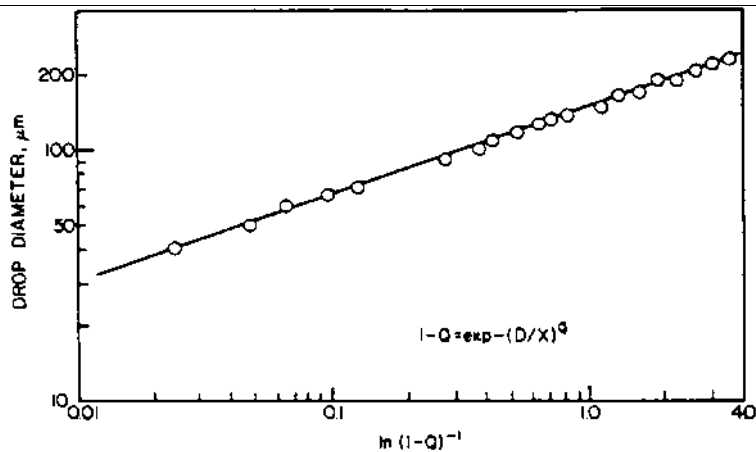
### 1.11.2 Rosin-Rambler

Σήμερα η πιο διαδεδομένη συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι αυτή που κανονικά αναπτύχθηκε για σκόνη από τους Rosin και Rambler. Μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$1 - Q = \exp-(D/X)^q \quad (1.11.4)$$

όπου  $Q$  το κλάσμα του συνολικού όγκου που περιέχει σωματίδια με διαμέτρους μικρότερες του  $D$  και  $X$ ,  $q$  σταθερές. Έτσι εκτιμώντας τα  $X$ ,  $q$  μπορούμε να επισημάνουμε τη σχέση και σε spray. Στην περίπτωση αυτή ο εκθέτης  $q$  ορίζει ένα μέτρο του εύρους του μεγέθους σταγόνων. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του  $q$  τόσο κανονικό είναι το spray. Αν το  $q$  είναι άπειρο σημαίνει ότι οι σταγόνες έχουν όλες την ίδια διάμετρο. Για τα περισσότερα spray η τιμή του  $q$  κυμαίνεται ανάμεσα στο 1.5 και το 4, ενώ για περιστρεφόμενους ψεκαστήρες το  $q$  μπορεί να πάρει σαν μέγιστη τιμή 7.

Παρόλο που υποθέτει ένα πολύ μεγάλο εύρος διαμέτρου η έκφραση των Rosin-Rambler έχει το προσόν της απλότητας. Επιπλέον, επιτρέπει στα δεδομένα να επεκταθούν σε σωστά εύροι όπου οι μετρήσεις είναι δύσκολες ή λιγότερο συγκεντρωμένες. Μια τυπική Rosin-Rambler φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Η τιμή του  $q$  είναι η κλίση της γραμμής ενώ το  $X$ , που αναπαριστά κάποια διάμετρο, δίνεται από την τιμή του  $D$  για την οποία  $1-Q=\exp[-1]$ . Η λύση αυτής της εξίσωσης δίνει  $Q=0.632$ . Έτσι το  $X$  παριστά την διάμετρο εκείνη έτσι ώστε το 63.2% του συνολικού όγκου έχει διαμέτρους μικρότερες από αυτήν.



Εικόνα 13:Τυπική γραφική παράσταση Rosin-Rambler.

### 1.11.3 Τροποποιημένη Rosin-Rambler

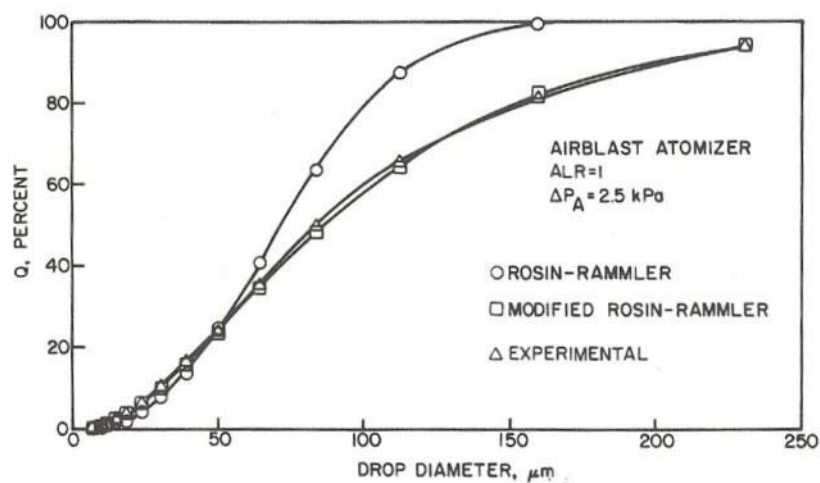
Για την ανάλυση ενός μεγάλου δείγματος που παράγεται από pressure-swirl ψεκαστικό οι Rizk&Lefebvre βρήκαν πως αν και η Rosin-Rambler δίνει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα για το εύρος των διαστάσεων, υπάρχουν περιπτώσεις όπου εμφανίζεται μια σημαντική απόκλιση από τα εμπειρικά δεδομένα, ειδικά σε σταγόνες μεγάλου μεγέθους. Ξαναγράφοντας την Rosin-Rambler στην μορφή :

$$1 - Q = \exp\left(-\left(\frac{\ln D}{\ln X}\right)^q\right) \quad (1.11.5)$$

η κατανομή του όγκου προκύπτει :

$$\frac{dQ}{dD} = q \frac{(\ln D)^{q-1}}{D(\ln X)^q} \exp\left(-\left(\frac{\ln D}{\ln X}\right)^q\right) \quad (1.11.6)$$

όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Παρόλα αυτά πρέπει να γίνουν συγκριτικά πολλές εκτιμήσεις πριν χρησιμοποιηθεί η τροποποιημένη Rosin-Rambler.



Εικόνα 14:Σύγκριση κατανομής Rosin-Rambler και τροποποιημένης.





### 1.11.4 Συνάρτηση Ανώτατου Ορίου

Οι Mugele & Evans ανέλυσαν τις διάφορες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των κατανομών σταγονιδίων, υπολογίζοντας μέσες τιμές διαμέτρων από τα εμπειρικά δεδομένα και συγκρίνοντας με αυτές που προκύπτουν από τις παραπάνω κατανομές. Οι σταθερές που χρησιμοποιούνται σ' αυτές τις συναρτήσεις υπολογίστηκαν από τις εμπειρικές κατανομές. Σαν αποτέλεσμα της ανάλυσής τους οι Mugele-Evans πρότειναν σαν καλύτερο τρόπο αναπαράστασης κατανομών μεγέθους σταγόνων τις επονομαζόμενες συναρτήσεις ανώτατου ορίου. Αυτές είναι μια τροποποίηση της λογαριθμικής κατανομής κανονικής.

Η κατανομή του όγκου δίνεται:

$$\frac{dQ}{dy} = \delta \exp \frac{-\delta^2 y^2}{\sqrt{\pi}} \quad (1.11.7)$$

όπου

$$y = \ln \frac{\alpha D}{D_m - D} \quad (1.11.8)$$

όπου το  $y$  κινείται από το  $-\infty$  στο  $+\infty$ , το  $D$  κινείται από το  $D_0$  που είναι η ελάχιστη στο  $D_m$  που είναι η μέγιστη, ενώ το  $\delta$  σχετίζεται με την τυπική απόκλιση του  $y$  και του  $D$  δηλαδή το  $\alpha$  είναι μια αδιάστατη σταθερά.

Ορίζεται μια χαρακτηριστική μέση διάμετρος που ονομάζεται Sauter mean diameter

$$SMD = \frac{D_m}{1 + \alpha \exp(1/4\delta^2)} \quad (1.11.9)$$

απ' όπου συνεπάγεται ότι μείωση του  $\delta$  σημαίνει μια πιο κανονική κατανομή. Η συνάρτηση κατανομής ανώτερου ορίου υποθέτει ένα πραγματικό spray, με καθορισμένα ελάχιστα και μέγιστα μεγέθη. Όμως τελικά η τιμή της  $D_m$  πρέπει να υποτεθεί και συνήθως χρειάζονται πολλές δοκιμές για να βρεθεί η σωστή τιμή της.

Συνοψίζοντας για τις κατανομές μπορούμε να πούμε ότι όσο δεν υπάρχει ακριβής γνώση των μηχανισμών διάσπασης δεν ξέρουμε πια είναι η καταλληλότερη συνάρτηση για την αναπαράσταση της κατανομής του μεγέθους των σταγόνων. Συνήθως τα κριτήρια που επιλέγονται είναι:

- η μαθηματική απλότητα,
- η ευκολία στους υπολογισμούς, και
- η συμφωνία με τα φυσικά φαινόμενα που εμπλέκονται.

### 1.12 Χαρακτηριστικές Μέσες Διάμετροι

Σε πολλούς υπολογισμούς μεταφοράς μάζας και σε ροές προτιμάται να δουλεύουμε με μέσες διαμέτρους αντί για την συνολική κατανομή διαμέτρων. Η παραδοχή των μέσων διαμέτρων γενικεύτηκε από τους Mugele&Evans και έτσι μερικές από αυτές ορίζονται παρακάτω. Μια από τις πιο διαδεδομένες είναι η:

$$D_{10} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D(dN/dD)dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN/dD)dD} \quad (1.12.1)$$

ενώ άλλες μέσες διαμέτρους του ενδιαφέροντός μας είναι:



$$\text{Surface mean: } D_{20} = \left[ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^2 (dN / dD)}{\int_{D_0}^{D_m} (dN / dD) dD} \right]^{1/2} \quad (1.12.2)$$

$$\text{Volume mean: } D_{30} = \left[ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 (dN / dD)}{\int_{D_0}^{D_m} (dN / dD) dD} \right]^{1/3} \quad (1.12.3)$$

Γενικά έχουμε:

$$(D_{ab})^{a-b} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^a (dN / dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^b (dN / dD) dD} \quad (1.12.4)$$

Η εξίσωση μπορεί επίσης να γραφτεί:

$$D_{ab} = \left[ \frac{\sum N_i D_i^a}{\sum N_i D_i^b} \right]^{1/(a-b)} \quad (1.12.5)$$

όπου:  $i$  δείχνει την κλίμακα του μεγέθους που χρησιμοποιούμε

$N_i$  ο αριθμός σταγόνων με  $i$  μέγεθος

$D_i$  η διάμετρος του  $i$  διαστήματος, και

$a, b$  σταθερές που υπάρχουν σε πίνακες

Έτσι:

- $D_{10}$  διάμετρος είναι ο γραμμικός μέσος όρος όλων των σταγόνων του spray
- $D_{30}$ , είναι η διάμετρος μιας σταγόνας της οποίας ο όγκος αν πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των σταγόνων δίνεται συνολικό όγκο του μίγματος και
- $D_{32}$  είναι η διάμετρος μιας σταγόνας που ο λόγος του όγκου προς την επιφάνεια είναι ίσος με αυτόν όλου του spray.

### 1.12.1 Αντιπροσωπευτικές Διámetros

Σε πολλές περιπτώσεις η κατανομή μεγεθών σταγόνων μπορεί να χαρακτηριστεί συνοπτικά σαν συνάρτηση με 2 παραμέτρους εκ των οποίων μία είναι η αντιπροσωπευτική διάμετρος και η άλλη ένα μέτρο του εύρους του μεγέθους των σταγόνων. Σε μερικές περιπτώσεις θεωρείται πλεονέκτημα να εισάγουμε έναν ακόμα όρο, όπως για π.χ. μία παράμετρος που είναι το ελάχιστο μέγεθος σταγόνας, αλλά βασικά χρησιμοποιούνται τουλάχιστον 2 παράμετροι για να περιγράψουν την κατανομή του μεγέθους σταγόνων από αυτήν. Υπάρχουν πολλές επιλογές αντιπροσωπευτικής διαμέτρου, που κάθε μία μπορεί να παίξει ρόλο στον ορισμό της συνάρτησης κατανομής. Έτσι υπάρχουν:

Έτσι υπάρχουν:

$D_{0.1}$  = διάμετρος σταγόνας τέτοια ώστε 10% του συνολικού όγκου είναι σε σταγόνες μικρότερης διαμέτρου από αυτήν.

$D_{0.5}$  = διάμετρος σταγόνας τέτοια ώστε 50% του συνολικού είναι σε σταγόνες μικρότερης διαμέτρου. Αυτή είναι η mass median diameter MMD δηλαδή ο δειγματικός μέσος.

$D_{0.632}$  = όμοια για το 63.2%.

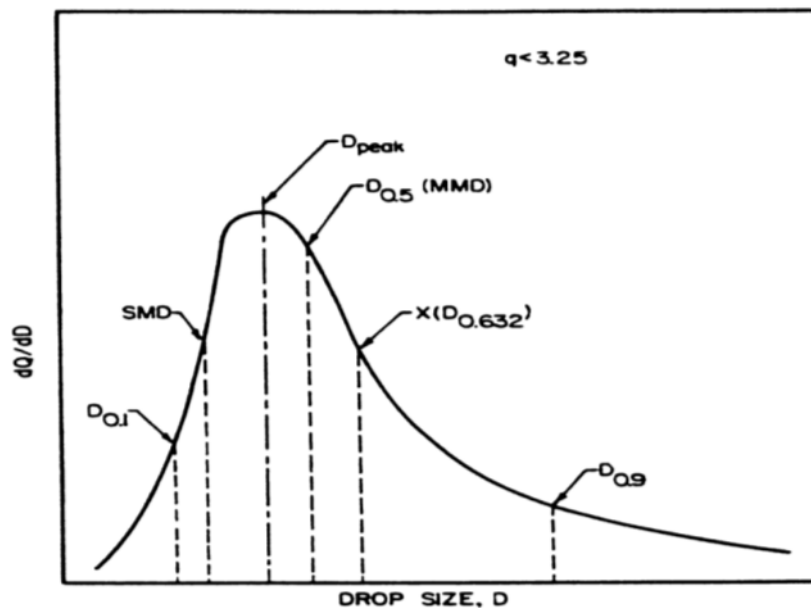
$D_{0.9}$  = όμοια για το 90%

$D_{0.999}$  = όμοια για το 99%

$D_{\text{peak}}$  = τιμή διαμέτρου που αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης συχνότητας μεγέθους σταγόνων.



Οι θέσεις των διαφόρων αντιπροσωπευτικών διαμέτρων στο διάγραμμα κατανομής συχνότητας μεγέθους σταγόνας φαίνονται στο Σχήμα 2.11.



Εικόνα 15:Θέσεις διαφόρων αντιπροσωπευτικών διαμέτρων.

### 1.12.2 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας το κεφάλαιο αυτό μπορούμε να πούμε τα εξής:

1. Δεν υπάρχει παράμετρος που να ορίζει πλήρως την κατανομή ενός μεγέθους. Για παράδειγμα δύο spray (νέφη) δεν είναι απαραίτητα ίδια αν έχουν την ίδια SMD διάμετρο ή την ίδια MMD διάμετρο. Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές μπορεί να παίζει μεγάλο ρόλο η μικρότερη ή η μεγαλύτερη διάμετρος σταγόνας και καμία από τις 2 προηγούμενες δεν δίνει αυτή την πληροφορία.
2. Δεν υπάρχει συσχέτιση της μέσης διαμέτρου του νέφους και της κατανομής της ενώ, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κατανομή είναι η Rosin-Rambler.
3. Για να περιγράψουμε τη διασπορά του spray χρησιμοποιούμε διάφορους όρους από τους οποίους ξεχωρίζει ο RelativeSpanFactor που δίνει ένδειξη για το εύρος των διαστάσεων και σχετίζεται με την Rosin-Rambler συνάρτηση.

### 1.13 Είδη Ακροφυσίων - Εκχυτήρων.

Η βασική λειτουργία των ακροφυσίων πίεσης είναι η μετατροπή της ενέργειας πίεσης που παρέχεται από την αντλία σε κινητική ενέργεια ενός νέφους σταγονιδίων του οποίου η σταθερότητα και η υπόσταση καθορίζονται από τις ιδιότητες του υγρού όπως είναι το ιξώδες, η πυκνότητα και η ογκομετρική παροχή.

Εκτός από το παραπάνω χαρακτηριστικό σχέδιο ενός ακροφυσίου πίεσης, η παροχή υγρού είναι ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα της πίεσης λειτουργίας του ακροφυσίου.

$$\text{παροχή} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = K_n \cdot \sqrt{P}$$

(1.13.1)

Επίσης, όσο υψηλότερο το ιξώδες, η πυκνότητα, επιφανειακή τάση και χαμηλότερη πίεση λειτουργίας θα οδηγήσει σε μεγαλύτερα σωματίδια.



$$\text{Ισχύει: } d_s = 157 \left(\frac{\sigma}{P}\right)^{0.5} + 597 \left[ \left(\frac{\mu}{\sigma P}\right)^{0.45} \cdot \left(\frac{Q}{K_n d_0 \left(\frac{P}{\rho}\right)^{0.5}}\right)^{1.5} \right] \quad (1.13.2)$$

Όπου:  $d_s$  : μέση διάμετρος σταγονιδίου

$\sigma$  : επιφανειακή τάση υγρού

$P$  : πίεση ακροφυδίου

$\mu$  : ιξώδες υγρού

$\rho$  : πυκνότητα υγρού

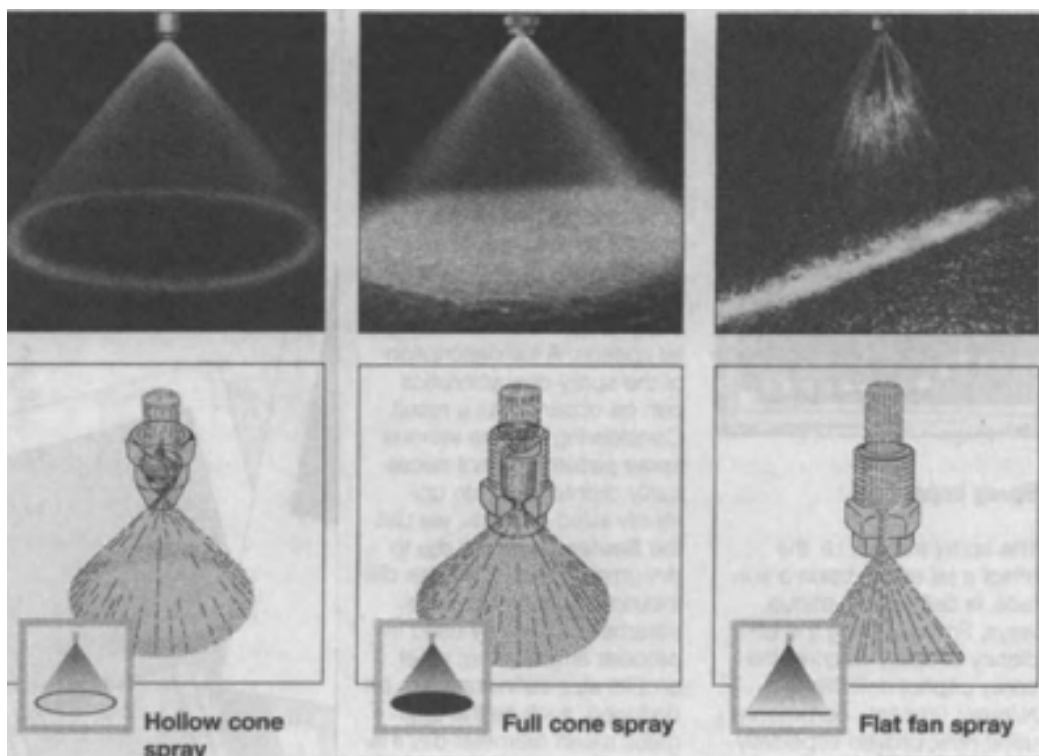
$Q$  : παροχή όγκου υγρού ( ρυθμός ροής ) ανά μονάδα χρόνου

$K_n$ : Σταθερά ακροφυσίου η οποία εξαρτάται από τη γωνία ψεκασμού

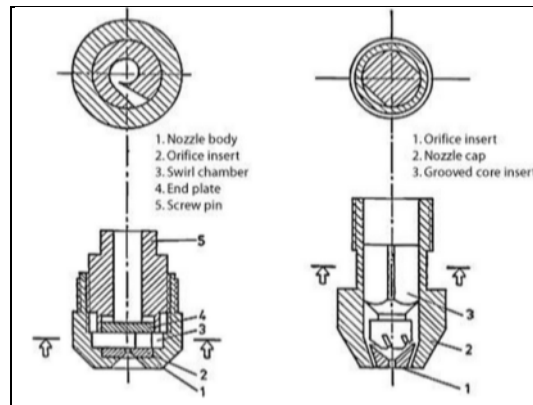
$d_0$  : διάμετρος στομίου ακροφυσίου.

Οι διάφοροι τύποι εκχυτήρων που κυκλοφορούν στην αγορά έχουν τις εξής εφαρμογές:

- Επικάλυψη- βαφή χρώματος
- Λίπανση
- Εφαρμογές χημικών
- Καθαρισμός
- Ψύξη – Ύγρανση
- Έλεγχο σκόνης
- Πυροπροστασία
- Ιατρικές εφαρμογές
- Κινητήρες μηχανών



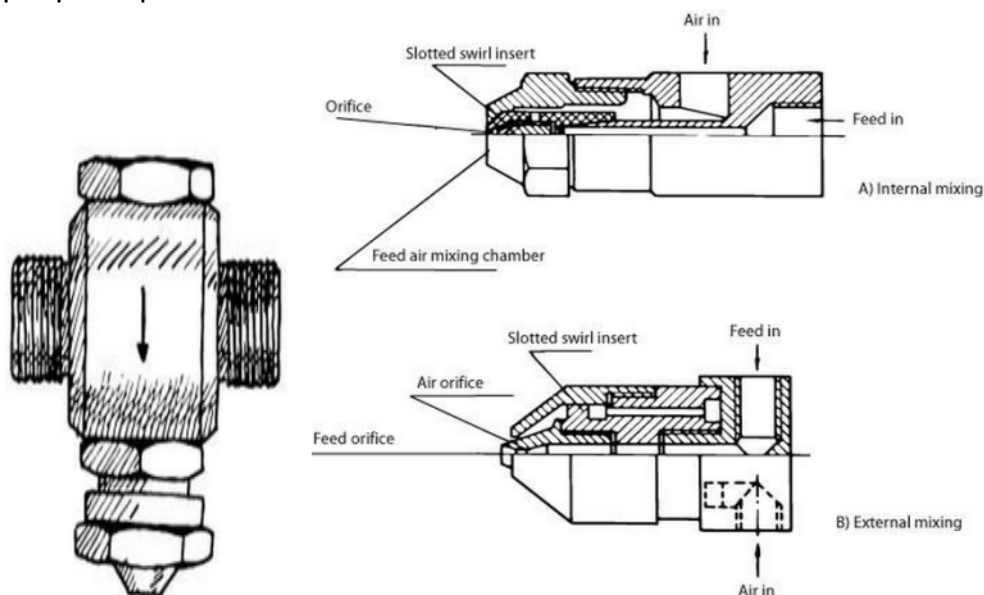
Εικόνα 16 Διάφοροι τύποι ψεκασμού



Εικόνα 17: Ακροφύσιο Πίεσης της Delavan και της Spraying Systems.

### 1.13.1 Ακροφύσια δύο ρευστών. (Twin Fluid)

Η αναγκαία ενέργεια για την ατμοποίηση του υγρού παρέχεται από πεπιεσμένο αέρα. Ο ψεκασμός δημιουργείται λόγω των υψηλών δυνάμεων διάτμησης μεταξύ της επιφάνειας του υγρού και του αέρα. Τέλος συχνά πριν την έξοδο το ρευστό οδηγείται σε στροβιλισμό για καλύτερο ψεκασμό.



Εικόνα 18: Ακροφύσιο δύο ροών α) εσωτερική β) εξωτερική μίξη

Η τεχνική twofluidnozzleatomization χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία για την παραγωγή πολύ μικρών σωματιδίων, ιδιαίτερα από υγρά τα οποία έχουν μεγάλα ιξώδη. Η σχέση που δίνει τη μέση διάμετρο των σωματιδίων που δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο είναι:

Στο φυγόκεντρο ψεκασμό σωματιδίων, το υγρό επιταχύνεται συνεχώς στην άκρη ενός τροχού με φυγόκεντρες δυνάμεις που παράγονται από την περιστροφή του τροχού. Το υγρό διανέμεται κεντρικά και στη συνέχεια εκτείνεται πάνω στην επιφάνεια του τροχού που περιστρέφεται σε υψηλή ταχύτητα, δημιουργώντας μία λεπτή στρώση. Η περιφερειακή ταχύτητα του δίσκου, οι ιδιότητες του υγρού και ο ρυθμός τροφοδοσίας του υγρού είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία ψεκασμού.



Ο τροχός θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε το υγρό πριν αποκολληθεί από πάνω του να έχει ταχύτητα ίση με την περιφερειακή ταχύτητά του. Πολύ συχνά οι τροχοί που συναντάμε είναι πτερύγια με διαφορετικό σχεδιασμό για να αποφευχθεί η ολίσθηση του υγρού πάνω από την εσωτερική επιφάνεια του τροχού. Ο τροχός λειτουργεί σαν ανεμιστήρας και ο αέρας απορροφάται μέσα στο μίγμα λόγω της περιστροφής δημιουργώντας ένα νέφος. Η σχεδίαση και οι ιδιότητες του τροχού καθορίζουν την ποσότητα του αέρα που θα ενσωματωθεί στα σταγονίδια.

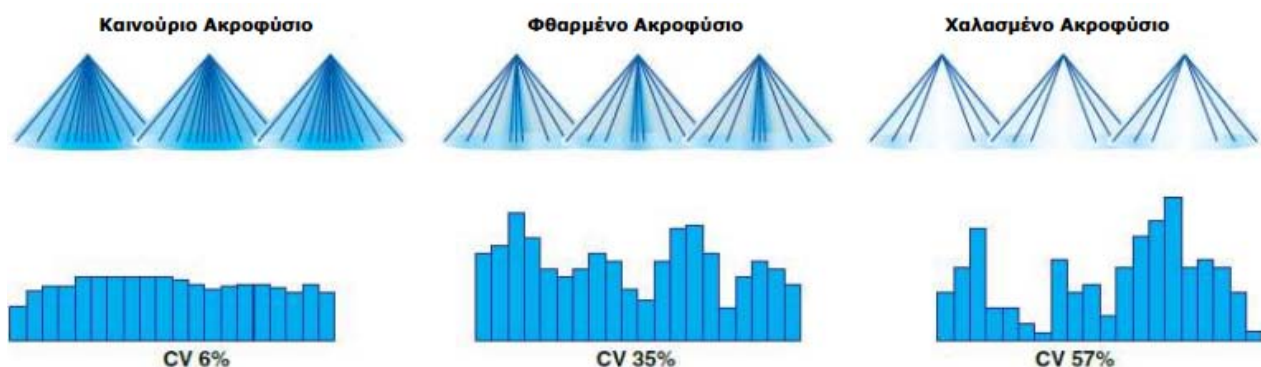
Παρά τις εντατικές έρευνες στο μηχανισμό νεφελοποίησης από περιστρεφόμενους τροχούς η πρόβλεψη των χαρακτηριστικών ψεκασμού παραμένει αβέβαιη. Οι ατμοποιητές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικούς ψεκαστήρες. Το μέγεθος του σωματιδίου ποικίλλει και έχει άμεση σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας του υγρού. Με σταθερή ταχύτητα τροχών, αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας προκαλεί αύξηση του μεγέθους του σωματιδίου. Η περιφερειακή ταχύτητα είναι ευρέως αποδεκτή ως η κύρια μεταβλητή που επηρεάζει το μέγεθος. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι τροχοί με διαφορετικές διαμέτρους που έχουν ίδια περιφερειακή ταχύτητα παράγουν σωματίδια διαφορετικού μεγέθους (μεγαλύτερες διαμέτροι παράγουν μεγαλύτερα σωματίδια). Τέλος το μέγεθος του σταγονιδίου ποικίλλει ανάλογα με το ιξώδες. Όταν το ιξώδες γίνεται υψηλό έχουμε μεγαλύτερα σωματίδια. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη ατμοποίηση το υγρό θερμαίνεται πριν τον ψεκασμό.

### 1.13.2 Φθορά Ακροφυσίων

Η φθορά εξαρτάται κυρίως από το υλικό κατασκευής του ακροφυσίου, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως:

- Πίεση λειτουργίας ακροφυσίου
- Μέγεθος και ρύθμιση ακροφυσίου
- Χημικά προϊόντα
- Κακής ποιότητας φίλτράρισμα

Αν το ακροφύσιο είναι φθαρμένο, ο ψεκασμός και η ροή θα είναι ακανόνιστα με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας ψεκασμού. Παρακάτω φαίνονται σχηματικά ένας κανονικός ψεκασμός με ένα καινούργιο ακροφύσιο και ένας ακανόνιστος ψεκασμός που προκαλεί ένα φθαρμένο ακροφύσιο. Όσο πιο μικρή είναι η τιμή του CV (συντελεστή μεταβλητότητας) τόσο πιο μικρή είναι η μεταβλητότητα των παρατηρήσεων.



Εικόνα 19 Φθορά ακροφυσίων





Η φθορά του ακροφυσίου δεν είναι εύκολο να ανιχθευθεί καθώς δεν αλλάζει οπτικά η παραγόμενη δέσμη. Αυτό που αλλάζει είναι η ροή της δέσμης και του ψεκασμού. Στα flat ή στα full cone ακροφύσια, η φθορά προκαλεί αύξηση της ροής στην κεντρική περιοχή της δέσμης. Για αυτό το λόγο, η ροή του ακροφυσίου θα πρέπει να ελέγχεται τακτικά συγκρίνοντας την πραγματική τιμή της ροής του ακροφυσίου με την ονομαστική τιμή του.

Η αντικατάσταση του ακροφυσίου ψεκασμού συνίσταται αν η πραγματική ροή είναι 10% μεγαλύτερη από την ονομαστική τιμή. Για την αύξηση του χρόνου ζωής ενός ακροφυσίου συνίσταται ο καθαρισμός του στο τέλος της εργασίας ψεκασμού για την αποφυγή ακαθαρσιών.

### 1.13.3 Quick Change – Quick Connect ακροφύσια

Με τα QuickChange – QuickConnect ακροφύσια, το σώμα παραμένει στην κεφαλίδα ενώ τα μπεκ ψεκασμού αντικαταστώνται. Τα ακροφύσια αυτά είναι πολύ εύκολο να συντηρηθούν καθώς διαθέτουν κάλυμμα συγκράτησης. Έτσι για να αφαιρέσουμε το μπεκ ψεκασμού αρκεί να ξεβιδώσουμε το καπάκι.



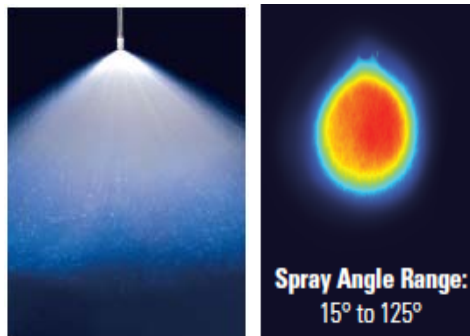
Εικόνα 20 Quick Change ακροφύσιο

## 1.14 Γενικοί Τύποι Ακροφυσίων

Ανάλογα με τη λειτουργία που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε υπάρχουν πάρα πολλοί τύποι ακροφυσίων. Οι κυριότεροι από αυτούς φαίνονται παρακάτω. Ο διαχωρισμός τους έχει γλινει βάση του αποτυπώματος του ρευστού μας κατά την έξοδο από το ακροφύσιο. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι υπάρχει και διαχωρισμός των ακροφυσίων όσο αφορά τη γεωμετρία τους (L, υπό γωνία ψεκασμός, σπειροειδής, μονοφασικής ή δυφασικής ροής, πολλαπλής έκχυσης κ.α.).

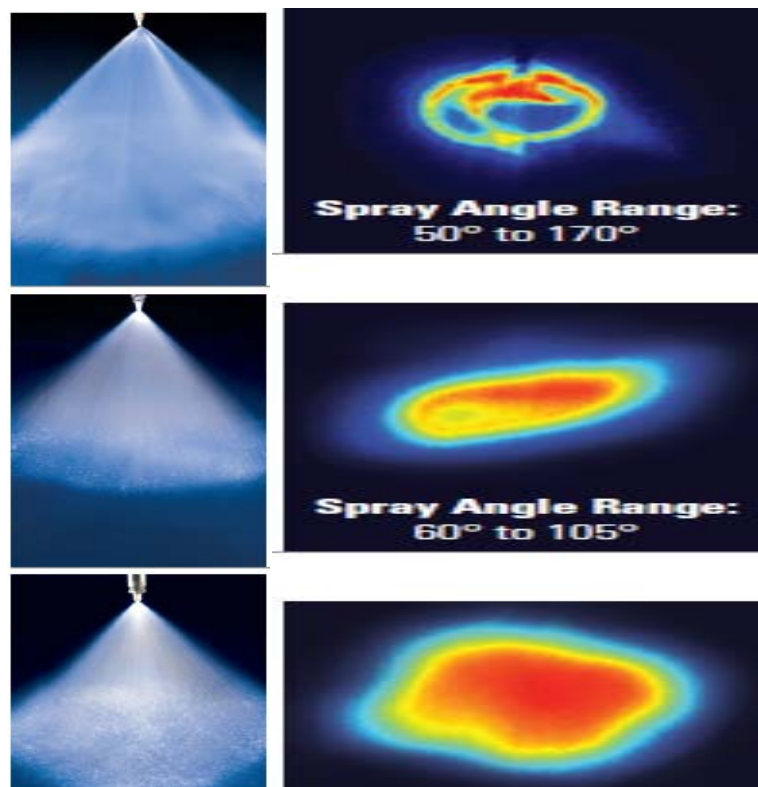
### 1.14.1 FULL CONE NOZZLES

Οι κύριες εφαρμογές τους είναι εκεί που επιθυμούμε έναν γεμάτο κώνο στο αποτύπωμα του σπρευ. Ακόμα υπάρχει δυνατότητα επιλογής του μεγέθους των σταγονιδίων (απο μικρά εως μεγάλα). Εφαρμογές του συγκεκριμένου τύπου ακροφυσίων γίνεται σε χημικό ψεκασμό, έλεγχο της σκόνης, πυροπροστασία, ψύξη, πλύσιμο, έγχυση καυσίμου.



**Εικόνα 21 FULL CONE NOZZLES**

Υπάρχουν κάποιοι επιπλέον τύπους αποτυπωμάτων στην ίδια κατηγορία όπως φαίνονται στη σχήματα (σπирάλ, οβάλ και τετράγωνο αντίστοιχα). Το σπирάλ χρησιμοποιείται κυρίως στην έγχυση καυσίμου μιας και επιτυγχάνονται μικρότερα σταγονίδια και καλύτερος διασκορπισμός.



**Εικόνα22 FULL CONE NOZZLES**

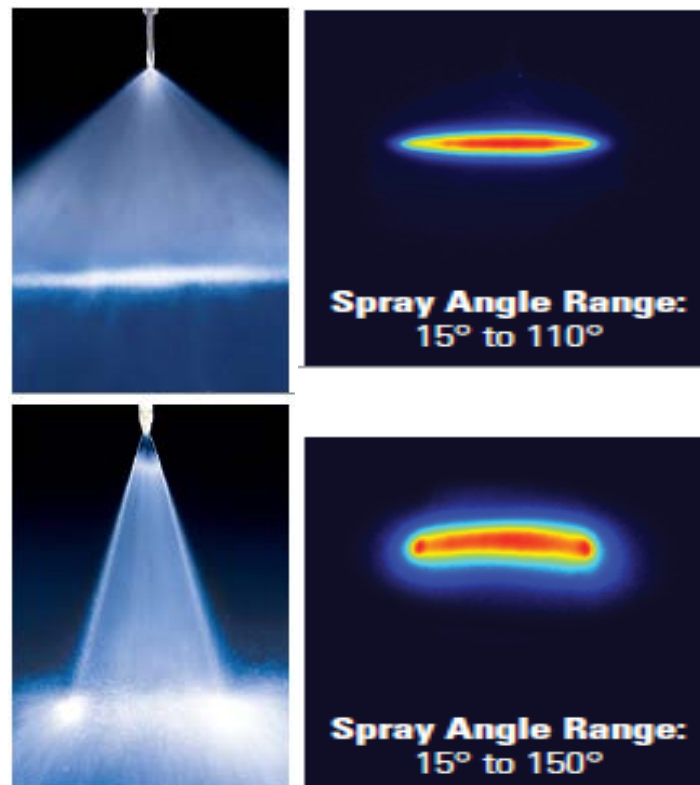
### 1.14.2 FLAT NOZZLES

Παρέχουν ομοιόμορφη κατανομή από μεσαίου έως μικρού μεγέθους σταγονιδίων κατά μήκος της λεπτής ορθογωνικής διατομής του αποτυπωματοστου ψεκασμού. Κύριες εφαρμογές επίστρωση (χρώματος κ.α.), ψύξη και καθαρισμός.



Εικόνα 23 FLAT NOZZLES.

Υπάρχουν επίσης κάποιοι επιπλέον τύποι ακροφυσίων με πανομοιότυπο αποτύμα για πιο συγκεκριμένες εφαρμογές όπως αφαλάτωση, πλύσιμο υψηλής πίεσης και αποκόλληση ετικετών στην πρώτη και εφαρμογές στη βιομηχανία χαρτιού στη δεύτερη.



Εικόνα24 FLAT NOZZLES

### 1.14.3 HOLLOW CONE NOZZLES

Δίνουν μικρά σταγονίδια μετά τον ψεκασμό και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που θέλουμε τη δημιουργία νέφους ομπρέλας κατά τη διαδικασία ψεκασμού. Οι κύριες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται είναι για ψύξη, για έλεγχο σκόνης, αποθείωσης καυσαερίων, διακοσμητικά σπρέυ, πυροπροστασία, καθαρισμό εσωτερικά του σωλήνων καθώς και σε λίγες περιπτώσεις έγχυσης καυσίμων.



**Εικόνα 25 HOLLOW CONE NOZZLES**

### 1.15 Αεροπορικές εφαρμογές

Στους κινητήρες αεροσκαφών χρησιμοποιούνται ακροφύσια με μεγαλύτερη απόδοση και χαμηλότερες εκπομπές ρύπων. Τα ακροφύσια αυτά μπορούν να αντέξουν σε μεγάλες θερμοκρασίες και παράλληλα έχουν χαμηλή εκπομπή σε οξείδια NOx και CO. Αυτού του τύπου ακροφύσια παρέχουν μεγαλύτερη απόκριση στις εξελισσόμενες απαιτήσεις του κινητήρα. Μερικές εταιρείες που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους ακροφύσια είναι οι CFM International, General Electric, Honeywell, Pratt & Whitney και η Rolls-Royce. Μερικά ακροφύσια που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες αεροσκαφών είναι τα ακόλουθα.



**Εικόνα 26 Αεροπορικά ακροφύσια**

Ο τύπος των ακροφυσίων που χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές κατασκευές είναι κυρίως FULLCONENOZZLES καθώς με αυτά επιτυγχάνεται καλύτερη διασπορά των σωματιδίων (ατμοποίηση), για να πετύχουμε δηλαδή καλύτερη, πιο ολοκληρωμένη και συνεπώς πιο αποδοτική καύση.

Υπάρχουν επίσης και ακροφύσια διφασικής ροής που η ατμοποίηση λαμβάνει χώρα με παρουσία αέρα μαζί με το καύσιμο. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με ακροφύσια μονοφασικής ροής, δηλαδή θα συμπιέζεται το καύσιμο στην επιθυμητή πίεση και θα διέρχεται από το ακροφύσιο όπου θα ατμοποιείται.



## 2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το πείραμα χρειαζόταν δύο διατάξεις οι οποίες θα μας βοηθούσαν στην υλοποίηση του. Η μία ήταν η διάταξη ροής όπου αυξανόταν η πίεση του καυσίμου και γινόταν η ατμοποίηση του και μία δεύτερη όπου με τη βοήθεια Laser παίρναμε τις μετρήσεις και μετρούσαμε τις ιδιότητες των καυσίμων.

Η πρώτη λοιπόν διάταξη είναι επιγραμματικά η εξής:

- Θάλαμος δοκιμών
- Αντλία καυσίμου
- Φίλτρο καυσίμου
- Μοτέρ εναλλασσόμενου τριφασικού ρεύματος
- Ακροφύσιο ( fullcone, κώνου)
- Ενδιάμεσες σωληνώσεις για την κυκλοφορία του καυσίμου
- Όργανα μέτρησης ροής και πίεσης
- Διακόπτες – βάνες για την απομόνωση της κυκλοφορίας του καυσίμου και την μεγαλύτερη ασφάλεια του πειράματος
- Inverter μετατροπή μονοφασικού σε τριφασικό ρεύμα

Αναλυτικότερα:

### 2.1 Κύκλος καυσίμου

Το καύσιμο βρίσκεται στο θάλαμο δοκιμών. Από εκεί με τη βοήθεια της αντλίας καυσίμου και διαμέσου σωληνώσεων κατευθύνεται πάλι στο θάλαμο δοκιμών αφού πρώτα έχει γίνει η νεφελοποίηση του καθώς διέρχεται υπό πίεση από το ακροφύσιο.

### 2.2 Θάλαμος δοκιμών

Ο θάλαμος μέσα στον οποίο ψεκάζεται το υγρό καύσιμο, έχει συνολικό ύψος 100cm και τετραγωνικής διατομής 40x40cm<sup>2</sup>. Ο σκελετός του θαλάμου είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι και τα πλευρικά τοιχώματα είναι από διαφανές γυαλί πάχους 3mm ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση της διαδικασίας ψεκασμού με τη χρήση οπτικών μεθόδων. Ο θάλαμος καταλήγει σε μία κωνική βάση – πάτωμα όπου το καύσιμο συγκεντρώνεται και ανακυκλοφορείται στην υπόλοιπη διάταξη. Πριν την διενέργεια του πειράματος ο θάλαμος καυσίμου έχει πληρωθεί με καύσιμο ώστε να αποφεύγεται η αναρρόφηση αέρα στο κλειστό κύκλωμα. Το πάνω κάλυμμα του θαλάμου είναι ένα ξεχωριστό κομμάτι (πάνω του έχει προσαρμοστεί το ακροφύσιο) ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο θάλαμο να ανοίγει για καθαρισμό και πλήρωση του δοχείου καυσίμου στην κωνική βάση. Στην έξοδο της κωνικής βάσης υπάρχει μια μονόδρομη βάνα με δυο κατευθύνσεις η μια για το άδειασμα του δοχείου και η δεύτερη για να οδηγήσει το καύσιμο στην ανακυκλοφορία.

Η προσομοίωση της κάυσης του σπρέι δεν εξαρτάται μόνο από τη μεταβολή του μεγέθους των σταγονιδίων του καυσίμου αλλά και από τις διαταραχές-συγκρούσεις των σταγονιδίων με τη ροή του αέρα. Για τον περιορισμό του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε μία πλάκα με μία οπή πάνω στην οποία προσαρμόσαμε μία σίτα σε διάφορες γεωμετρίες περιορίζοντας έτσι την επιστροφή-ανακυκλοφορία του καυσίμου. Για την έρευνα έγινε μια

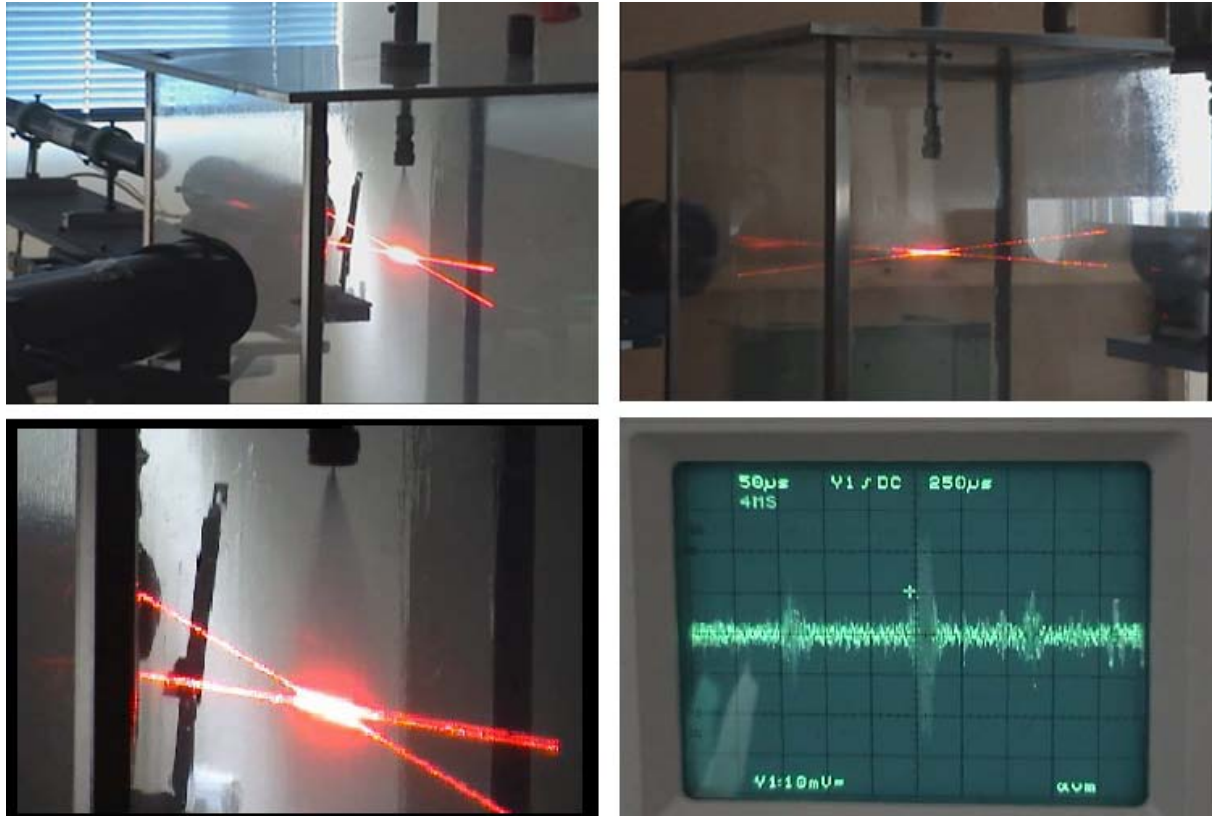




πειραματική διεξαγωγή χρησιμοποιώντας PDA τεχνική με σκοπό να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά των σταγονιδίων του καυσίμου και οι αλληλεπιδράσεις με την ροή και τη φλόγα μέσα στον κινητήρα jet.



Εικόνα 27 Θάλαμος δοκιμών



Εικόνα 28: Οπτική Διάταξη σε λειτουργία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.





Καταλήγει σε μία κωνική βάση - πάτωμα το οποίο κατά τη διενέργεια των μετρήσεων έχει πληρωθεί με το υπό δοκιμή καύσιμο ώστε να αποφεύγεται καταρχήν η αναρρόφηση αέρα στη συνέχεια του κλειστού κυκλώματος. Ο θάλαμος τίθεται κατακόρυφα. Ο σκελετός είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι ενώ τα πλευρικά τοιχώματα είναι από διαφανές γυαλί πάχους 3mm ώστε να επιτρέπεται η παρακολούθηση της διαδικασίας του ψεκασμού με χρήση οπτικών μεθόδων. Το ανώτερο κάλυμμα του είναι ξεχωριστό κομμάτι ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο θάλαμο να ανοίγει για να γίνεται η πλήρωση καυσίμου στην κωνική βάση.



*Εικόνα 29: Πειραματική διάταξη - Εφαρμογή Πειραματικής Τεχνικής.*

### **2.3 Εξαερωτής**

Μετά την έξοδο του από το δοχείο δοκιμών με τη βοήθεια της αντλίας, το καύσιμο περνάει από τον εξαερωτή/φίλτρο όπου εκεί καθαρίζεται από ακαθαρσίες και απομακρύνονται και φυσαλίδες αέρα οι οποίες αν βρίσκονταν στη ροή μας δεν θα μας βοηθούσαν στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Ο εξαερωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτόματος εξαερωτής καυσίμου τύπου TON 110 της Tigerloop, ο οποίος τοποθετήθηκε πριν την αντλία καυσίμου. Ο εξαερωτής εξασφαλίζει την αναρρόφηση καυσίμου από την αντλία που έπεται, απομακρύνοντας από τη γραμμή ποσότητες αέρα που τυχόν διαβιβάζονται από την κωνική βάση του θαλάμου δοκιμών. Ενεργεί ως δεξαμενή αποθήκευσης εξαερισμού, εξαλείφοντας την πιθανότητα κυκλοφορίας αέρα στη συνέχεια του κυκλώματος.



*Εικόνα 30 Εξαερωτής*



## 2.4 Αντλία καυσίμου

Μετά τον εξαερωτή βρίσκεται η αντλία καυσίμου όπου συμπιέζει και κυκλοφορεί το καύσιμο μας. Η αντλία καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε είναι γραναζωτή αντλία πετρελαίου της INMAN με ονομαστικά χαρακτηριστικά πίεσης 2-200 Bar και ονομαστική παροχή 1 lt/min (στις 1000 rpm).



Εικόνα 31 Αντλία καυσίμου



Εικόνα 32 Ηλεκτρικό μοτέρ



## 2.5 Ηλεκτρικό μοτέρ

Η αντλία λειτουργεί με ένα μοτέρ τριφασικού ρεύματος. Η επιλογή του μοτέρ έγινε με βάση τη δυνατότητα της ακριβής ρύθμισης των στροφών του κινητήρα. Τα χαρακτηριστικά του μοτέρ είναι 0,75 KW και μέγιστης ταχύτητας 1400rpm. Το μοτέρ τροφοδοτείται με ρεύμα μέσω ενός inverter (μετατροπή μονοφασικού σε τριφασικό ρεύμα) και ενός ποτενσιόμετρου για την ακριβή ρύθμιση των στροφών.

Όλα τα επιμέρους εξαρτήματα είναι στηριγμένα σε μια βάση. Μεταξύ τους είναι το κομπλερ το οποίο μεταφέρει την κίνηση από το μοτέρ στην αντλία. Στην έξοδο της ανλίας είναι συνδεδεμένα σωληνάκια υψηλής πίεσης ευκαμπτα από καουτσούκ ISNDN 10-06 3/8" / EN 853 που σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους χρησιμοποιούνται για εφαρμογές υδραυλικής πίεσης καυσίμων σε υψηλές πιέσεις. Έτσι οδηγείται το καύσιμο υπό πίεση στη βάση του ακροφυσίου και κατα συνέπεια στο ακροφύσιο. Στη διαδρομή παρεμβάλεται ένα μανόμετρο γλυκερίνης με ονομαστικά χαρακτηριστικά λειτουργίας 2-200Bar έτσι ώστε να ελέγχουμε συνεχώς την πίεση. Η παροχή είναι αναλογική με τις στροφές του κινητήρα που αυτές ελέγχονται με ένα ποτενσιόμετρο πριν το Inverter για να έχουμε όσες ακριβώς στροφές επιθυμούμε στον κινητήρα και κατά συνέπεια την πίεση λειτουργίας του πειράματος.



**Εικόνα 33** Εύκαμπτος σωλήνας υψηλής πίεσης



**Εικόνα 34** Μανόμετρο



## 2.6 Ακροφύσιο

Από τους τύπους ακροφυσίων που είδαμε νωρίτερα εμείς επιλέξαμε ακροφύσιο πλήρους κώνου (fullcone). Στις αεροναυτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται πιο περίπλοκα ακροφύσια για τη δημιουργία νέφους. Όσα αφορά τα ακροφύσια μονοφασικής συνεχούς ροής υπάρχουν τύποι που δημιουργούν στρόβιλο κατά την έξοδο του καυσίμου και συνεπώς ακόμα καλύτερη διασπορά. Στα ακροφύσια διφασικής ροής γίνεται ανάμιξη, συνήθως αέρα με το καύσιμο στο ακροφύσιο αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Έτσι επιλέχθηκε ο πιο απλός τύπος ακροφυσίου για τα πειράματά μας καθώς και τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν θα είναι με βάση τον πιο απλό τρόπο δημιουργίας νέφους. Τα χαρακτηριστικά επιλογής του ακροφυσίου έγιναν με βάση της δυνατότητας του εργαστηρίου έτσι επιλέχθηκε ακροφύσιο χαμηλής παροχής υψηλής πίεσης και μικρής γωνίας κώνου καθώς οι διαστάσεις του δοχείου(40x40) μας περιορίζουν για την επιλογή μεγαλύτερων γωνιών ακροφυσίων. Το ακροφύσιο φαίνεται παρακάτω και είναι της εταιρίας SprayingSystemsCo. Οι πιέσεις που εφαρμόστηκαν στο πείραμα είναι έως 20 Bar .

Ο τύπος του ακροφυσίου που επιλέχθηκε ήταν 1/4 D1-35. Ο συγκεκριμένος τύπος ακροφυσίου διατηρεί τις χαμηλότερες παροχές και τις μικρότερες γωνίες διασκορπισμού ώστε το νέφος να μην ψεκάζεται στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου.

Η δέσμη των υπό μελέτη καυσίμων εξέρχεται από ένα ακροφύσιο πλήρους κώνου (full – cone). Ο συγκεκριμένος τύπος ακροφυσίου επιλέχθηκε σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια. Καταρχήν ο τύπος αυτός είναι γενικός (generic) χωρίς ιδιαίτερα τεχνικά – κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

D

\*At the stated pressure in bar.

Body Inlet Conn. (in.)	Orifice Disc No. – Core No.	Orifice Dia. Nom. (mm)	Capacity (liters per minute)*										Spray Angle (°)*		
			0.7	1.5	2	3	4	6	7	10	15	20	1.5	3	6
1/4	D1-31	.79	.31	.41	.49	.59	.67	.80	.92	1.0	1.2	1.4	49	47	43
	D1.5-31	.91	.39	.51	.63	.76	.86	1.0	1.2	1.3	1.6	1.8	57	65	53
	D2-31	1.0	.45	.59	.72	.86	.98	1.2	1.4	1.5	1.8	2.0	62	63	61
	D3-31	1.2	.49	.64	.80	.95	1.1	1.3	1.5	1.6	1.9	2.2	63	65	63
	D1-33	.79	.32	.42	.46	.56	.64	.78	.90	.98	1.2	1.4	27	32	35
	D1.5-33	.91	.42	.55	.63	.75	.85	1.0	1.2	1.3	1.6	1.9	37	43	45
	D2-33	1.0	.47	.62	.78	.95	1.1	1.3	1.5	1.7	2.0	2.3	45	52	55
	D3-33	1.2	.57	.75	.95	1.1	1.3	1.6	1.8	2.0	2.5	2.8	48	54	57
	D4-33	1.6	.78	1.0	1.3	1.5	1.7	2.1	2.4	2.7	3.3	3.7	50	56	61
	D1-35	.79	.30	.39	.48	.58	.65	.78	.90	.97	1.2	1.3	19	23	26
	D1.5-35	.91	.41	.54	.65	.76	.85	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	23	27	29
	D2-35	1.0	.53	.70	.83	.99	1.1	1.3	1.5	1.7	2.0	2.2	40	44	47
	D3-35	1.2	.58	.76	.98	1.2	1.3	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	45	50	52
	D4-35	1.6	1.0	1.3	1.6	2.0	2.3	2.8	3.2	3.5	4.2	4.8	68	70	71
	D5-35	2.0	1.3	1.7	2.2	2.6	3.0	3.6	4.1	4.5	5.5	6.3	67	69	71
	D2-56	1.0	–	–	.80	.98	1.1	1.4	1.6	1.8	2.2	2.5	–	14	17
	D3-56	1.2	–	–	1.1	1.3	1.6	1.9	2.2	2.4	3.0	3.4	–	20	23
	D4-56	1.6	–	1.3	1.8	2.2	2.5	3.1	3.6	4.0	4.8	5.6	20	26	29
	D5-56	2.0	1.4	1.8	2.5	3.0	3.5	4.3	4.9	5.5	6.7	7.8	26	32	34
	D6-56	2.4	2.2	2.8	3.7	4.5	5.3	6.5	7.5	8.5	10.2	11.9	34	39	41
D7-56	2.8	2.9	3.8	4.9	6.0	6.9	8.5	9.8	11.0	13.5	15.6	45	52	54	
D8-56	3.2	3.7	4.9	6.2	7.6	8.8	10.8	12.4	13.9	17.0	19.6	52	57	59	
D10-56	4.0	5.1	6.7	8.6	10.6	12.2	15.0	17.3	19.3	24	27	62	65	67	

Εικόνα 35 Χαρακτηριστικά ακροφυσίου. (Spraying Systems Co).





Για παράδειγμα τα ακροφύσια του τύπου Pressure – swirl (simplex) είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε το υγρό να εξέρχεται με αρχική επαπτομενική ταχύτητα ως μια δακτυλοειδής δέσμη (annular sheet) η οποία διασπείρεται ακτινικά δημιουργώντας ένα σπρέυ δακτυλοειδούς κώνου με το κεντρικό τμήμα του να διατηρεί έναν πυρήνα αέρος. Μια άλλη κατηγορία ακροφυσίων είναι τα λεγόμενα δίδυμου ρευστού (twin fluid) με πιο αντιπροσωπευτικούς τύπους εκείνους του υποβοηθούμενου αέρα (air – assist atomizer) και του τύπου ριπής αέρα (airblast atomizer). Στους συγκεκριμένους τύπους ακροφυσίων το υγρό εκτείνεται σε ένα ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας σε μια διαδικασία εσωτερικής μίξης εντός του ακροφυσίου, το οποίο είναι κατάλληλα διαμορφωμένο.

## 2.7 Περιφερειακά

Χρησιμοποιήθηκε ροόμετρο Brooks τύπου πλωτήρα (0 – 0.8 GPM) για την καταγραφή και έλεγχο σταθερότητας της παροχής των υπό μελέτη καυσίμων κατά τη διέλευσή τους στο κλειστό κύκλωμα. Το ροόμετρο τέθηκε μετά τον εξαερωτή και πριν το σωλήνα εισαγωγής καυσίμου. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις της στάθμης του πλωτήρα για κάθε πίεση λειτουργίας που σημαίνει ότι η παροχή διατηρήθηκε σταθερή, επίσης δεν παρατηρήθηκαν φυσαλλίδες που θα υπονοούσαν κυκλοφορία αέρα εντός της σωληνογραμμής.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε Μανόμετρο Bourton γλυκερίνης Kindeman (0 – 25 bar) για την καταγραφή και έλεγχο της πίεσης ψεκασμού. Το μανόμετρο τέθηκε στην είσοδο του σωλήνα εισαγωγής καυσίμου ενώ στην έξοδο του προσαρμόστηκε το ακροφύσιο ψεκασμού.

## 2.8 Η Οπτική διάταξη (PDA) αποτελείται από :

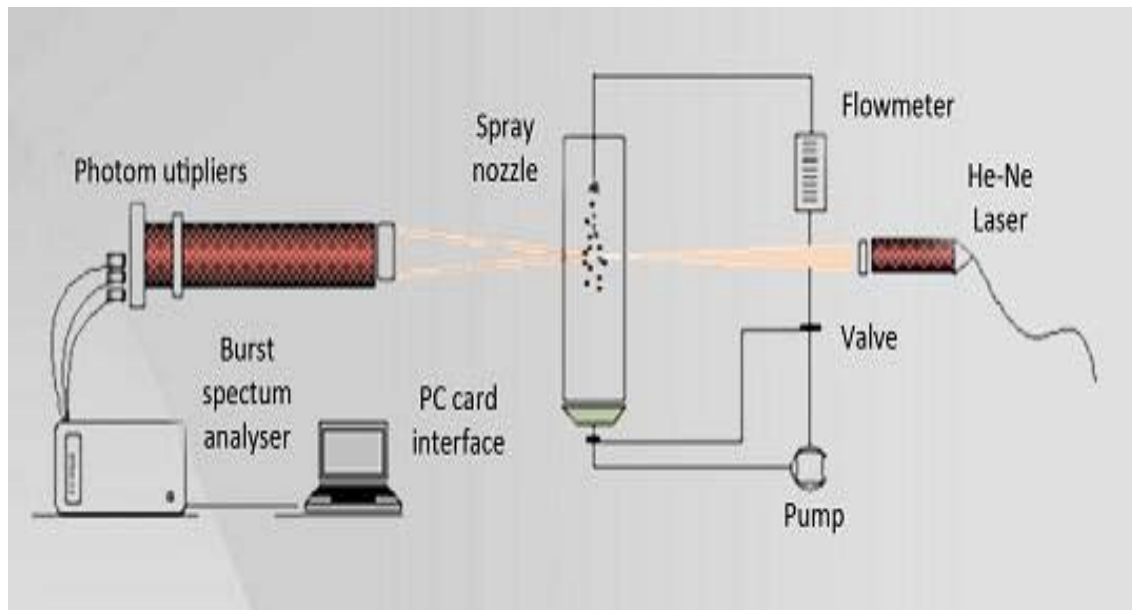
- Την πηγή της ακτίνας laser.
- Τον διαχωριστή ακτίνας (BeamSplitter).
- Το οπτικό μετατόπισης συχνότητας (FrequencyShifter).
- Οπτικοί φακοί για την εστίαση των δεσμών στον όγκο ελέγχου.
- Τους φακούς συλλογής.
- Τον φωτοπολλαπλασιαστή για την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό.
- Τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο υπάρχει η κάρτα μετατροπής A/D και γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων.
- Ένας παλμογράφος για την αξιολόγηση του σήματος πριν την καταγραφή.

Τα χαρακτηριστικά της οπτικής μετρητικής διάταξης περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο. Τα βασικά στοιχεία της οπτικής διάταξης φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Επίσης σκαρίφημα της όλης διάταξης κατά τη διαδικασία των μετρήσεων δίνεται στην Εικ.



**Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Οπτικά της Διάταξης.**

Οπτικό Μετάδοσης	Laser
Ισχύς του Λείζερ	20 mW
Μήκος Κύματος	632.8 nm
Μετατόπιση Συχνότητας	40 MHz
Εστιακή Απόσταση Οπτικών Μεταφοράς	250 mm
Οπτικό Συλλογής	PDA 57X10
Εστιακή Απόσταση Οπτικών Συλλογής	310 mm
Σκέδαση με Γωνία Διάθλασης	65 μοίρες



**Εικόνα 36: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης.**





### 3 Οπτική Τεχνική Μέτρησης.

#### 3.1 Οπτική Τεχνική Ανεμομετρίας Laser - Doppler (LDA)

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Η Ανεμομετρία Laser – Doppler (LDA) αποτελεί την πιο διαδεδομένη μη παρεμβατική, οπτική τεχνική μέτρησης ταχύτητας μιας ροής. Η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα σημειακής μέτρησης της ταχύτητας τροchioδεικτικών σωματιδίων που διαθέτουν κατάλληλες ιδιότητες ώστε να ακολουθούν την υπό μελέτη ροή.

Η Ανεμομετρία Φάσης Doppler (Phase Doppler Anemometry - PDA) αποτελεί μια προέκταση της ανεμομετρίας Laser Doppler Anemometry (LDA) αφού πέρα από την ταχύτητα δίνει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης του μεγέθους των φερόμενων σωματιδίων. Ως συνέπεια δίνει τη δυνατότητα συσχέτισης μεγέθους - ταχύτητας παρέχοντας έτσι επιπλέον πιο αναλυτική πληροφορία για τα χαρακτηριστικά της μετρούμενης ροής.

Στη συνέχεια θα δοθεί αρχικά μια σύντομη περιγραφή της τεχνικής LDA που ενσωματώνει τις βασικές αρχές λειτουργίας και της τεχνικής PDA σε σχέση με τη μέτρηση ταχύτητας των σωματιδίων (μοντέλο κροσσών συμβολής) και επόμενα θα περιγραφούν τα επιπλέον χαρακτηριστικά της τεχνικής PDA, αναφορικά με την αναγνώριση του μεγέθους των σωματιδίων και τη βελτιστοποίηση των συνθηκών μέτρησης.

##### 3.1.2 Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler αποτελεί το σημείο – κλειδί στις περισσότερες οπτικές τεχνικές μέτρησης ταχυτήτων, καθώς βασίζεται στη μετατόπιση συχνότητας του σκεδαζόμενου φωτός (είτε από ανάκλαση είτε από διάθλαση) κατά το πέρασμα ενός σωματιδίου από έναν όγκο ελέγχου. Στο σχήμα φαίνεται ένα σωματίδιο ταχύτητας  $u_p$  και τα μοναδιαία διανύσματα  $e_i$ ,  $e_s$  της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτίνας φωτός αντίστοιχα. Σύμφωνα με τη θεωρία Lorentz – Mie το φως σκεδάζεται σε όλες τις διευθύνσεις αλλά θεωρούμε μόνο την ανακλώμενη ακτίνα στη διεύθυνση του οπτικού συλλογής. Το εισερχόμενο φως έχει ταχύτητα  $c$  και μια συχνότητα  $f_i$  αλλά λόγω της κίνησης του σωματιδίου βλέπει μια διαφορετική συχνότητα  $f_p$  με την οποία σκεδάζεται προς το οπτικό συλλογής. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία Doppler μπορεί να υπολογιστεί η συχνότητα του φωτός που φθάνει στον φωτοανιχνευτή σύμφωνα με τη μαθηματική σχέση

$$f_s = f_i \left( \frac{1 - e_i (v_p / c)}{1 - e_s (v_p / c)} \right) \quad (3.1)$$

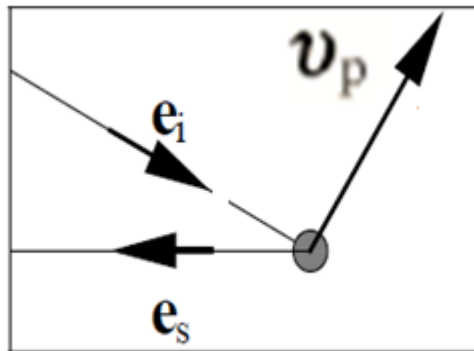
Λόγω του ότι η ταχύτητα του σωματιδίου ακόμα και για υπερηχητικές ροές είναι ακόμα πολύ μικρότερη του φωτός ( $U/c \ll 1$ ) η παραπάνω σχέση μπορεί να γραμμικοποιηθεί ως

$$f_s \approx f_i \left[ 1 + \left( \frac{v_p}{c} \right) (e_s - e_i) \right] = f_i + \frac{f_i}{c} v_p (e_s - e_i) = f_i + \Delta f \quad (3.2)$$

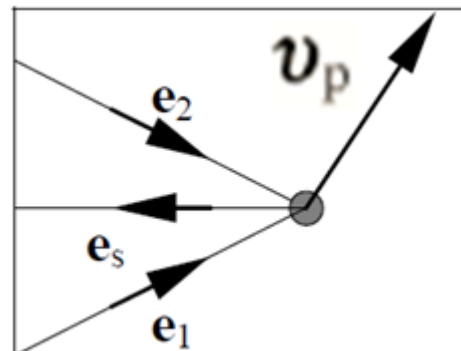
με την ταχύτητα  $u_p$  να είναι η μόνη άγνωστη παράμετρος. Οι δύο δέσμες σκεδάζονται προς τον φωτοανιχνευτή, με λίγο διαφορετικές συχνότητες Doppler, λόγω του διαφορετικού οπτικού δρόμου (και της γωνίας που σχηματίζουν).



$$f_{s,1} = f_1 \left[ 1 + \left( \frac{v_p}{c} \right) (e_s - e_1) \right], \quad f_{s,2} = f_2 \left[ 1 + \left( \frac{v_p}{c} \right) (e_s - e_2) \right] \quad (3.3)$$

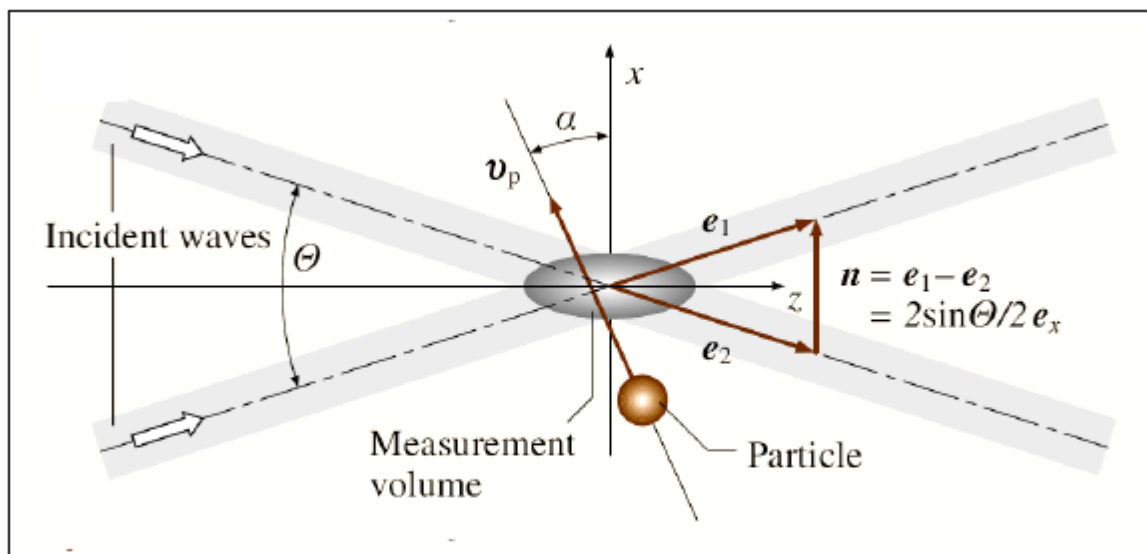


(α)



(β)

**Εικόνα 37:** Σκέδαση φωτός από (α) μία δέσμη σε κινούμενο σωματίδιο, (β) Σκέδαση φωτός από δύο εισερχόμενες δέσμες λέιζερ.



**Εικόνα 38:** Μέθοδος διπλής ακτίνας (Tropea et al. 2007).

Η υπέρθεση του φωτός των δύο δεσμών στον φωτοανιχνευτή, έχει ως αποτέλεσμα μια παλλόμενη ένταση φωτός λόγω συμβολής (εναλλασσόμενα ενισχυτικής και αποσβεστικής). Η συχνότητα Doppler αντιστοιχεί στη διαφορά των συχνοτήτων των δύο δεσμών. (Υπενθυμίζεται ότι οι δύο εισερχόμενες δέσμες έχουν ίδια συχνότητα  $f_1 = f_2 = f_i$ , όπου ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στο προσπίπτον φως). Κατά αυτόν τον τρόπο δύο δέσμες λέιζερ θα έχουν μία διαφορά Doppler (Doppler shift), λόγω της ταχύτητας του σωματιδίου. Η διαφορά εξαρτάται επίσης από την διεύθυνση της δέσμης φωτός. Η συχνότητα Doppler του ταλαντούμενου σκεδαζόμενου φωτός πλέον μπορεί να υπολογιστεί ως:



$$f_D = f_{s,2} - f_{s,1} = f_2 \left[ 1 + \left( \frac{v_p}{c} \right) (e_s - e_2) \right] - f_1 \left[ 1 + \left( \frac{v_p}{c} \right) (e_s - e_1) \right] = f_1 \left[ \left( \frac{v_p}{c} \right) (e_1 - e_2) \right] =$$

$$= \frac{f_1}{c} \left[ |e_1 - e_2| \cdot |v_p| \cdot \cos \phi \right] = \frac{1}{\lambda} 2 \sin(\theta/2) \cdot u_x = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} \cdot u_x$$

$$\Rightarrow f_D = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} \cdot u_x \quad (3.4)$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ των εισερχομένων δεσμών λέιζερ και  $\phi$  η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας και της διεύθυνσης μέτρησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοναδιαίο διάνυσμα  $e_s$ , απουσιάζει από την τελική σχέση που σημαίνει ότι η θέση του φωτοανιχνευτή δεν επηρεάζει τη μετρούμενη συχνότητα. Αντίθετα, κατά τη θεωρία σκέδασης Lorentz – Mie, η θέση του οπτικού συλλογής έχει σημαντική επίδραση στην ένταση του σήματος. Επίσης η συχνότητα Doppler  $f_D$  είναι πολύ μικρότερη του ίδιου του φωτός και έτσι μπορεί να μετρηθεί ως διακύμανση στην ένταση του ανακλώμενου φωτός από το σωματίδιο. Επίσης όπως δείχνει η τελευταία σχέση η συχνότητα Doppler είναι ευθέως ανάλογη στη  $x$  - συνιστώσα της ταχύτητας του σωματιδίου και έτσι η ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από την  $f_D$ :

$$u_x = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \cdot f_D \quad (3.5)$$

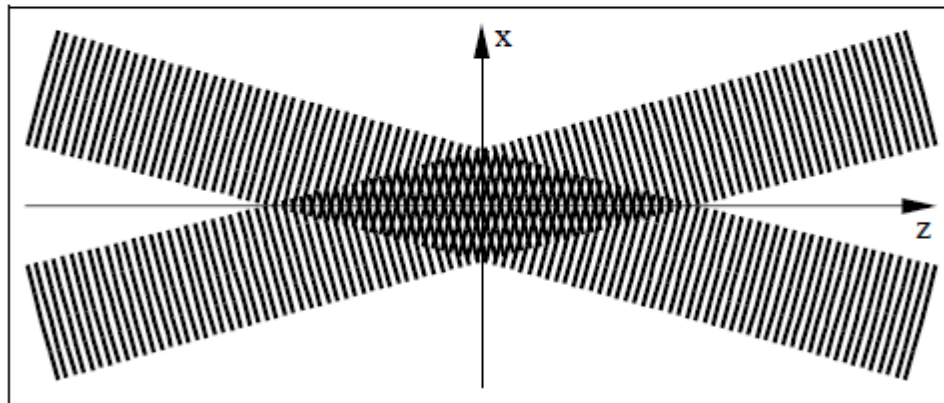
### 3.1.3 Μοντέλο Κροσσών Συμβολής

Με στόχο να γίνει μια πιο ποιοτικά αντιληπτή εικόνα της παραπάνω περιγραφής χρησιμοποιείται το γνωστό μοντέλο κροσσών συμβολής για την οπτικοποίηση του φαινομένου. Σύμφωνα με αυτό όταν δύο δέσμες λέιζερ εκπέμπουν σε δεδομένη μεταξύ τους γωνία θα συμβάλλουν σε έναν όγκο ελέγχου ο οποίος έχει μορφή που προσεγγίζει ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής, αποτελούμενο από φωτεινές και σκοτεινές περιοχές γνωστές ως κροσσούς συμβολής.

Κατά τη συμβολή των δεσμών στον όγκο ελέγχου τα μέτωπα κύματος που δημιουργούνται είναι επίπεδα παράλληλα στην κίνηση του σωματιδίου και κάθετα στο επίπεδο που σχηματίζουν οι δέσμες. Μια πιο επεξηγηματική εικόνα δίνεται στο σχήμα όπου φαίνονται τα μέτωπα των κυμάτων καθώς πλησιάζουν τον όγκο ελέγχου καθώς και η διαμόρφωση της έντασης του φωτός (γκαουσιανή) εντός του όγκου ελέγχου.

Τα επίπεδα συμβολής είναι γνωστά ως κροσσοί και η μεταξύ τους απόσταση  $\delta_f$  εξαρτάται από το μήκος κύματος και τη γωνία μεταξύ των συγκλινουσών δεσμών. Η μαθηματική έκφραση είναι

$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (3.6)$$



Εικόνα 39: Διαμόρφωση κροσσών κατά τη συμβολή δύο δεσμών λέιζερ (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics)

### 3.1.4 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά όγκου ελέγχου

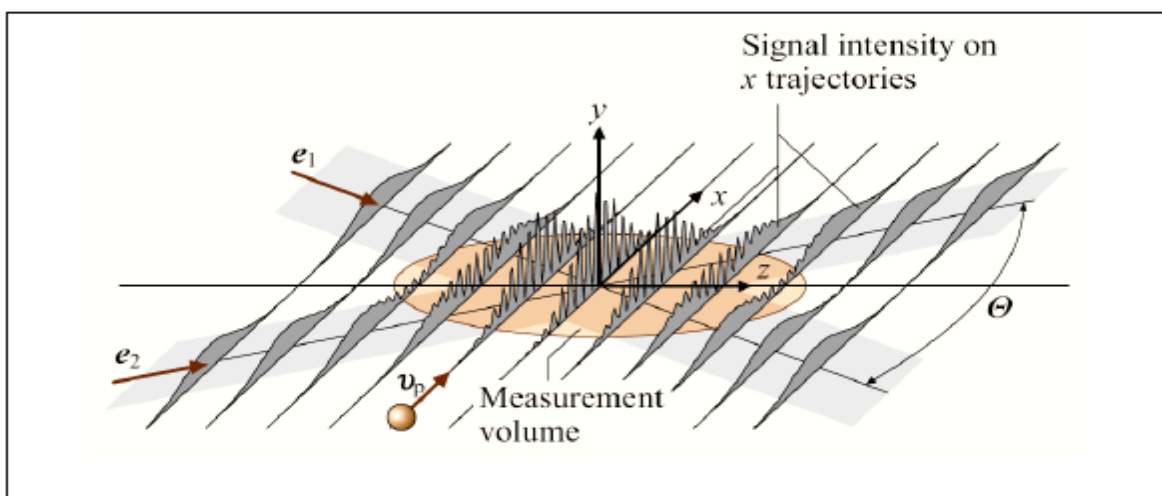
Το πάχος της ακτίνας λέιζερ  $d_f$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$d_f = \frac{4f\lambda}{\pi E d_i} \quad (3.7)$$

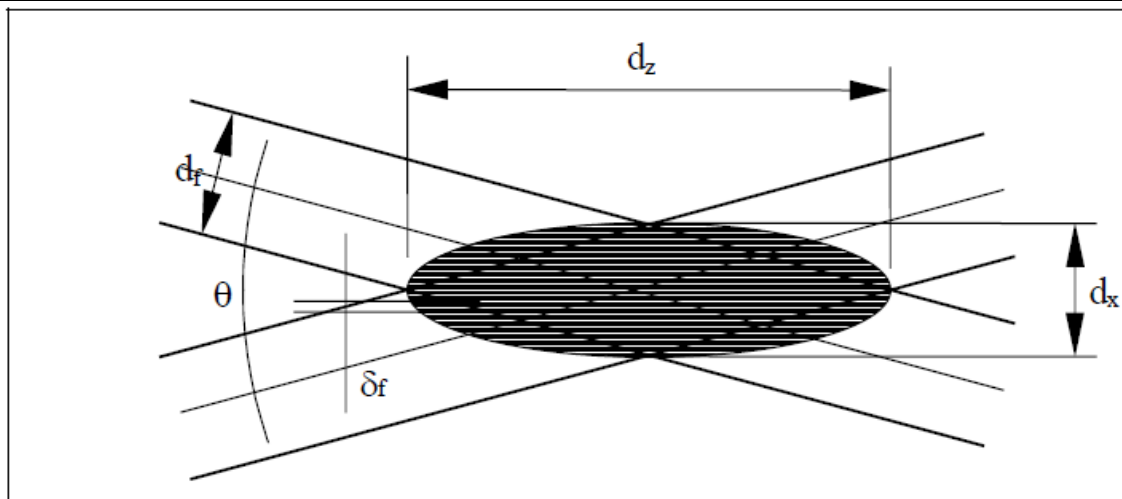
όπου  $f$  είναι η εστιακή απόσταση του οπτικού μετάδοσης,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της δέσμης,  $d_i$  το πάχος της δέσμης πριν τον φακό και  $E$  είναι ο συντελεστής μεγένθυσης. Όπως φαίνεται από τη σχέση τα μεγέθη  $d_i$ ,  $d_f$  είναι αντιστρόφως ανάλογα που σημαίνει ότι μια μεγάλη τιμή του  $d_i$  είναι επιθυμητή στην απαίτηση μιας μικρής της τιμής του  $d_f$ .

Το μέγεθος του μετρούμενου όγκου ελέγχου μπορεί να υπολογιστεί από το πάχος της διαμέτρου  $d_f$  των δεσμών και τη μεταξύ τους γωνία. Ο όγκος ελέγχου είναι ένα ελλειψοειδές του οποίου οι διαστάσεις σύμφωνα με το σχήμα είναι

$$d_x = \frac{d_f}{\cos(\theta/2)}, \quad d_y = d_f, \quad d_z = \frac{d_f}{\sin(\theta/2)} \quad (3.8)$$



Εικόνα 40: Επίπεδα έντασης φωτός στον όγκο ελέγχου (Tropea et al. 2007).



**Εικόνα 41: Διαστάσεις όγκου ελέγχου κατά τη συμβολή δύο ακτίνων λέιζερ (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).**

όπου  $d_x$ , είναι το ύψος,  $d_y$ , είναι το πάχος και  $d_z$ , είναι το μήκος του όγκου ελέγχου. Επίσης λόγω του ότι οι γωνίες προσβολής των δεσμών είναι συνήθως μικρές, οι διαστάσεις  $d_x$ ,  $d_y$  είναι συνήθως περίπου ίσες και αναφέρονται ως διάμετροι του μετρούμενου όγκου. Σφάλμα κατά τη μέτρηση μπορεί να προκύψει κατά τη διέλευση ενός πολύ μικρού μεγέθους σκεδαζόμενου σωματιδίου στα όρια του όγκου ελέγχου το οποίο μπορεί να μην ανακλά ικανή ένταση φωτός ώστε να αναγνωρίζεται από έναν φωτοανιχνευτή, όπως επίσης και κατά τη διέλευση ενός σωματιδίου μεγάλων διαστάσεων το οποίο μπορεί να αναγνωρίζεται στη ροή ακόμα και αν περνά οριακά εκτός του όγκου ελέγχου. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν τη μέτρηση είναι η ενίσχυση του σήματος στη συνέχεια καθώς και το κατώφλι θορύβου.

Από το ύψος  $d_x$  του όγκου ελέγχου και την απόσταση των κροσσών  $\delta_f$  υπολογίζεται το πλήθος των κροσσών ως

$$N_f = \frac{d_x}{\delta_f} = \frac{\frac{d_f}{\cos(\theta/2)}}{\frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}} = \frac{2d_f}{\lambda} \tan(\theta/2) \quad (3.9)$$

Αυτός ο τρόπος υπολογισμού του πλήθους των κροσσών είναι ακριβής όταν αναφέρεται στη διέλευση ενός σκεδαζόμενου σωματιδίου από τον κεντρικό άξονα του όγκου ελέγχου. Στην περίπτωση που το σωματίδιο περνά στα όρια του όγκου ελέγχου, θα περνά από λιγότερους κροσσούς και συνεπώς θα είναι και λιγότερες οι περίοδοι καταγραφής του σήματος από τις οποίες θα εκτιμάται η συχνότητα Doppler. Για να λαμβάνονται αξιόπιστα οι μετρήσεις ταχύτητας θα πρέπει το πλήθος των κροσσών να είναι (10 -100) στις περισσότερες περιπτώσεις. Το σημείο κλειδί είναι το πλήθος των περιόδων που παράγονται κατά την παλλόμενη ένταση του ανακλώμενου φωτός. Η ακρίβεια της μέτρησης βελτιώνεται αυξανόμενων των περιόδων αυτών.

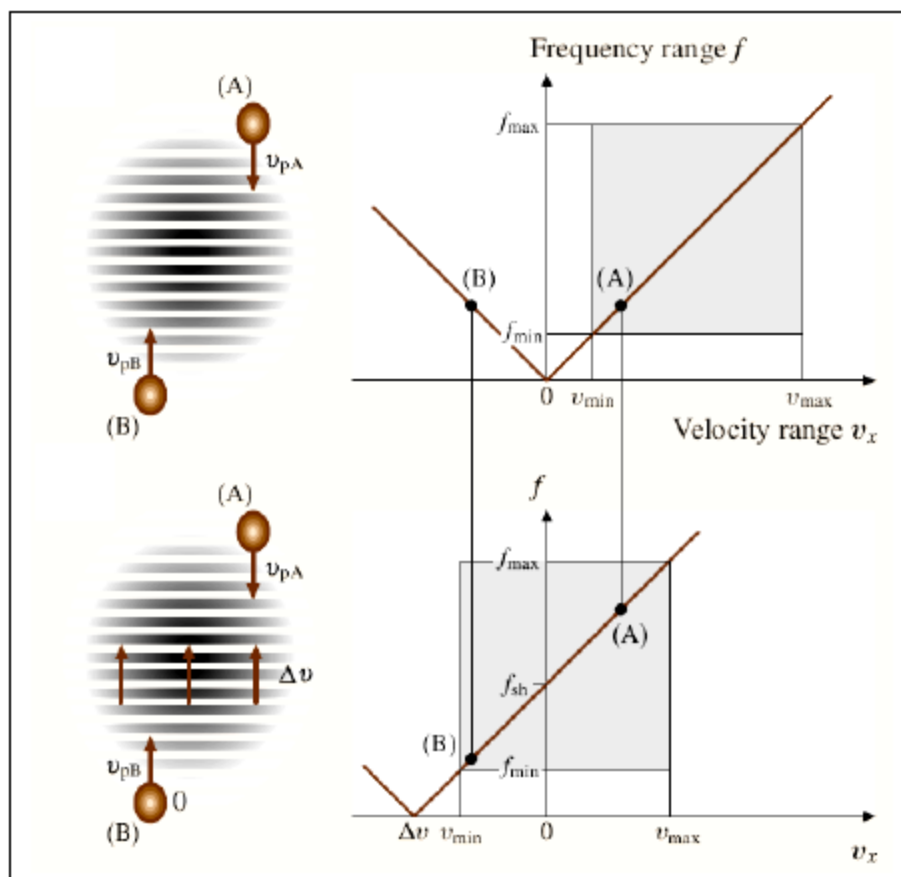
### 3.1.5 Μετατόπιση Συχνότητας

Το πρόβλημα που υπάρχει στο σύστημα διπλής ακτίνας, με ακτίνες ίδιας συχνότητας όπως είδαμε παραπάνω, είναι ότι δεν υπάρχει δυνατότητα αναγνώρισης της φοράς του σωματιδίου. Η συχνότητα δεν εξαρτάται από το πρόσημο της διεύθυνσης της



ταχύτητας. Δηλαδή μιά θετική και μιά αρνητική ταχύτητα ίδιου μέτρου θα έχουν ως αποτέλεσμα την ίδια την μετατόπιση Doppler. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα η συχνότητα μιάς εκ των δύο δεσμών μετατοπίζεται κατά  $f_{sh}$ . Σε αυτήν την περίπτωση τα επίπεδα των κροσσών συμβολής μετακινούνται κάθετα προς τον εαυτό τους με σταθερή ταχύτητα. Κατά αυτόν τον τρόπο, σωματίδια ακίνητα στον όγκο ελέγχου δίνουν συχνότητα ίση με τη συχνότητα μετατόπισης. Σωματίδια που κινούνται στην ίδια διεύθυνση με τους κροσμούς δίνουν μικρότερες συχνότητες Doppler ενώ εκείνα που κινούνται αντίθετα δίνουν μεγαλύτερες, μετατοπίζεται δηλαδή γραμμικά η σχέση μετατροπής συχνότητας ταχύτητας.

Για την μετατόπιση της ακτίνας χρησιμοποιείται ένα κύτταρο Bragg, το οποίο είναι ένα κομμάτι γυαλιού που στην μια του πλευρά ένας ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας οδηγούμενος από έναν ταλαντωτή παράγει ένα ακουστικό κύμα που διαδίδεται μέσα από το πρίσμα δημιουργώντας ένα περιοδικό σήμα υψηλής και χαμηλής πυκνότητας. Στην απέναντι πλευρά το πρίσμα είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η ανάκλαση του κύματος και είναι τοποθετημένο σε ένα υλικό που απορροφά την ακουστική ενέργεια.



Εικόνα 42:Σχέση ταχύτητας-συχνότητας α) χωρίς, β) με μετατόπιση συχνότητας (Τροπια 2007)





### 3.1.6 Πηγές θορύβου

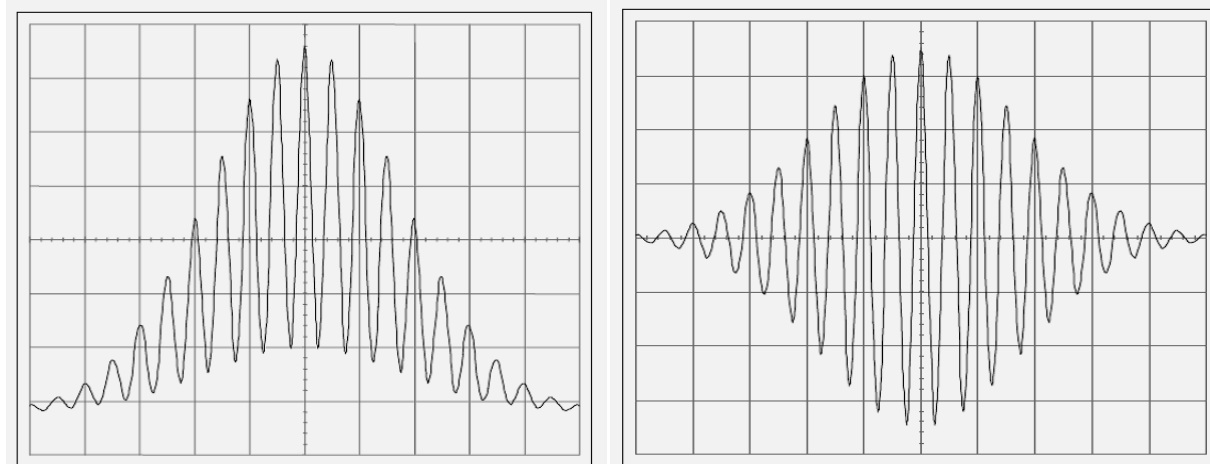
Το πρωταρχικό μέγεθος κατά την μέτρηση με οπτικές τεχνικές (LDA - PDA) είναι ένας παλμός τάσης από τον φωτοανιχνευτή. Αυτή η τάση περιέχει το συχνοτικό περιεχόμενο που σχετίζεται άμεσα όπως φάνηκε νωρίτερα με την μετρούμενη ταχύτητα των σωματιδίων. Το σήμα αυτό περιέχει θόρυβο επίσης. Η πρωταρχική πηγή θορύβου προέρχεται από τον ίδιο τον φωτοανιχνευτή ο οποίος εισάγει τον αποκαλούμενο θόρυβο βολής (shot noise). Το είδος αυτού του θορύβου μαζί με τον θερμικό θόρυβο (thermal noise) αποτελούν τα δύο σημαντικότερα είδη θορύβου τα οποία συνδέονται με τις ηλεκτρονικές διατάξεις και συνιστούν σε μεγάλο βαθμό την γενικότερη κατηγορία του τεχνητού θορύβου (artificial or man made noise).

Πιο συγκεκριμένα ο θόρυβος βολής παράγεται από ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σήματα τα οποία μπορούν να εντοπιστούν και να απαλειφθούν ή τουλάχιστον να περιοριστούν. Αποτελεί βασική ιδιότητα κατά τη διαδικασία της φωτοανίχνευσης. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο οπτικό πεδίο και το φωτοευαίσθητο υλικό είναι μια κβαντισμένη διαδικασία που αναπόφευκτα αποτυπώνει μια συγκεκριμένη ποσότητα διακυμάνσεων στη μέση τάση του σήματος. Επιπρόσθετα θόρυβος βολής υπεισέρχεται στο λαμβανόμενο σήμα από ανεπιθύμητες πηγές φωτός στο οπτικό συλλογής.

Άλλες πηγές θορύβου είναι, δευτερογενής ηλεκτρονικός θόρυβος από τις διόδους των φωτοπολλαπλασιαστών, θερμικός θόρυβος κατά την προενίσχυση στη διαδικασία επεξεργασίας σήματος. Η οπτική τεχνική λειτουργεί πλεονεκτικότερα σε συνθήκες όπου ως μόνη πηγή θορύβου που διατηρείται είναι ο θόρυβος βολής ενώ οι υπόλοιπες έχουν απαλειφθεί. Η δράση του μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση κατάλληλης ισχύος των δεσμών λέιζερ, κατάλληλων τροχοδικτικών σωματιδίων στη ροή και παραμέτρους του οπτικού συστήματος. Ακόμα ο θόρυβος θα μπορούσε να περιοριστεί επιλέγοντας το μικρότερο δυνατό εύρος που απαιτείται για τη μέτρηση του επιθυμητού εύρους ταχυτήτων θέτωντας κατάλληλα υπερατά και βαθυπερατά φίλτρα. Πολύ σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα του σήματος και την μετέπειτα επεξεργασία είναι το πλήθος των τροχοδικτικών σωματιδίων που εμφανίζονται ταυτόχρονα στον όγκο ελέγχου. Στην εικόνα 3.8 δίνεται η καταγραφή ενός σωματιδίου στον όγκο ελέγχου πριν και μετά το φιλτράρισμα πριν εισέλθει στον επεξεργαστή.

Επίσης τα μικρότερου μεγέθους σταγονίδια καυσίμου, μορφοποιώντας ένα νέφος (mist) αναμένεται να φθάνουν σε περιοχές του καυστήρα που δεν είναι άμεσα στο οπτικό πεδίο των διατάξεων ψεκασμού. Έτσι κάθε φαινόμενο που οδηγεί σε μείωση της διαμέτρου των σταγονιδίων είναι κυρίαρχης σημασίας στο σχεδιασμό προωθητικών μηχανών (Berthoumieu et al. 1999).

Η dc – συνιστώσα έχει απομακρυνθεί με ένα υπερατά φίλτρο και το σήμα φαίνεται ως βάση Doppler (Doppler Pedestal), που χρησιμοποιείται συχνά ως σήμα σκανδαλισμού (trigger – signal), για την έναρξη της δειγματοληψίας ενός σήματος. Ο “φάκελος” του διαμορφωμένου σήματος αντικατοπτρίζει την γκαουσιανή κατανομή της έντασης του φωτός στον όγκο ελέγχου. Στην περίπτωση που περισσότερα σωματίδια εμφανίζονται στον όγκο ελέγχου παράλληλα, τότε το σήμα που ανιχνεύεται στον φωτοπολλαπλασιαστή είναι το άθροισμα των κροσσών από τα διαφορετικά σωματίδια. Λόγω του ότι τα σωματίδια είναι τυχαία διεσπαρμένα στο χώρο του μετρούμενου όγκου, η συνεισφορά τους οδηγεί σε έναν “φάκελο” σήματος με διακυμάνσεις.

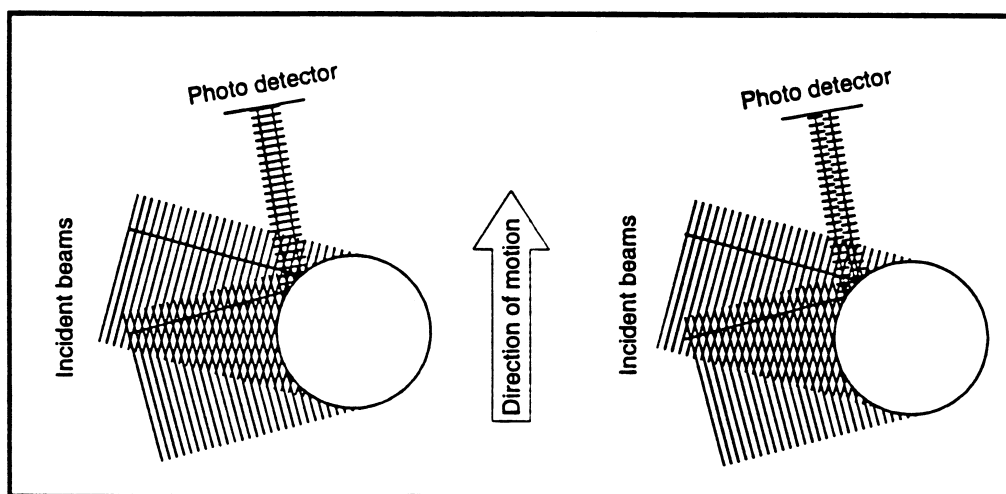


**Εικόνα 43: Doppler burst και φιλτραρισμένο σήμα με την dc συνιστώσα να έχει απομακρυνθεί. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics)**

## 3.2 Οπτική Τεχνική Ανεμομετρίας Φάσης - Doppler (PDA)

### 3.2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα η Ανεμομετρία Φάσης Doppler (Phase Doppler Anemometry - PDA) αποτελεί μια προέκταση της ανεμομετρίας (LDA). Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στη μέτρηση της ταχύτητας των σωματιδίων είναι κοινά και στις δύο τεχνικές. Το πρόσθετο χαρακτηριστικό της τεχνικής PDA είναι η εκτίμηση του μεγέθους με μέτρηση της διαμέτρου των σωματιδίων ταυτόχρονα με τη μέτρηση της ταχύτητάς τους, με χρήση επιπλέον ενός φωτοπολλαπλασιαστή. Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα κύρια χαρακτηριστικά της Ανεμομετρίας Φάσης – Doppler. Κατά την τεχνική LDA η μέτρηση της ταχύτητας των σωματιδίων επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μόνο φωτοανιχνευτή – φωτοπολλαπλασιαστή. Σύμφωνα με το μοντέλο των κροσσών, η συμβολή άλλοτε είναι ενισχυτική και άλλοτε αποσβεστική.



**Εικόνα 44: Η διαφορά Doppler που εμφανίζεται σε έναν φωτοανιχνευτή (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).**

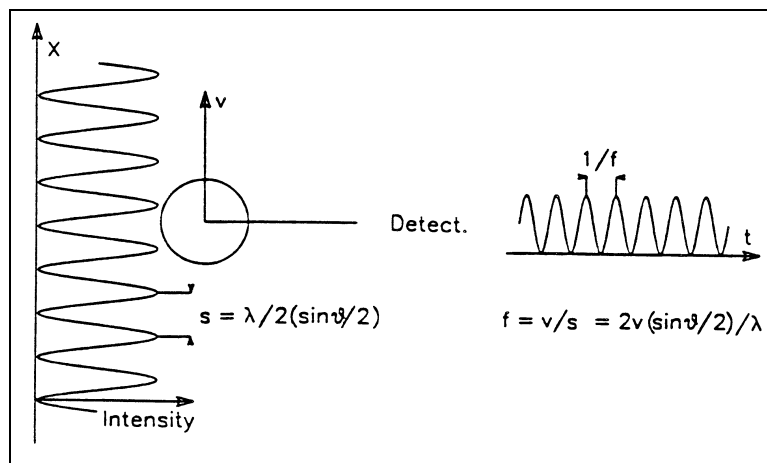


Η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός που λαμβάνεται από έναν φωτοπολλαπλασιαστή (φωτοδίοδο), ταλαντώνεται κατά μήκος του δρόμου που το σωματίδιο περνά διαμέσου των κροσσών. Αυτή η ταλάντωση έχει μία συχνότητα ευθέως ανάλογη της συνιστώσας της ταχύτητας στη διεύθυνση της κίνησης των κροσσών. Σχηματικά η περιγραφόμενη ταλάντωση δίνεται στο σχήμα

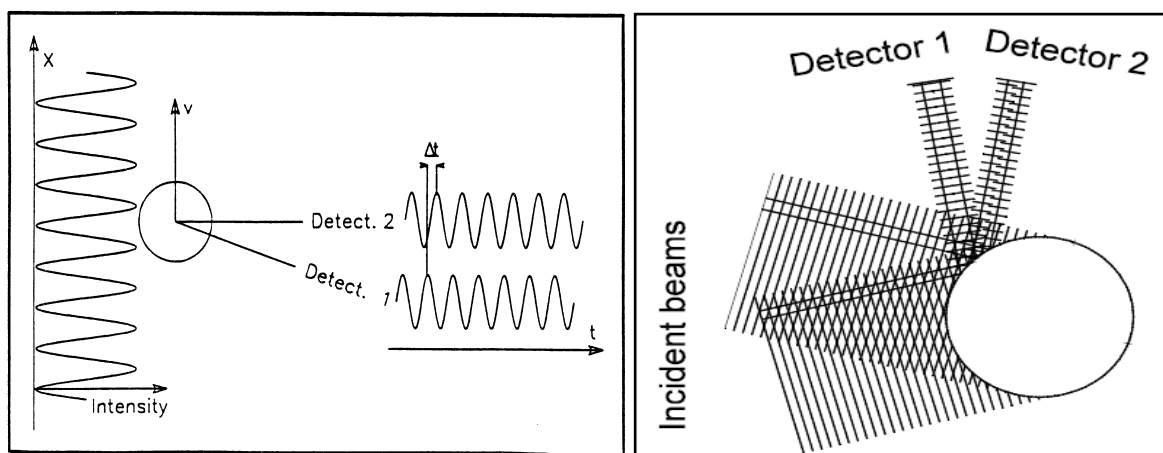
Θεωρούμε στη συνέχεια την κατάσταση όπου δύο φωτοανιχνευτές λαμβάνουν το ανακλώμενο φως από την επιφάνεια ενός σκεδαζόμενου σωματιδίου, κατά παρόμοιο τρόπο με αυτόν της τεχνικής LDA. Το αξιοσημείωτο είναι ότι η διαφορά του οπτικού δρόμου κατά την ανάκλαση από τις δύο αρχικές δέσμες αλλάζει με τη θέση των φωτοανιχνευτών. Αυτό σημαίνει ότι καθώς ένα σωματίδιο διέρχεται από τον όγκο ελέγχου οι δύο φωτοανιχνευτές λαμβάνουν σήματα Doppler της ίδιας συχνότητας, αλλά οι φάσεις τους διαφέρουν σε σχέση με τη μεταξύ τους γωνιακή θέση των φωτοδίοδων. (Durst & Zare 1975, Laser Doppler Measurements in Two – Phase Flows).

Στην εικόνα 42 απεικονίζεται η κατανομή έντασης σε κάθε φωτοπολλαπλασιαστή και η χρονική υστέρηση (time lag) μεταξύ του μετώπου των κυμάτων καθώς προσεγγίζουν τους αισθητήρες. Η αντίστοιχη διαφορά φάσης θα είναι:

$$\Phi_{12} = 2\pi f \cdot \Delta t \quad (3.10)$$



Εικόνα 45: Η σχέση των κροσσών με την ταχύτητα του σωματιδίου και τη συχνότητα της κυματομορφής. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

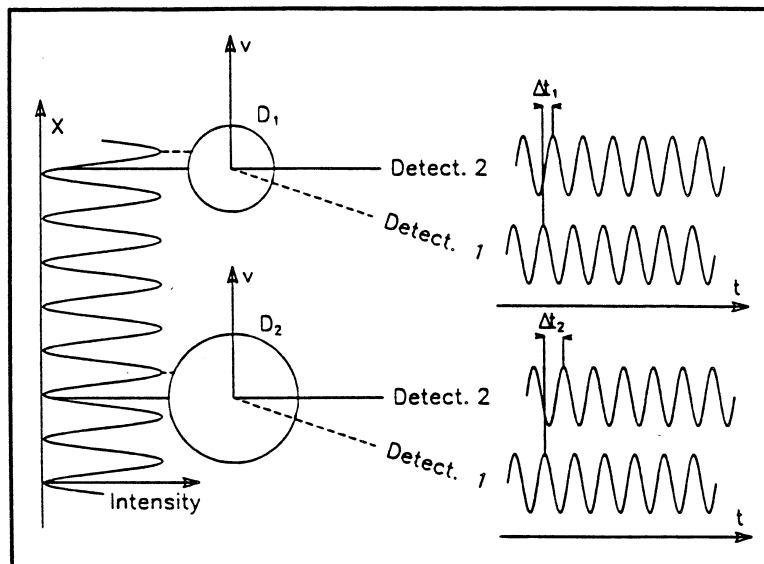


Εικόνα 46: Ανίχνευση φωτός από δύο φωτοπολλαπλασιαστές σε διαφορετική γωνία σκέδασης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).



### 3.2.2 Σχέση μεταξύ Διαμέτρου Σωματιδίου και Διαφοράς Φάσης

Η σημαντικότερη ιδιότητα είναι, ότι η διαφορά φάσης ανάμεσα σε δύο συχνότητες Doppler εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου, όταν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά γεωμετρικής οπτικής παραμένουν σταθερά. Στην εικόνα 3.12 απεικονίζονται δύο σωματίδια διαφορετικού μεγέθους. Η διαφορά φάσης μεταξύ των κροσσών Doppler του μεγαλύτερου σωματιδίου υπερβαίνει τους αντίστοιχους του μικρότερου.



Εικόνα 47: Εξάρτηση της διαφοράς φάσης από τη διάμετρο του σωματιδίου (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

Μαθηματικά, η φάση ενός σήματος Doppler που λαμβάνεται από μία δίοδο εκφράζεται ως :

$$\Phi_i = \alpha \cdot \beta_i \quad (3.11)$$

όπου  $\alpha = \pi \frac{n_1}{\lambda} D$ , η παράμετρος του μεγέθους,

- $n_1$  συντελεστής διάθλασης του σκεδαζόμενου μέσου,
- $\lambda$  το μήκος κύματος του Laser στο κενό,
- $D$  η διάμετρος του σωματιδίου.

Η σχέση (3.11) δείχνει τη γραμμική σχέση που συνδέει το μέγεθος σωματιδίου και τη φάση. Ο γεωμετρικός παράγοντας  $\beta_i$  εξαρτάται από τον τρόπο σκέδασης και τις γωνίες  $\theta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\psi_i$ . Η γωνία που σχηματίζουν οι δύο αρχικές δέσμες  $\theta$ , καθορίζει την απόσταση των κροσσών, ενώ οι  $\varphi_i$ ,  $\psi_i$  ορίζουν τη διεύθυνση προς το κέντρο της φωτοδίοδου από τον όγκο ελέγχου.

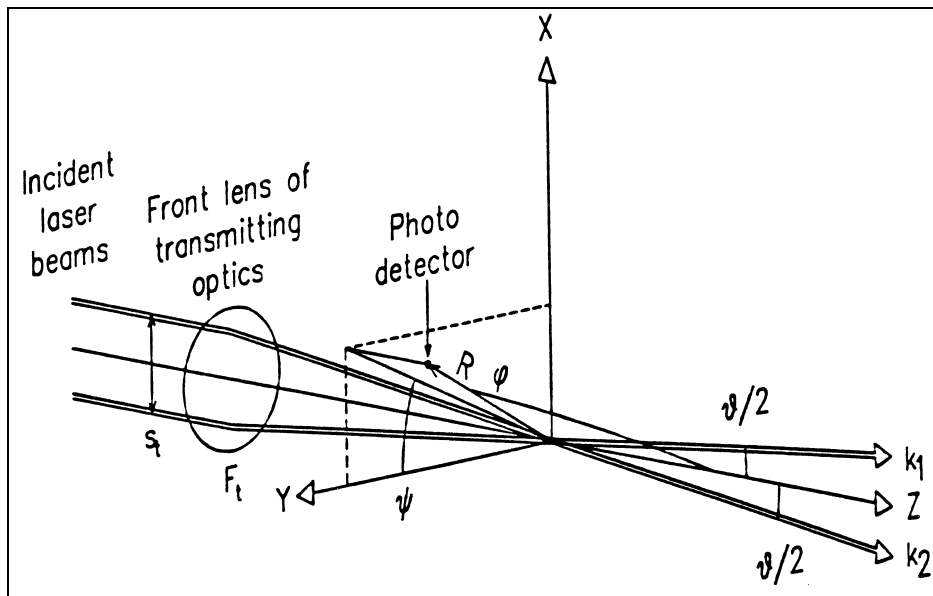
Η γωνία σύμπτωσης ανάμεσα στις δύο αρχικές δέσμες  $\theta$ , καθορίζεται από την απόσταση των δεσμών  $S_i$  και την εστιακή απόσταση των οπτικών διάδοσης  $F_i$ . ενώ  $\varphi_i$  είναι η γωνία σκέδασης από τον άξονα μετρούμενη από τον άξονα των οπτικών διάδοσης (η διχοτόμος των δύο αρχικών δεσμών ως προς τον άξονα Z) και  $\psi_i$  η αζιμούθια γωνία που δίνει την θέση εκ περιστροφής γύρω από τον άξονα Z (Εικ.44).

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των οπτικών της μετρητικής διάταξης PDA που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2 ενώ εύκολα υπολογίζεται η τιμή της γωνίας τομής των ακτίνων ως:



$$\varepsilon\varphi\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{S_i/2}{F_i} \Rightarrow \left(\frac{\theta}{2}\right) = \varepsilon\varphi^{-1}\left(\frac{S_i/2}{F_i}\right) = \varepsilon\varphi^{-1}\left(\frac{25}{605}\right) = 2,37^\circ \Rightarrow \theta = 4,7^\circ \quad (3.12)$$

Η παραπάνω ανάλυση κλείνει με τον ορισμό του παράγοντα  $\beta_i$  που συμπεριλαμβάνεται στη σχέση (3.11) και συνδέει την διάμετρο των σκεδαζόμενων σωματιδίων με τη φάση. Ο παράγοντας  $\beta_i$  εξαρτάται από τον τρόπο σκέδασης. Οι τρόποι σκέδασης από ένα σφαιρικό σωματίδιο απεικονίζονται στην εικ. 45 και είναι η ανάκλαση από την εξωτερική επιφάνεια του σωματιδίου, η διάθλαση διαμέσου του σωματιδίου (1<sup>ης</sup> τάξης) και η διάθλαση με μια εσωτερική ανάκλαση (2<sup>ης</sup> τάξης).



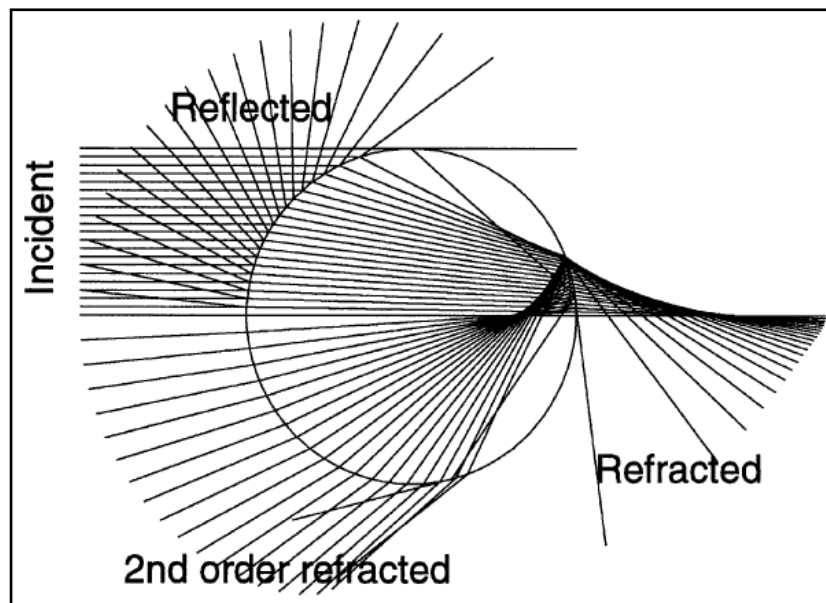
Εικόνα 48: Σχηματική παράσταση των γωνιών του οπτικού συστήματος (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).





### Πίνακας 3.2 Κυριότερα Χαρακτηριστικά Οπτικών

Οπτικά Μεταφοράς	TSI 9186A
Πηγή Laser	16m Watt He-Ne
Μετατόπιση Συχνότητας	40 MHz
Μήκος Κύματος Ακτίνας	632.8 nm
Εστιακή Απόσταση Οπτικών Μετάδοσης	605 mm
Απόσταση Δεσμών Laser	50 mm
Διάμετρος Ακτίνας Laser	1 mm
Μισή Γωνία Τομής των Ακτινών	2.37 μοίρες
Πλήθος κροσσών συμβολής	64
Απόσταση Κροσσών Συμβολής	7.67 $\mu$ m
Οπτικά Συλλογής	PDA 57X10
Φασματικός Αναλυτής Σωματιδίων	PDA 58N50
Γωνία Λήψης PDA	35 μοίρες
Εστιακή Απόσταση Οπτικών Συλλογής	810 mm
S/N validation	0 dB
Σφάλμα Σφαιρικότητας	10%
Σφάλμα Φάσης	10°



Εικόνα 49 Ορισμός των κυριότερων τρόπων σκέδασης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics)”.  
 Δοκίμηση



Η έκφραση του γεωμετρικού παράγοντα για τους διαφορετικούς τρόπους σκέδασης διαφέρει και χρησιμοποιώντας γεωμετρική οπτική προκύπτουν διαφορετικές μαθηματικές εκφράσεις όπως πιο αναλυτικά φαίνεται στη συνέχεια:

Για ανάκλαση:

$$\beta_i = \sqrt{2} \left\{ \sqrt{1 + \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \varphi_i \sin \psi_i - \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \varphi_i} - \sqrt{1 - \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \varphi_i \sin \psi_i - \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \varphi_i} \right\} \quad (3.13)$$

Για διάθλαση πρώτης τάξης:

$$\beta_i = 2 \left[ \sqrt{1 + n_{rel}^2 - \sqrt{2} n_{rel} \sqrt{f_{i+}}} - \sqrt{1 + n_{rel}^2 - \sqrt{2} n_{rel} \sqrt{f_{i-}}} \right] \quad (3.14)$$

όπου:

$$f_{i\pm} = 1 \pm \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \varphi_i \sin \psi_i + \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \varphi_i \quad (3.15)$$

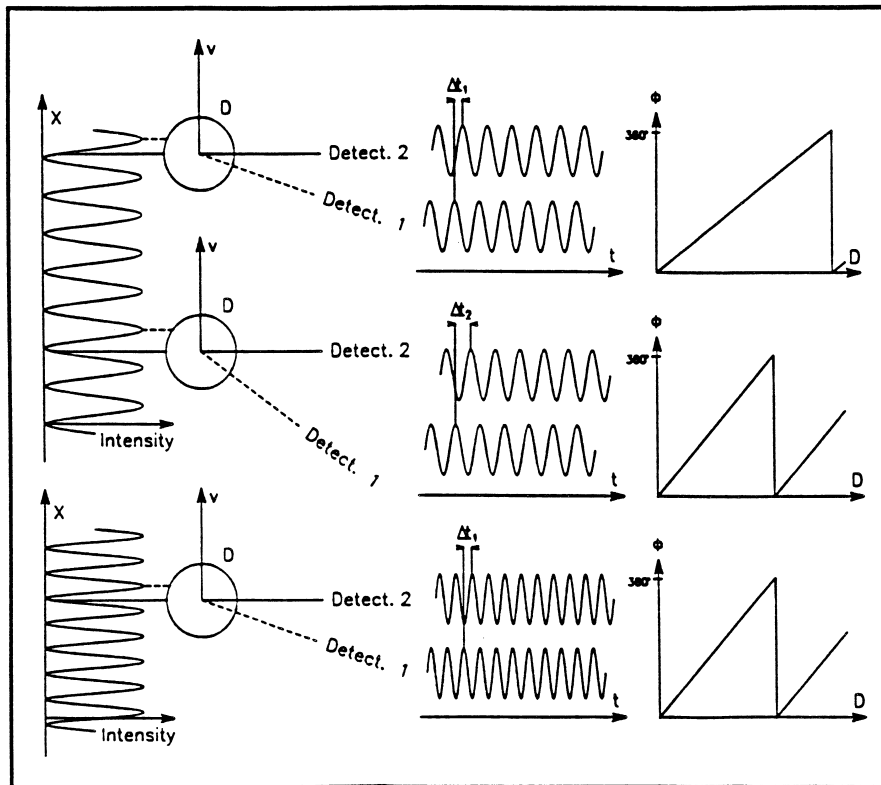
Για διάθλαση 2<sup>ης</sup> τάξης απαιτείται υπόλογισμός μέσα από επαναληπτική διαδικασία για τον προσδιορισμό του γεωμετρικού παράγοντα και δεν μπορεί να δοθεί μια μαθηματική έκφραση κλειστής μορφής.

### 3.2.3 Κλίση της Σχέσης Διαμέτρου - Φάσης

Όπως φαίνεται από την έκφραση του  $\beta_i$  γεωμετρικού παράγοντα, η ευαισθησία και το εύρος του PDA μπορούν να μεταβληθούν αλλάζοντας οποιαδήποτε από τις γωνίες  $\theta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\psi_i$ . Πρακτικά οι τρεις παραπάνω γωνίες δεν μπορούν να επιλεγούν ελεύθερα. Τυπικά, η επιλογή της γωνίας σκέδασης  $\varphi_i$ , είναι εντελώς περιορισμένη είτε ως προς την εξασφάλιση συγκεκριμένου τρόπου σκέδασης είτε ακόμα ως προς έναν ικανό λόγο σήματος προς θόρυβο, ή από πρακτικούς περιορισμούς της όλης μετρητικής διάταξης. Η απαιτούμενη για παράδειγμα απόσταση εργασίας των οπτικών επηρεάζει τα πιθανά εύρη των γωνιών  $\theta$ ,  $\psi_i$ .

Η κλίση αυξάνει στη σχέση φάσης - διαμέτρου με την αύξηση της γωνιακής απόστασης ανάμεσα στις φωτοδιόδους όπως για παράδειγμα με την αύξηση της γωνίας  $\psi_{12}$  καθώς και όταν η απόσταση των κροσσών μειώνεται, αυξάνοντας τη γωνία  $\theta$  ανάμεσα στις αρχικές δέσμες (Εικόνα 3.14).

Αλλαγή στη γωνιακή απόσταση  $\psi_{12}$  έχει επίδραση μόνο στην κλίση στη σχέση  $\Phi = f(D)$  δηλαδή για παράδειγμα στην ευαισθησία και το εύρος μεγεθών και δεν έχει επίδραση στη σχέση ταχύτητας-συχνότητας. Η αλλαγή αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε μεταβάλλοντας την εστιακή απόσταση του φακού συλλογής είτε επιλέγοντας ένα άλλο άνοιγμα πλάκας (aperture plate). Μεταβάλλοντας τη γωνία  $\theta$  επηρεάζεται η κλίση στη σχέση  $\Phi = f(D)$  όπως και η σχέση ταχύτητας - συχνότητας.



Εικόνα 50: Το αποτέλεσμα της αλλαγής της γωνίας  $\psi$  και της γωνίας  $\theta$  στην κλίση της συνάρτησης διαμέτρου σωματιδίου-φάσης. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

Η γωνία  $\theta$  μπορεί να αλλάξει κατά 2 τρόπους: είτε α) αλλάζοντας την εστιακή απόσταση του φακού διάδοσης, είτε β) αλλάζοντας την απόσταση των δεσμών. Η αλλαγή της απόστασης των δεσμών είναι καταλληλότερος τρόπος αφού η απόσταση εργασίας των οπτικών παραμένει αμετάβλητη. Επιπρόσθετες μεταβολές μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας φακούς με διαφορετικές εστιακές αποστάσεις.

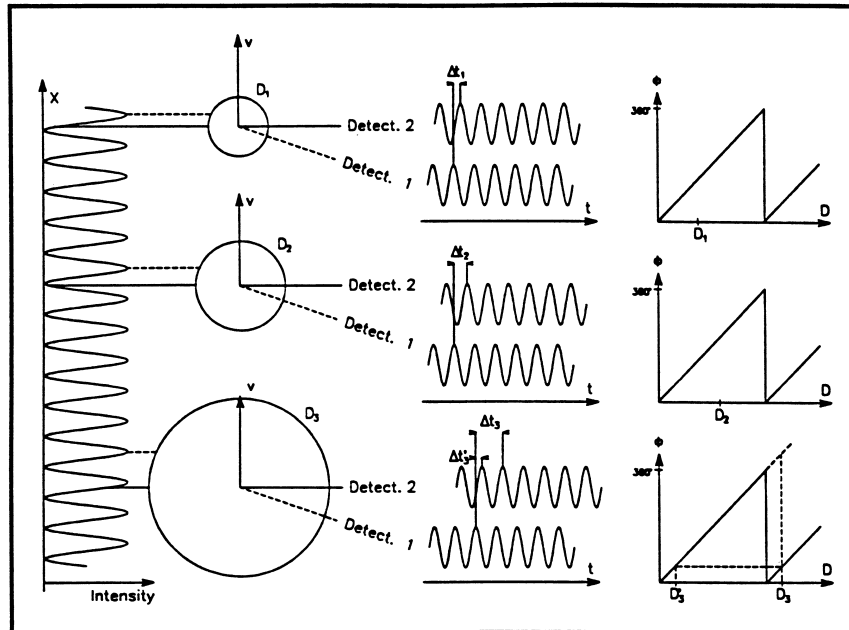
### 3.2.4 Διαχείριση της $2\pi$ - ασάφειας

Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται η διαφορά φάσης για τρία διαφορετικά σωματίδια αυξανόμενου μεγέθους. Ενώ η διαφορά φάσης για τα πρώτα δύο βρίσκονται μέσα στο εύρος  $2\pi$  στο τρίτο σωματίδιο αυτή πέφτει εκτός του παραπάνω εύρους. Μετρώντας τη διαφορά φάσης ανάμεσα σε σήματα Doppler που λαμβάνονται από δύο δίοδους μόνο δεν μπορεί να καθοριστεί αν η διάμετρος είναι  $D_3$  ή  $D'_3$ . Αυτό συμβαίνει γιατί δεν είναι δυνατή η διάκριση ανάμεσα σε διαφορά φάσης  $\Phi$ ,  $\Phi \pm 2n\pi$  όπου  $n=1,2,3,\dots$

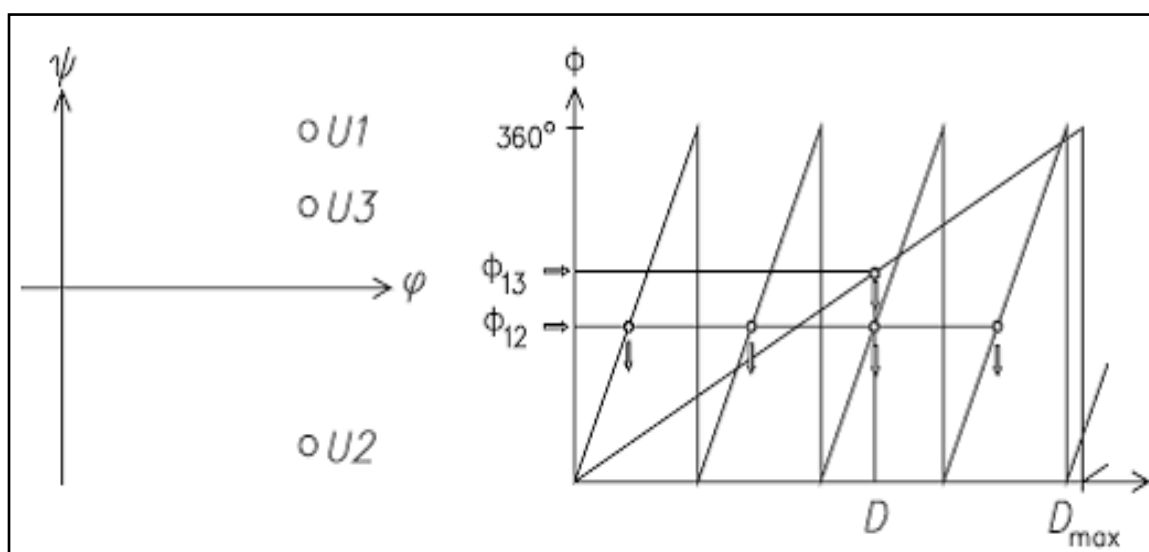
Η κατάσταση αυτή αναφέρεται ως « $2\pi$  - ασάφεια». Για να γίνει πιο κατανοητή η έννοια δίνεται μια σειρά σωματιδίων αυξανόμενου μεγέθους (διαμέτρων) που αναγνωρίζονται από ένα μόνο ζεύγος φωτοδίοδων. Όταν το μέγεθος γίνει αρκετά μεγάλο, ώστε η χρονική υστέρηση να αντιστοιχεί σε φάση πολλαπλάσια του  $2\pi$  τότε δεν είναι δυνατή η διάκριση της διαμέτρου (Εικόνα 3.15). Έτσι σε ένα σύστημα δύο φωτοδίοδων, γίνεται ένας αναγκαστικός συμβιβασμός ανάμεσα στην ευαισθησία και το εύρος μεγέθους. Είτε επιλέγεται υψηλή ευαισθησία (μεγάλη κλίση) και μικρό εύρος μετρούμενου μεγέθους (διαμέτρων), είτε επιλέγεται μεγαλύτερο εύρος διαμέτρων σε βάρος της ευαισθησίας.



Το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση μιας επιπλέον φωτοδιόδου ώστε οι τρεις φωτοδιόδοι, να είναι ασύμμετρα τοποθετημένες. Οι τρεις φωτοδιόδοι θεωρούνται στη συνέχεια ως ζεύγη: δύο από αυτές οι  $U1 - U2$  σχηματίζουν ένα ζευγάρι σχετικά σε μεγάλη χωρική απόσταση δίνοντας την μεγαλύτερη κλίση στη σχέση διαμέτρου – φάσης και έτσι υψηλότερη διακριτική ικανότητα συνοδευόμενη από ένα μικρότερο εύρος διαμέτρων, ενώ δύο άλλες οι  $U1 - U3$  να σχηματίζουν ένα ζευγάρι σε μικρότερη απόσταση, δίνοντας μια μικρότερη κλίση με ένα μεγαλύτερο εύρος διαμέτρων αλλά επίσης με μικρότερη διακριτική ικανότητα.



Εικόνα 51: Η διαφορά φάσης που προκαλείται από σωματίδια αυξανόμενων διαμέτρων και η περίπτωση διαφοράς φάσης μεγαλύτερης από  $2\pi$ . (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).



Εικόνα 52: Επιλογή της μοναδικής σωστής τιμής  $\Phi_{13}$  με τη βοήθεια δύο ζευγών φωτοδίοδων. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

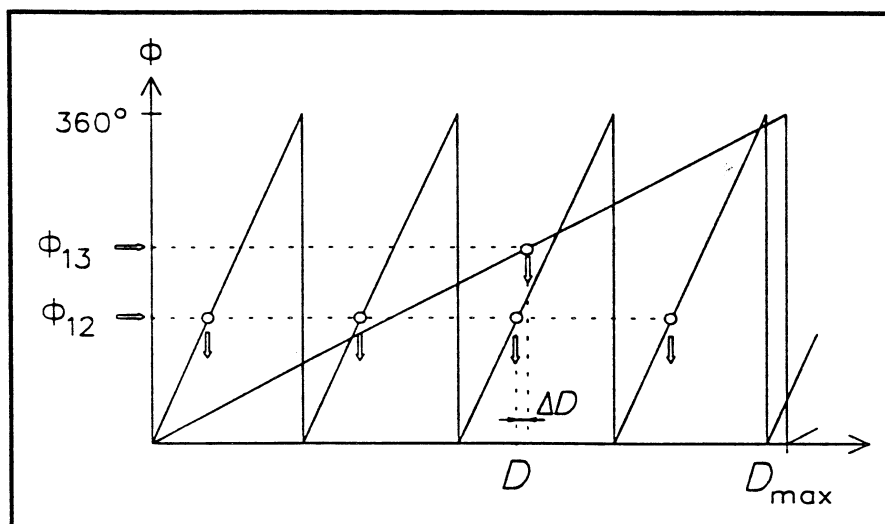


Συγκρίνοντας τις διαφορές φάσης από τα δύο ζεύγη φωτοδιόδων μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονα, μια υψηλή διακριτική ικανότητα και ένα μεγάλο εύρος μέτρησης διαμέτρων.

Στην Εικ.49 φαίνονται μιά σειρά από τιμές διαμέτρων που αντιστοιχούν στην μετρούμενη τιμή της  $\Phi_{12}$  (όπως φαίνεται από τα βέλη). Η τιμή της διαφοράς φάσης  $\Phi_{13}$ , στο διάγραμμα (μόνο ένα βέλος), χρησιμοποιείται για την επιλογή της μοναδικής σωστής τιμής. Οι φωτοδιόδοι του σχήματος έχουν τοποθετηθεί όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δηλ. με το ζεύγος  $U1 - U2$  σε μεγάλη απόσταση προσδίδοντας καλύτερη διακριτική ικανότητα και το ζεύγος  $U1 - U3$  να βρίσκεται σε μικρή απόσταση αποδίδοντας ένα μεγαλύτερο εύρος μετρούμενων διαμέτρων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι θέσεις των φωτοδιόδων ανφέρονται στην γωνία  $\psi_i$  δηλ. την αζιμούθια γωνία που δίνει την θέση εκ περιστροφής γύρω από τον άξονα  $Z$ , όπως ορίστηκε νωρίτερα.

### 3.2.5 Έλεγχος της Σφαιρικότητας.

Η διάταξη των τριών φωτοδιόδων θεωρούμενων σε ζεύγη έχει ένα ακόμα χρήσιμο χαρακτηριστικό. Η διαφορά φάσης που αντιστοιχεί σε κάθε ζεύγος διόδων, δίνει πληροφορία για την καμπυλότητα σε ένα συγκεκριμένο τόξο της επιφάνειας του σωματιδίου. Με δύο τέτοια ζευγάρια διόδων είναι δυνατή η μέτρηση της καμπυλότητας σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες της επιφάνειας. Εάν το σωματίδιο είναι σφαιρικό, τα δύο ζευγάρια διόδων θα πρέπει να μετρήσουν ταυτόσημες καμπυλότητες. Αυτή είναι η βασική αρχή του ελέγχου σφαιρικότητας που γίνεται από την διάταξη του Δυναμικού Αναλυτή Σωματιδίων (Particle Dynamic Analyzer - PDA). Οι διαφορές φάσης  $\Phi_{12}$ ,  $\Phi_{13}$  θα έπρεπε να δείχνουν στην ίδια διάμετρο  $D$ .



**Εικόνα 53:** Η διαφορά  $\Delta D$  στη διάμετρο αντιστοιχεί στη διαφορά των δύο φάσεων και οφείλεται στη μη σφαιρικότητα του σωματιδίου. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

Εάν οι δύο τοπικές καμπυλότητες αποκλίνουν, οι φάσεις  $\Phi_{12}$ ,  $\Phi_{13}$  θα δείχνουν σε τιμές διαμέτρων που θα διαφέρουν κατά  $\Delta D$  (Σχήμα 3.18). Στο λογισμικό του Δυναμικού Αναλυτή Σωματιδίων (PDA) ένα κριτήριο αξιολόγησης είναι η μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση από τη σφαιρικότητα. Έτσι εάν η απόκλιση των διαμέτρων  $\Delta D$  είναι μεγαλύτερη από ένα

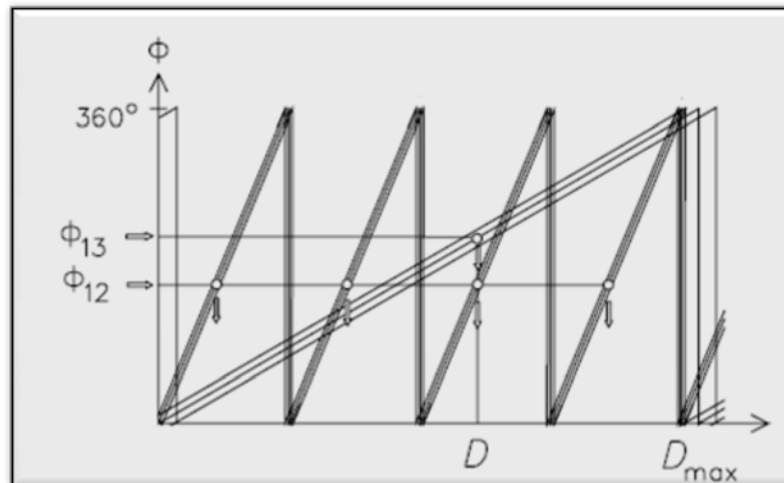




συγκεκριμένο ποσοστό που τίθεται από τον χρήστη, το σωματίδιο δεν γίνεται αποδεκτό. Η μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση που τέθηκε κατά τις μετρήσεις με PDA ήταν 10%.

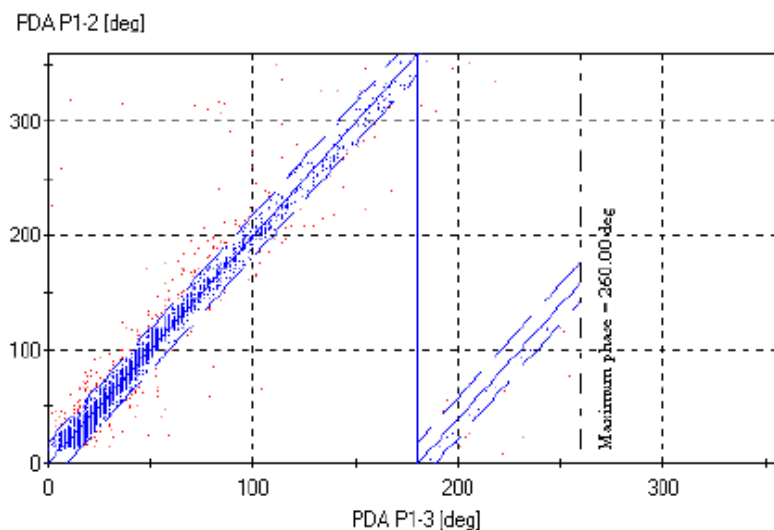
Επίσης αναφορικά με τις μετρήσεις φάσης, αυτές συνοδεύονται από ένα ποσοστό αβεβαιότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20. Αυτή η αβεβαιότητα σχετίζεται με τα όρια ανοχής ως προς τη θέση των διόδων ενώ ένα ποσοστό θορύβου επηρεάζει την ακρίβεια στη μέτρηση της σφαιρικότητας. Στην ιδανική περίπτωση για το άθροισμα των διαφορών φάσης πρέπει να ισχύει:

$$\Phi_{12} + \Phi_{13} + \Phi_{31} = 0 \quad (3.17)$$



Εικόνα 54: Επίδραση της αβεβαιότητας στην εκτίμηση της διαφοράς φάσης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

Λόγω όμως της αβεβαιότητας στις μετρήσεις φάσης το μετρούμενο παραπάνω άθροισμα θα αποκλίνει από το 0. Η απόλυτη τιμή της απόκλισης αποτελεί το σφάλμα φάσης (*phase error*) το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει συγκεκριμένη τιμή που δίνεται από το χρήστη ώστε το σωματίδιο να γίνεται αποδεκτό – θεωρούμενο ως σφαιρικό, κατά την μέτρηση. Αν η φάση δεν μπορεί να θεωρηθεί ακριβώς, μικρή σημασία έχει ο καθορισμός της σφαιρικότητας κάτω από μία συγκεκριμένη ακρίβεια. Το λογισμικό δημιουργεί ένα διδιάστατο πίνακα που σχετίζεται με τις δύο διαφορές φάσης  $\Phi_{12}$  και  $\Phi_{13}$  δίνοντας μια τιμή διαμέτρου εάν ικανοποιείται το κριτήριο αξιολόγησης σφαιρικότητας και αντιστοιχεί στις εντός των ευθειών περιοχές (Εικόνα 3.19).



Εικόνα 55: Διάγραμμα κριτηρίου αξιολόγησης σφαιρικότητας σωματιδίων (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics)



### 3.2.6 Πηγές Σφαλμάτων του PDA.

Η τεχνική PDA είναι καλά καθορισμένη και πλεονεκτεί ως προς άλλες τεχνικές καταγραφής ροικών φαινομένων, ως προς την μοναδική δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής ταχύτητας και μεγέθους σφαιρικών σωματιδίων, όπως επίσης και τη δυνατότητα εκτίμησης της συγκέντρωσης και της παροχής. Υπάρχουν πάντως κάποιες βασικές δυσκολίες κατά τη μέτρηση των μεγάλων σωματιδίων ειδικότερα στην περίπτωση που το σύστημα ρυθμίζεται ώστε να λαμβάνει σκεδαζόμενο φως από διάθλαση, όπως είναι σύνηθες κατά τη μελέτη των σπρέι.

Μεγάλα σωματίδια θεωρούνται εκείνα των οποίων η διάμετρος υπερβαίνει το 1/3 της διαμέτρου του όγκου ελέγχου. Σε αυτές τις περιπτώσεις εσφαλμένες μετρήσεις μεγέθους μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της ακρίβειας κατά την εκτίμηση της ογκομετρικής παροχής και της συγκέντρωσης αφού ο όγκος είναι ανάλογος της τρίτης δύναμης της διαμέτρου.

Δύο είναι οι παράγοντες που έχουν αναγνωρισθεί στη βιβλιογραφία ότι οδηγούν σε εσφαλμένες μετρήσεις μεγέθους των σταγονιδίων ειδικότερα: το σφάλμα τροχιάς (trajectory effect) και το σφάλμα σχισμής (slit effect). Οι δύο αυτές πηγές σφάλματος εμφανίζονται όταν το PDA τίθεται ώστε να λαμβάνει σκεδαζόμενο φως από διάθλαση αλλά αντίθετα λαμβάνει από ανάκλαση..

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των τριών φωτοδιόδων δεν θα καταστείλει τις παραπάνω πηγές σφαλμάτων, ενώ δεν είναι δυνατό να γίνει γενίκευση του μεγέθους του σφάλματος που θα επιφέρουν στη μέτρηση, ούτε η κατεύθυνση προς την οποία το σφάλμα αυτό θα μεταφέρει τη μέτρηση (δηλ. αν θα είναι θετικό ή αρνητικό υπερεκτιμώντας ή υποτιμώντας – υποβαθμίζοντας την τελική μέτρηση του μεγέθους των σωματιδίων).

#### A. Το σφάλμα Τροχιάς (Trajectory effect)

Το σφάλμα τροχιάς μπορεί να αποδοθεί στην όχι ομοιόμορφη κατανομή της έντασης (γκουουσιανή) στον μετρούμενο όγκο ελέγχου (Σχήμα 3.21). Ο όγκος μέτρησης ορίζεται από τα οπτικά συλλογής που είναι τοποθετημένα υπό γωνία ώστε να λαμβάνουν φως από διάθλαση 1<sup>ης</sup> τάξης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, υπάρχουν θέσεις σωματιδίων (τροχιές) μέσα στον όγκο μέτρησης όπου η ανάκλαση μπορεί να γίνει ο κύριος τρόπος σκέδασης λόγω της πολύ μεγαλύτερης έντασης της προσπίπουσας δέσμης φωτός, ειδικότερα στον αρνητικό Υ άξονα.

Τα σήματα από ανάκλαση εισάγονται και επεξεργάζονται σύμφωνα με τη σχέση φάσης – διαμέτρου που βασίζεται στη διάθλαση ως τρόπο σκέδασης και έτσι οδηγούν σε εσφαλμένες μετρήσεις μεγέθους. Το σφάλμα επίσης μεταφέρεται στον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής ή της παροχής μάζας αφού η διάμετρος εισάγεται στην τρίτη δύναμη.

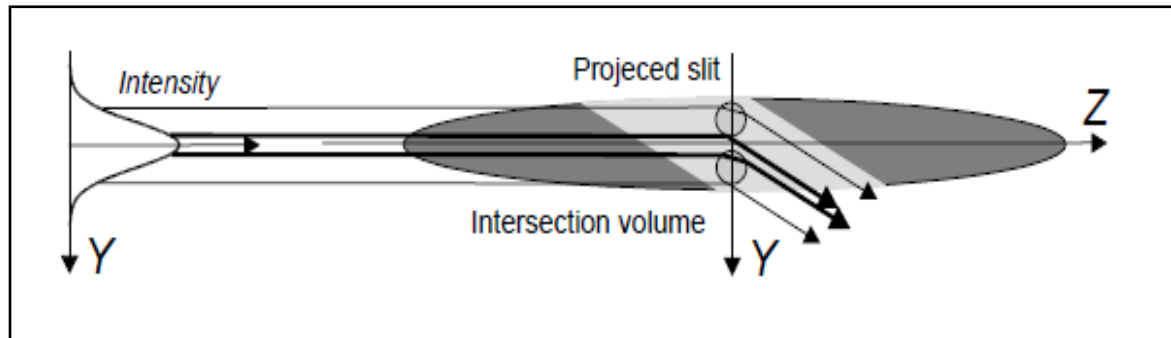
Το σφάλμα αυτό είναι δυνατό να επηρεάσει πολύ σημαντικά την ακρίβεια κατά τον υπολογισμό των παροχών ακόμα και αν το μέγεθος λίγων σταγόνων έχει μετρηθεί εσφαλμένα. Από αυτή την περιγραφή είναι φανερό ότι μόνο μεγάλες σταγόνες σε σχέση με τις διαστάσεις του πάχους της δέσμης μπορούν να επηρεαστούν.

Παρόλα αυτά σε πυκνά σπρέι είναι επιθυμητή η δραστική μείωση του όγκου ελέγχου για δύο λόγους, α) ώστε να αυξηθεί η ένταση φωτός και β) να μειωθεί η πιθανότητα ταυτόχρονης διέλευσης πολλών σταγόνων από τον όγκο ελέγχου. Έτσι το σφάλμα τροχιάς γίνεται μεγάλης σημασίας ειδικά αφού μόνο μεγάλες σταγόνες επηρεάζονται, οι οποίες επιδρούν ισχυρά στον καθορισμό της παροχής μάζας.



## Β. Το σφάλμα Σχισμής

Οι συνέπειες του σφάλματος σχισμής στον υπολογισμό της διαμέτρου από την μετρημένη διαφορά φάσης, είναι οι ίδιες όπως περιγράφηκαν στο σφάλμα τροχιάς αφού υποβαθμίζεται ο υποτιθέμενος τρόπος σκέδασης (διάθλαση).



Εικόνα 56: Η επίδραση της τροχιάς (trajectory effect) σε όρους γεωμετρικής οπτικής (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

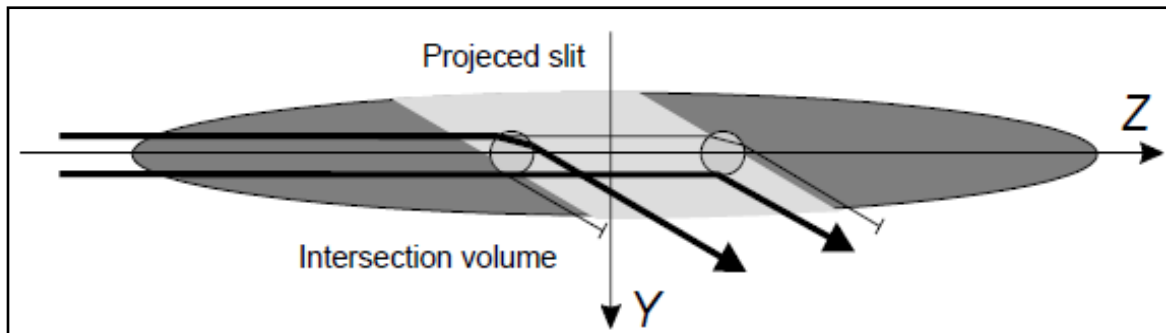
Σύμφωνα με το σφάλμα σχισμής, τέτοια σήματα θα οδηγούν σε εσφαλμένες μετρήσεις μεγέθους αφού σκεδαζόμενο φως από διάθλαση έχει υποτεθεί κατά την επιλογή του  $\beta_i$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι, το σφάλμα σχισμής εμφανίζεται ακόμα και στα μικρά σωματίδια. Αν π.χ τα μικρά σωματίδια εμφανιστούν ως μεγάλα, τότε το δυναμικό σφάλμα στην παροχή μάζας είναι τόσο μεγάλο ίσης βαρύτητας με εκείνο του σφάλματος τροχιάς.

Ένα καλά καθορισμένο επίπεδο - διατομή μέσα από το οποίο καταγράφονται σωματίδια απαιτείται στην περίπτωση μετρήσεων παροχής. Η διάσταση του μήκους του επιπέδου αυτού είναι καθορισμένο με την τοποθέτηση “ανοιγμάτων σχισμής” (slit apertures), μπροστά από τον φωτοανιχνευτή. Η προβολή αυτών των σχισμών στον όγκο ελέγχου δίνεται με μια πιο ανοικτή απόχρωση του γκριζου (Σχήμα 3.22). Για συγκεκριμένες θέσεις σωματιδίων (τροχιές – trajectories), μέσα στον όγκο μέτρησης, κάποιες συνιστώσες του σκεδαζόμενου φωτός είναι δυνατόν να υποβαθμίζονται, λόγω του ότι αυτές βρίσκονται εκτός του ανοίγματος σχισμής (slit aperture) Πιο συγκεκριμένα κάποιες θέσεις υποβιβάζουν το σκεδαζόμενο φως από διάθλαση, επιτρέποντας μόνο φως από ανάκλαση να ανιχνευθεί.

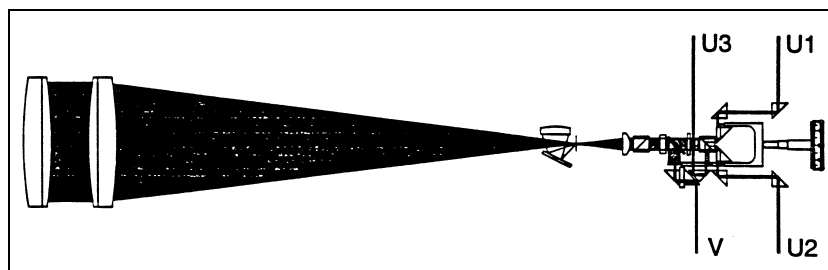
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Hardaloupas 1995) η επίδραση των παραπάνω πηγών σφάλματος ελαχιστοποιείται στην περίπτωση μελέτης αραιών σπρέι ή αερολυμμάτων, ενώ μεγιστοποιείται στις περιπτώσεις μελέτης πυκνών σπρέι.

### 3.2.7 Λειτουργία του Οπτικού Συλλογής PDA.

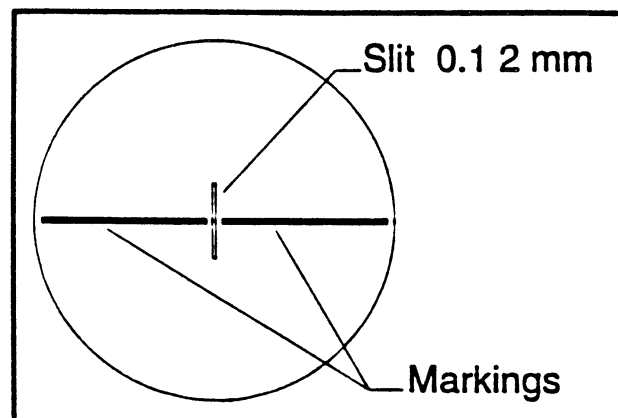
Αν και το όργανο έχει 3 διόδους σε 3 διαφορετικές αζιμούθιες γωνίες ( $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ ) το οπτικό μέρος λήψης είναι μία ολοκληρωμένη μονάδα, όπου η ευχέρεια καθορισμού των αζιμούθιων συνδυάζεται με την ευκολία ευθυγράμμισης ενός μόνο κοινού φακού. Οι οπτικές συνιστώσες του φακού συλλογής καθώς και ο οπτικός δρόμος από τον φακό προς τους φωτοπολλαπλασιαστές για το φως που σκεδάζεται από τον μετρούμενο όγκο φαίνονται στην Εικ.54.



Εικόνα 57:Υποβάθμιση του σκεδαζόμενου φωτός λόγω του ανοίγματος σχισμής (slit effect). (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).



Εικόνα 58:Φακός συλλογής και φωτοπολλαπλασιαστές.



Εικόνα 59:Εστίαση δέσμης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

Ο φακός λειτουργεί ως ένας τρόπος ευθυγράμμισης, λαμβάνοντας μία δέσμη παράλληλου φωτός που εστιάζεται, έτσι ώστε η εικόνα του όγκου ελέγχου να πέφτει στο χωρικό φίλτρο-σχισμή όπως φαίνεται στην Εικ 56. Το μέρος της εικόνας που πέφτει στη σχισμή αντιστοιχεί στον μετρούμενο όγκο. Μόνο το φως από τον μετρούμενο όγκο περνά προς τους φωτοπολλαπλασιαστές. Το φως περνώντας από τη σχισμή ευθυγραμμίζεται από φακό εστιακής σε μία δέσμη παράλληλου φωτός διαμέτρου 7.5 mm. Η δέσμη αυτή περνά από ένα πολωτικό φίλτρο αφήνοντας στο χρήστη να καθορίσει την πόλωση με ένα μικρομετρικό δείκτη.

### 3.2.8 Τρόποι Σκέδασης (Βελτίωση Συνθηκών Μέτρησης).

Η ανάλυση της οπτικής τεχνικής στηρίζεται σε βασικές αρχές γεωμετρικής οπτικής. Η γεωμετρική οπτική ισχύει για σωματίδια διαμέτρου πολύ μεγαλύτερα του μήκους



κύματος του σκεδαζόμενου φωτός και για αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες της διαμέτρου των σωματιδίων. Για σωματίδια μικρότερων διαστάσεων είναι αναγκαία η εφαρμογή της θεωρίας Lorents – Mie (LMT) για το σκεδαζόμενο φως του οποίου η κατανομή έντασης είναι γκαουσιανή. Αυτή είναι και η περίπτωση όπου το σφάλμα τροχιάς υπεισέρχεται.

Στην Εικ.57 φαίνονται οι γωνίες σκέδασης όπως προκύπτουν κατά την πρόσπτωση δύο αρχικά παραλλήλων ακτίνων φωτός καθώς έρχονται από τα αριστερά χτυπώντας σε ένα σφαιρικό σωματίδιο με αρχικές γωνίες  $\varphi_i$ ,  $\varphi_i + \Delta\varphi_i$ . Οι γωνίες  $\varphi_0$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  αντιστοιχούν σε ανακλώμενο, διαθλώμενο πρώτης και δεύτερης τάξης.

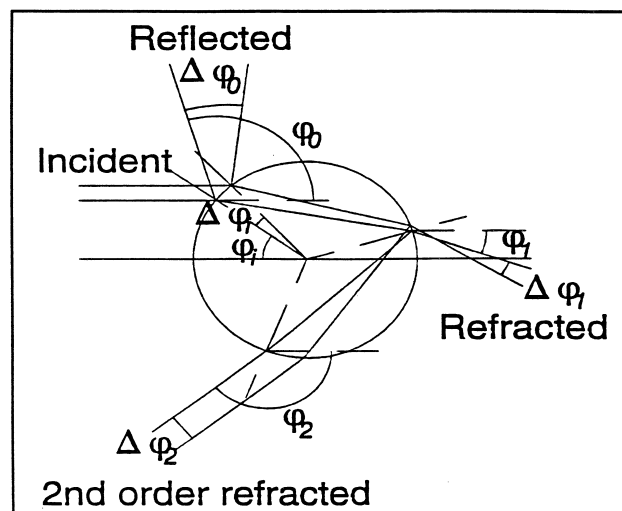
Αυτοί οι τρεις τρόποι σκέδασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον Δυναμικό Αναλυτή Σωματιδίων (PDA). Υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο που θα πρέπει όμως να συνυπολογιστεί. Το PDA αξιολογεί το μέγεθος σωματιδίων από τις διαφορές φάσης των σημάτων Doppler όπως αυτά λαμβάνονται από τις 3 φωτοδιόδους στο οπτικό συλλογή. Λόγω του ότι οι τρεις τρόποι σκέδασης δίνουν διαφορετικούς συντελεστές μετατροπής (συντελεστές φάσης), λαμβανόμενο φως με περισσότερους του ενός τρόπους σκέδασης εμπεριέχει τον κίνδυνο σφάλματος. Γενικά ένα σύστημα φάσης Doppler πρέπει να λειτουργεί έτσι ώστε η σχέση φάσης – διαμέτρου  $\Phi=f(D)$  να είναι γραμμική. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας τοπολογία με γωνία σκέδασης τέτοια ώστε να κυριαρχεί μόνο ένας τρόπος σκέδασης κατά την συλλογή του φωτός και επιπρόσθετα ο λόγος σήματος προς θόρυβο να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος.

Διαφορετικοί τρόποι σκέδασης κυριαρχούν από σκεδαζόμενο φως σε διαφορετικές γωνίες. Η θεώρηση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την επιλογή της γωνίας σκέδασης. Επίσης, η γωνιακή εξάρτηση για κάθε τρόπο σκέδασης διαφέρει ανάλογα με την πόλωση του σκεδαζόμενου φωτός, κάτι που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διάκριση ανάμεσα στους διαφορετικούς τρόπους. Οι γωνίες σκέδασης (από ανάκλαση, 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης διάθλαση) όπως περιγράφονται στο Σχήμα 3.26, μπορούν να εκφραστούν ως προς την γωνία προσβολής  $\varphi_i$ , και τον σχετικό δείκτη διάθλασης  $n_{rel}$  ως ακολούθως:

$$\text{➤ για ανάκλαση} \quad \varphi_0 = \pi - 2\varphi_i \quad (3.18)$$

$$\text{➤ για διάθλαση} \quad \varphi_1 = 2 \left[ \arcsin \left( \frac{\sin \varphi_i}{n_{rel}} - \varphi_i \right) \right] \quad (3.19)$$

$$\text{➤ για 2<sup>ης</sup> τάξης διάθλαση} \quad \varphi_2 = 4 \arcsin \left( \frac{\sin \varphi_i}{n_{rel}} \right) - 2\varphi_i - \pi \quad (3.20)$$



Εικόνα 60: Ορισμός Γωνιών σκέδασης (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).





### 3.2.9 Βελτιστοποίηση Συνθηκών Μέτρησης.

Το εύρος μέτρησης μεγέθους σωματιδίων συμπερασματικά καθορίζεται κυρίως από παράγοντες όπως α)τη γωνία σύμπτωσης των οπτικών μετάδοσης δηλ. των αρχικά διαχωρισμένων δεσμών λείζερ η οποία με τη σειρά της καθορίζεται από την απόσταση των δεσμών και την εστιακή απόσταση του φακού μεταφοράς, β)την εστιακή απόσταση των οπτικών συλλογής, γ)το πλάτος σχισμής (aperture plate), δ)την πόλωση του φωτός και ε)τη γωνία σκέδασης. Πιο αναλυτικά, η επιλογή της γωνίας σκέδασης επιτυγχάνεται σε συνδυασμό με την πόλωση και τις δυνατότητες της συνολικής οπτικής διάταξης σε σχέση με περιορισμούς ως προς τη ροή, με στόχο πάντα την ανίχνευση σήματος από έναν μόνο τρόπο σκέδασης.

Η δυνατότητα μέτρησης τροchioδεικτικών σωματιδίων εντός συνεχούς μέσου (συνηθέστερα νερού ή αέρα) ως προς τον τρόπο σκέδασης, την πόλωση και τη γωνία σκέδασης έχει προτυποποιηθεί και δίνεται στα λεγόμενα πολικά διαγράμματα, με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς το συνδυασμό είδους σωματιδίων και μέσου. Με αναφορά το πολικό διάγραμμα που αντιστοιχεί σε κάθε συνδυασμό επιλέγεται και η τοπολογία των οπτικών.

Γενικά, ένα πολικό διάγραμμα περιγράφει τη γωνιακή κατανομή της σχετικής έντασης του σκεδαζόμενου φωτός. Η κλίμακα είναι λογαριθμική (με 5 δεκάδες, κάθε δεκάδα δηλώνεται με κάθε διακεκομμένο ομόκεντρο κύκλο) για καθένα από τους 3 τρόπους σκέδασης για γωνίες σκέδασης στο εύρος  $(0 - 180)^\circ$  και για δύο είδη πόλωσης – το άνω ημικύκλιο σε  $90^\circ$  ως προς το επίπεδο σκέδασης (κατακόρυφη πόλωση) ενώ το κάτω ημικύκλιο σε παράλληλη πόλωση. Οι υπολογισμοί έχουν προκύψει από γεωμετρική οπτική και αναφέρονται σε σωματίδια διαμέτρου 50mm. Στο πολικό διάγραμμα (Σχήμα 3.26) φαίνονται τα ίχνη της δέσμης για ανάκλαση, πρώτης και δεύτερης τάξης διάθλαση που αντιστοιχούν στην περίπτωση της παρούσας μελέτης ψεκασμού δηλ. στη διάσπαση σταγονιδίων νερού εντός αρχικά ακίνητου ρεύματος αέρα.

Επίσης, φαίνεται η ολική ένταση του σκεδαζόμενου φωτός όπως υπολογίστηκε κατά την ανάλυση Lorentz-Mie. Όταν η καμπύλη Lorentz-Mie είναι πολύ κοντά σε έναν από τους τρόπους σκέδασης, αυτός ο τρόπος κυριαρχεί και αναμένεται «καλή» γραμμικότητα. Σχολιάζοντας τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος φαίνεται ότι και για τις 2 καταστάσεις πόλωσης, η διάθλαση πρώτης τάξης είναι κυρίαρχη για μικρές γωνίες σκέδασης όπου η ένταση φωτός είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την ανάκλαση. Η ερμηνεία των όρων που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθοι:

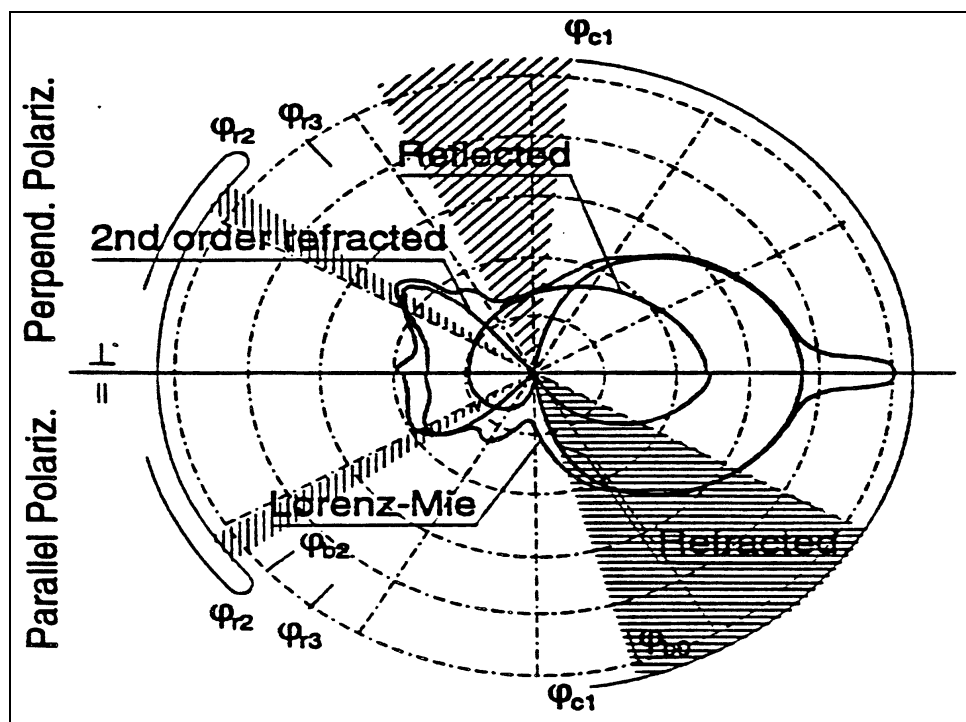
- $\varphi_{b0}$  → είναι η γωνία όπου ικανοποιείται η συνθήκη Brewster για εξωτερική ανάκλαση, δηλαδή η γωνία όπου το P (παράλληλα) πολωμένο ανακλώμενο φως εξαλείφεται,
- $\varphi_{b2}$  → είναι η γωνία όπου ικανοποιείται η συνθήκη Brewster για εσωτερική ανάκλαση δηλ. η γωνία όπου η ανάκλαση είναι 0 για παράλληλα πολωμένο φως, ως προς το επίπεδο σκέδασης.
- $\varphi_{c1}$  → η κρίσιμη γωνία διάθλασης, η μέγιστη γωνία σκέδασης για διάθλαση πρώτης τάξης,
- $\varphi_{c2}$  → η κρίσιμη γωνία για δεύτερης τάξης διάθλαση,
- $\varphi_{r2}$  → το τόξο γωνίας για δεύτερης τάξης διάθλαση,
- $\varphi_{r3}$  → το τόξο γωνίας για τρίτης τάξης διάθλασης,

Έτσι μία γωνία σκέδασης  $\varphi = 30^\circ$  (για σταγονίδια νερού) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πόλωση είτε κατακόρυφη είτε παράλληλη. Αύξηση της γωνίας σκέδασης πέρα από τις  $30^\circ$  έχει ως αποτέλεσμα προοδευτικά διαφορετική συμπεριφορά για τις δύο καταστάσεις πόλωσης. Η διάθλαση γίνεται λιγότερο κυρίαρχη για κατακόρυφη πόλωση σε αντίθεση με την παράλληλη. Λόγω του αποτελέσματος Brewster στην επιφάνεια του σωματιδίου, το ανακλώμενο φως εξαλείφεται σε γωνία σκέδασης  $\varphi_{b2} = 73.7^\circ$  (για ένα σταγονίδιο νερού).



Αυτή είναι μία πολύ καλή γωνία για μέτρηση του μεγέθους των σταγονιδίων νερού, θεωρώντας ότι και τα οπτικά συλλογής μπορούν να τοποθετηθούν ώστε το φως, να είναι παράλληλα πολωμένο. Πέρα από γωνία σκέδασης  $\varphi_{c1} = 82.9^\circ$  δεν υπάρχει πλέον διάθλαση πρώτης τάξης.

Έτσι, η ανάκλαση είναι ο μόνος τρόπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατακόρυφη πόλωση. Διάθλαση δεύτερης τάξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα τόξο πέρα από ένα τόξο γωνίας  $\varphi_r = 138.0^\circ$ . Γενικά αυτός ο τρόπος σκέδασης πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή αφού σε κομμάτι του εύρους δύο συνιστώσες σκέδασης συνεισφέρουν επιφέροντας μη γραμμικότητα στη σχέση μεγέθους-φάσης ενώ στο υπόλοιπο μέρος δεν υπάρχει σπουδαία διαφορά στην ένταση ανάμεσα σε διάθλαση δεύτερης τάξης και σε ανάκλαση.



Εικόνα 61: Πολικό διάγραμμα κατανομής έντασης σκεδαζόμενου φωτός σταγόνων νερού σε αέρα. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).

### 3.2.10 Εξάρτηση του γεωμετρικού παράγοντα $\beta$ από τον δείκτη διάθλασης

Όπως φάνηκε και νωρίτερα στις σχέσεις (4.14) και (4.15) αναφορικά με τη σκέδαση από διάθλαση, ο γεωμετρικός παράγοντας εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης  $n_{rel}$  επιπλέον των γωνιών  $\theta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\psi_i$ . Ο γεωμετρικός παράγοντας  $\beta$  εξαρτάται λιγότερο από τον  $n_{rel}$ , αυξανόμενη της γωνίας σκέδασης  $\varphi_i$ . (Εικόνα 3.26). Αυτό το γεγονός είναι πολύ σημαντικό σε περιπτώσεις όπου ο δείκτης διάθλασης των σωματιδίων δεν είναι γνωστός όπως συνήθως συμβαίνει κατά τον ψεκασμό εναλλακτικών καυσίμων ή βιοκαυσίμων. Πάντως υπάρχει ένα όριο ως προς τη μέγιστη γωνία σκέδασης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αφού φως σκεδαζόμενο από διάθλαση υπάρχει σε γωνίες μικρότερες της  $\varphi_{c1}$ . Επιπλέον στοχεύοντας σε μια γραμμική σχέση διαμέτρου – φάσης, περιοχές γωνιών του πολικού διαγράμματος όπου υπάρχει συνεισφορά έντασης φωτός από



περισσότερους του ενός τρόπου σκέδασης και μάλιστα ίδιας τάξης θα πρέπει να αποφεύγονται.

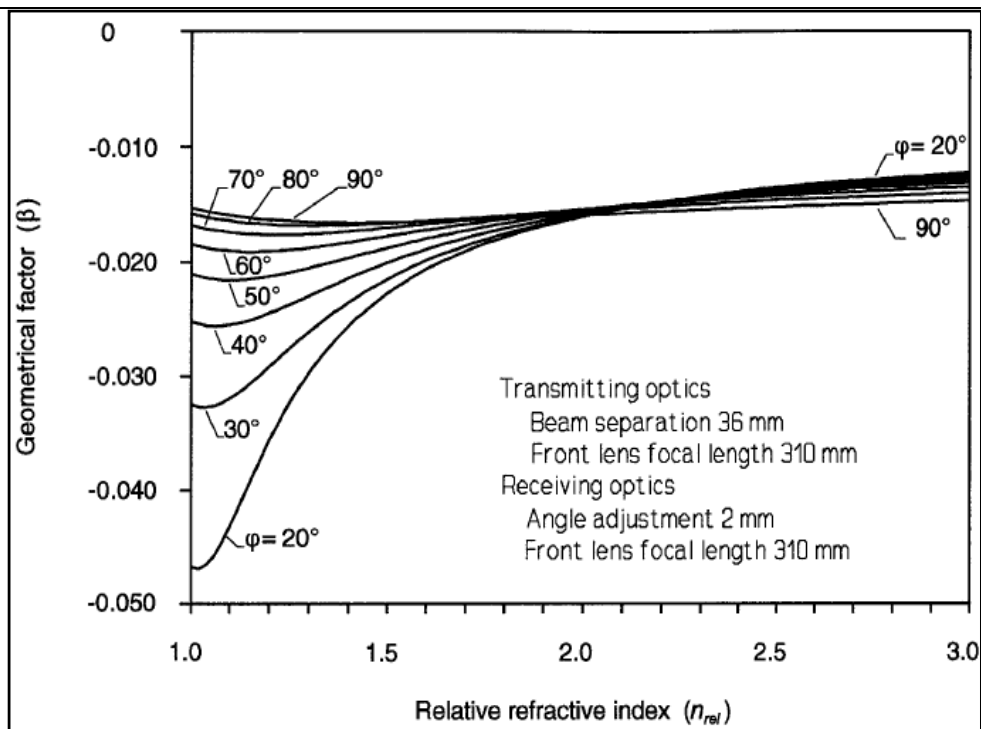
Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση σκέδασης από ανάκλαση δεν υπάρχει σχέση μεταξύ του γεωμετρικού παράγοντα και του δείκτη διάθλασης. Πάντως είτε για ανάκλαση είτε για διάθλαση, ο γεωμετρικός παράγοντας εξαρτάται από τη μεταβολή της γωνίας  $\varphi$ . Αυτή η εξάρτηση χρησιμοποιείται ως ένα επιπρόσθετο μέγεθος μεταβολής της ευαισθησίας και του εύρους μετρήσεων του μεγέθους στο PDA.

### 3.2.11 Μεταβολή της ευαισθησίας και του εύρους μεγεθών.

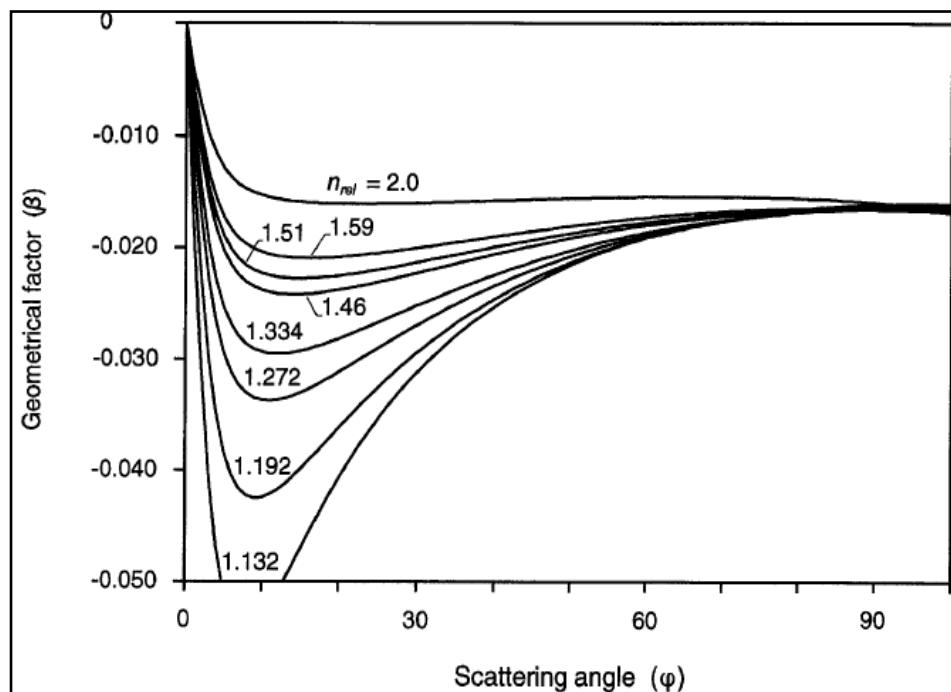
Ο γεωμετρικός παράγοντας  $\beta$  ως συνάρτηση του δείκτη διάθλασης  $n_{rel}$ , σε διάφορες γωνίες σκέδασης  $\varphi_i$  εξαρτάται ισχυρά από τον  $n_{rel}$  (Σχήμα 3.27) Ενώ σε υψηλούς  $n_{rel}$  (π.χ  $n_{rel} = 2$ ) οι μεταβολές του  $\beta$  είναι πολύ μικρές, για  $\varphi_i > 10^\circ$  η μεταβολή γίνεται σημαντική για τις χαμηλότερες τιμές του  $n_{rel}$ . Αντίστοιχα στο Σχήμα 3.28 φαίνεται ότι η εξάρτηση του  $\beta$  ως προς τον  $n_{rel}$  είναι πολύ ισχυρή στις μικρότερες γωνίες σκέδασης έως  $30^\circ$  παρά σε μεγαλύτερες γωνίες.

### 3.2.12 Συνθήκες Μέτρησης Οπτικής Διάταξης.

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις κρίσιμες παραμέτρους που καθορίζουν τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του οργάνου σε σχέση και με τις επιτρεπόμενες δυνατότητες που αφήνει η τοπολογία της πειραματικής διάταξης, καθορίστηκε ο τρόπος και η γωνία σκέδασης του οπτικού συλλογής. Ο τρόπος σκέδασης ήταν διάθλαση στις  $65^\circ$  με παράλληλη πόλωση του φωτός. Από το πολικό διάγραμμα (Σχήμα 3.26) φαίνεται ότι το όργανο μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε γωνίες  $25^\circ < \varphi < 75^\circ$  ανεξάρτητα της πόλωσης του φωτός. Η γωνία σκέδασης  $\varphi = 35^\circ$  είναι πολύ κοντά στη γωνία μέγιστης έντασης σκεδαζόμενου φωτός από διάθλαση ( $\varphi = 30^\circ$ ) ενώ η η καμπύλη Lorentz-Mie ακολουθεί - σχεδόν ταυτίζεται με τον τρόπο σκέδασης που επιλέχθηκε (διάθλαση), φανερώνοντας ότι αυτός ο τρόπος κυριαρχεί και έτσι αναμένεται «καλή» γραμμικότητα. Άλλωστε στη γωνία σκέδασης  $\varphi = 35^\circ$  φαίνεται επίσης από το πολικό διάγραμμα (ομόκεντροι κύκλοι κατανομής έντασης σκεδαζόμενου φωτός) ότι η ένταση του φωτός από διάθλαση είναι πάνω από δέκα φορές μεγαλύτερη της έντασης σκεδαζόμενου φωτός από ανάκλαση.



Εικόνα 62: Η επίδραση της σχέσης δείκτη διάθλασης - γωνίας σκέδασης στον γεωμετρικό παράγοντα. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics).



Εικόνα 63: Ο γεωμετρικός παράγοντας β ως συνάρτηση της γωνίας σκέδασης φ για διάφορους δείκτες διάθλασης. (BSA Flow 2.00 Users guide, Dantec Dynamics)



### 3.2.13 Αξιολόγηση μετρήσεων σωματιδίων

Τα τροχιοδεικτικά σωματίδια στην παρούσα εργασία είναι σταγονίδια νερού που μορφοποιούνται αρχικά ως δέσμη (jet spray) η συμπεριφορά των οποίων καταγράφεται με το PDA. Το μέγεθος των σωματιδίων παίζει σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία των μετρήσεων και σχετίζεται με τα σφάλματα του PDA (§3.3.6). Γενικά, σωματίδια μεγάλης διαμέτρου έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλής στάθμης σήματος, που βοηθά στον διαχωρισμό του από τον θόρυβο, όμως σε πολλές περιπτώσεις δεν δίνουν αξιόπιστες μετρήσεις (σφάλμα τροχιάς). Αντίθετα, σωματίδια μικρής σχετικά διαμέτρου έχουν γενικά καλύτερη συμπεριφορά στο να ακολουθήσουν πιστά τη ροή, όμως παράγουν χαμηλότερης στάθμης σήμα και, σε σχέση και με τη πορεία τους μέσα στον όγκο ελέγχου, μπορεί να οδηγήσουν τελικά στη μη καταγραφή της ταχύτητάς τους.

Στα πειράματα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν σταγονίδια νερού, τα οποία παράγονταν από έναν ιατρικό νεφελοποιητή. Η μέση διάμετρος τους ( $d_{mean}$ ) ήταν 4-5 $\mu\text{m}$ . Ο χρόνος απόκρισης των σωματιδίων ήταν κατά πολύ μικρότερος από την μικρότερη χρονική κλίμακα της ροής (Tropea et al., 2007).

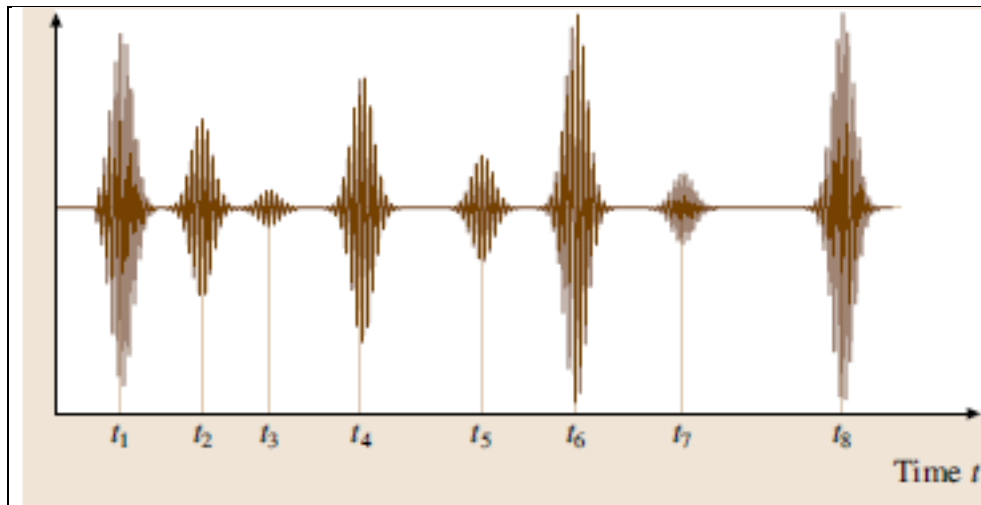
Ο συγκεκριμένος τύπος σωματιδίων αποτελεί καθιερωμένη λύση για μετρήσεις ταχύτητας σε ροές αερίων. Ωστόσο, ο συνδυασμός του μέσου με την φύση αλλά και τη συγκέντρωση των τροχιοδεικτικών σωματιδίων, επηρεάζουν σημαντικά την πυκνότητα και την ποιότητα του σήματος (data density), οπότε για κάθε σημείο πρέπει να επιβάλλονται ασφαλή κριτήρια για την καταγραφή της μέτρησης. Η επιλογή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση του σήματος αλλά και την εγκυρότητα του δείγματος αποτελεί ένα συνδυασμένο πρόβλημα, που διαφέρει όχι μόνο από πείραμα σε πείραμα αλλά και για τις διαφορετικές περιοχές της μέτρησης μέσα στην ίδια ροή. Ωστόσο, οι απαιτήσεις κάθε φορά είναι κοινές και σχετίζονται με την ρύθμιση των ορίων (filters), της ενίσχυσης (gain), την επιβολή κριτηρίων για τα «επιτυχημένα» δείγματα με βάση ένα όριο (threshold) και κάποιο ελάχιστο αριθμό κροσσών συμβολής, και την εξασφάλιση μιας ικανοποιητικής ταχύτητας δειγματοληψίας.

Το χαρακτηριστικό σήμα που ανιχνεύεται από τη διαδρομή ενός σωματιδίου μέσα στον όγκο ελέγχου παρουσιάζεται στην εικόνα 3.28. Ωστόσο, λόγω της ύπαρξης του θορύβου, στις περισσότερες περιπτώσεις η εικόνα του σήματος σε πραγματικό χρόνο διαφέρει σημαντικά ως προς την καθαρότητά του..

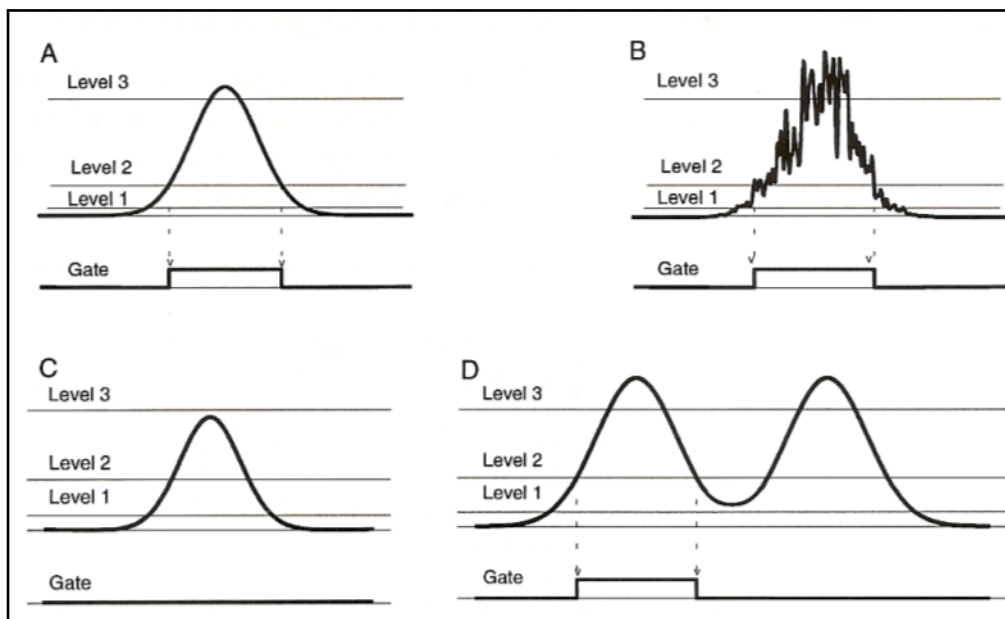
Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα σύστημα αξιολόγησης των δειγμάτων, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά επίπεδα έντασης του σήματος για την ανίχνευση των σωματιδίων (PDA Installation and User's Guide, 1994). Με βάση το σύστημα αυτό, η περίοδος της καταγραφής ξεκινά από τη στιγμή που το σήμα ξεπερνά το δεύτερο επίπεδο και σταματά όταν το σήμα πέφτει κάτω από αυτό, καταλήγοντας έτσι σε ένα συμμετρικό όγκο ελέγχου για κάθε σωματίδιο (Σχήμα 3.29A). Οι ταλαντώσεις του σήματος γύρω από το δεύτερο επίπεδο δεν επηρεάζουν τη μέτρηση, καθώς αυτή ξεκινά, τελειώνει και επιβεβαιώνεται με βάση τα άλλα δύο επίπεδα (Σχήμα 3.29B). Κανένα σωματίδιο δεν καταγράφεται αν το εύρος της έντασης του σήματος δεν ξεπεράσει το τρίτο επίπεδο ενώ η επόμενη μέτρηση μπορεί να ξεκινήσει μόνο όταν το σήμα έχει πέσει κάτω από το πρώτο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται ότι η μέτρηση αφορά σε ένα μοναδικό σωματίδιο (Σχήμα 3.30C, 3.30D).

Το σήμα περιέχει «θόρυβο», ο οποίος μπορεί να προέρχεται τόσο από το οπτικό σύστημα όσο και από τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος. Το οπτικό σύστημα δημιουργεί θόρυβο μέσω τυχαίων διακυμάνσεων των ακτίνων ή ακόμα μέσω ταλαντώσεων στις οποίες υπόκειται (random noise).





Εικόνα 64:Τυπικά σήματα κροσσών –bursts (Tropea 2007).



Εικόνα 65:Ανίχνευση και έλεγχος σωματιδίου με χρήση τριών επιπέδων.

Ο ηλεκτρονικός θόρυβος σχετίζεται με την λειτουργία των φωτοπολλαπλασιαστών (shot, thermal noise). Επιπλέον θόρυβος μπορεί να προέλθει από μη καλά γειωμένα ηλεκτρονικά στοιχεία της εγκατάστασης (ground noise). Ακόμα, ανεπιθύμητη διάχυση, που μπορεί να προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο τοποθετούνται τα οπτικά συλλογής και μετάδοσης σε

συνδυασμό με τα σωματίδια που δεν συνεισφέρουν σε μέτρηση, μπορεί να επιδράσει ως θόρυβος. Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για την εκτίμηση του θορύβου που υπάρχει μέσα στο σήμα είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio), ο οποίος μπορεί να δοθεί από την παρακάτω έκφραση, όπου  $\sigma_s^2$  η διακύμανση του σήματος και  $\sigma_n^2$  η διακύμανση του θορύβου.

$$\frac{SNR}{db} = +10 \log \left( \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (3.21)$$



Έτσι, «παγώνοντας» το σήμα ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε κάθε σημείο μέτρησης, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του συγκεκριμένου μεγέθους. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η παράμετρος αυτή έχει καθοριστική σημασία στον καθορισμό του ποσοστού των επιτυχημένων δειγμάτων. Ο καθορισμός του SNR γίνεται στο λογισμικό του PDA και αποτελεί το πρώτο κριτήριο για τον έλεγχο των επιτυχημένων δειγμάτων (Signal level validation). Τα άλλα δύο κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να καταγραφεί ένα σωματίδιο ως επιτυχημένο δείγμα, είναι το σφάλμα φάσης και το σφάλμα σφαιρικότητας τα οποία επίσης τέθηκαν στο λογισμικό του PDA σε  $10^\circ$  και 10% αντίστοιχα.

Τέλος με τη χρήση φίλτρων (άνω και κάτω) απορρίπτονται από τον επεξεργαστή συχνότητες που αντιστοιχούν σε εξωγενείς παράγοντες (θόρυβος), προσπαθώντας να διατηρούνται μόνο εκείνες που αντιστοιχούν στην κίνηση σωματιδίων. Η εφαρμογή των φίλτρων συνεισφέρει στη λήψη ενός «καθαρού» σήματος, που συνεπάγεται και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Ωστόσο, η χρήση των φίλτρων μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να οδηγήσει σε σφάλματα μέσω του αποκλεισμού μετρήσεων - τιμών, οι οποίες στην πραγματικότητα πρέπει να συνεισφέρουν στον υπολογισμό των στατιστικών μεγεθών.

### 3.2.14 Εκφράσεις μεγέθους των σταγονιδίων

Ο χαρακτηρισμός του πεδίου των σταγονιδίων συμπληρώνεται με τη μελέτη του μεγέθους τους κατά τον σχηματισμό των σπρέι. Ένα σπρέι γενικά θεωρείται ότι είναι ένα σύστημα το οποίο απαρτίζεται από πλήθος σταγονιδίων τα οποία εισέρχονται σε ένα αεριώδες συνεχές μέσο. Συνήθως τα ακροφύσια ψεκασμού δεν παράγουν ομοιόμορφα μεγέθη σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας. Αντίθετα το παραγόμενο σπρέι μπορεί να ειδωθεί ως ένα φάσμα μεγεθών κατανομημένων γύρω από μια μέση τιμή. Αρκετές εμπειρικές σχέσεις έχουν προταθεί για τον χαρακτηρισμό των κατανομών μεγεθών σταγονιδίων σε ένα σπρέι ανάλογα με την εφαρμογή και τις διαδικασίες που υπεισέρχονται κατά αυτήν (Lefebvre 1989).

Ειδικότερα η αντιμετώπιση προβλημάτων μεταφοράς μάζας σε ροικά φαινόμενα είναι πιο δόκιμη με αναφορά σε όρους μέσων διαμέτρων αντί της όλης κατανομής μεγεθών σταγονιδίων. Η έννοια της μέσης διαμέτρου έχει γενικευτεί και η σημειογραφία της έχει τυποποιηθεί από τους Mugele και Evans (Lefebvre 1989). Η γενική μορφή των μέσων διαμέτρων ορίζεται ως ακολούθως

$$(D_{ab})^{a-b} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^a (dN / dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^b (dN / dD) dD} \quad (3.27)$$

όπου οι δείκτες  $a$ ,  $b$  μπορούν να λαμβάνουν οποιοσδήποτε τιμές αντίστοιχες με τον προς διερεύνηση μηχανισμό, ενώ το άθροισμα ( $a + b$ ) αναφέρεται ως τάξη της μέσης διαμέτρου. Η τελευταία εξίσωση μπορεί να αναδιατυπωθεί ως

$$D_{ab} = \left[ \frac{\sum N_i D_i^a}{\sum N_i D_i^b} \right]^{1/(a-b)} \quad (3.28)$$

όπου ο δείκτης  $i$  υποδηλώνει το εύρος των θεωρούμενων μεγεθών,  $N_i$  είναι το πλήθος των σταγονιδίων στο συγκεκριμένο εύρος μεγεθών  $i$  και  $D$  είναι η μέση διάμετρος τους εύρους  $i$ .

Έτσι για παράδειγμα η λεγόμενη αριθμητική μέση διάμετρος  $D_{10}$  είναι η μέση τιμή όλων των σταγόνων ενός σπρέι όπως προκύπτει ως μέσος όρος για παράδειγμα από τη



χρονοσειρά του σήματος των διαμέτρων. Αντίστοιχα η μέση διάμετρος  $D_{20}$  είναι η διάμετρος μιας σταγόνας της οποίας η επιφάνεια πολλαπλασιαζόμενη με το πλήθος των σταγόνων θα ισούται με την όλη επιφάνεια του σπρέι. Κατά όμοιο τρόπο ορίζεται και η μέση διάμετρος  $D_{30}$  ως η διάμετρος μιας σταγόνας της οποίας ο όγκος πολλαπλασιαζόμενος με το πλήθος των σταγόνων θα ισούται με όλο τον όγκο του σπρέι. Τέλος μια πιο ολοκληρωτική μορφή μέσης διαμέτρου είναι η μέση διάμετρος Sauter (SMD – Sauter Mean Diameter) που συμβολίζεται ως  $D_{32}$  και αναπαριστά τη διάμετρο μιας σταγόνας της οποίας το πηλίκο του όγκου προς την επιφάνεια είναι το ίδιο με εκείνο όλου του σπρέι.

Η χαρακτηριστική διάμετρος SMD έχει προταθεί από τον Lefebvre ως η καταλληλότερη για την περιγραφή του μηχανισμού της μεταφοράς μάζας και ενέργειας μεταξύ σταγόνων και αερίου μέσου καθώς και ειδικότερα για την περιγραφή των μηχανισμών ύφανσης.

Συνοπτικά οι μαθηματικές σχέσεις – ορισμοί των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών μέσων διαμέτρων είναι οι ακόλουθες:

$$\text{Μέση Αριθμητική} \quad D_{10} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D (dN / dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN / dD) dD} \quad (3.29)$$

$$\text{Μέση Επιφανειακή} \quad D_{20} = \left[ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^2 (dN / dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN / dD) dD} \right]^{1/2} \quad (3.30)$$

$$\text{Μέση Ογκομετρική} \quad D_{30} = \left[ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 (dN / dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN / dD) dD} \right]^{1/3} \quad (3.31)$$

$$\text{Μέση Sauter} \quad D_{32} = \left[ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 (dN / dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^2 (dN / dD) dD} \right]^{3/2} \quad (3.32)$$

Η θεώρηση της μέσης διαμέτρου έχει διευρυνθεί και έχει τυποποιηθεί σε σχέση με τις ειδικές εφαρμογές και τους διαφορετικούς μηχανισμούς της διάσπασης – αποσύνθεσης (disintegration) μια δέσμης ή ενός σπρέι σταγονιδίων. Στον Πίνακα 3.3 καταγράφονται οι σημαντικότεροι τύποι μέσων διαμέτρων καθώς και τα πεδία εφαρμογής αυτών.



**Πίνακας 3.3 Μέσοι Διάμετροι και Εφαρμογές**

α	b	α+b (τάξη)	Σύμβολο	Μαθηματική Έκφραση	Πεδίο Εφαρμογής
1	0	1	$D_{10}$	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$	Σύγκριση
2	0	2	$D_{20}$	$\left(\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i}\right)^{1/2}$	Έλεγχος Επιφάνειας
3	0	3	$D_{30}$	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i}\right)^{1/3}$	Έλεγχος Όγκου (π.χ Υδρολογία)
2	1	3	$D_{21}$	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}$	Απορρόφηση
3	1	4	$D_{31}$	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i}\right)^{1/2}$	Εξάτμιση Μοριακή Διάχυση
3	2	5	$D_{32}$	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$	Μεταφορά Μάζας Αντίδραση
4	3	7	$D_{43}$	$\frac{\sum N_i D_i^4}{\sum N_i D_i^3}$	Ισοζύγιο Καύσης



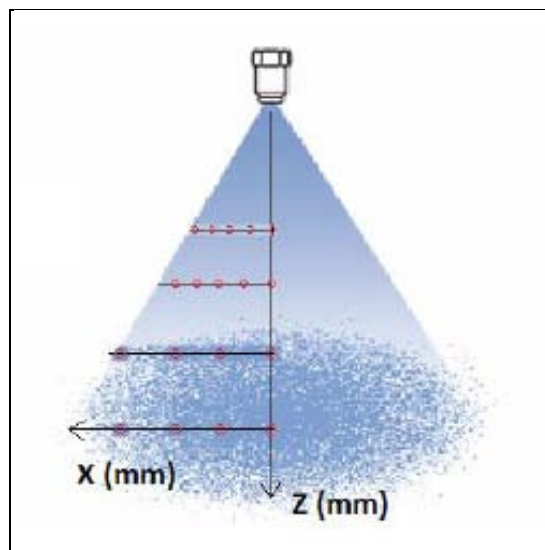






## 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά τη διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων ως υγρό ψεκασμού χρησιμοποιήθηκε πετρέλαιο κίνησης. Σκοπός ήταν η καταγραφή της συμπεριφοράς των χαρακτηριστικών μεγεθών του παραγόμενου σπρέι δηλαδή της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας και του μεγέθους των σταγονιδίων. Πραγματοποιήθηκαν σημειακές μετρήσεις στην αξονική διεύθυνση κατάντι του άξονα εκροής καθώς και στην εγκάρσια διεύθυνση εντός του κώνου που δημιουργεί ο ψεκασμός από το ακροφύσιο (Εικ.34). Κατακόρυφα το εύρος των μετρήσεων που καλύφθηκε ήταν από 55mm έως και 200mm από την έξοδο του ακροφυσίου. Οι πιέσεις ψεκασμού τέθηκαν στα 5, 10, 15 και 18 bar.



Εικόνα 66:Σημεία Μετρήσεων.

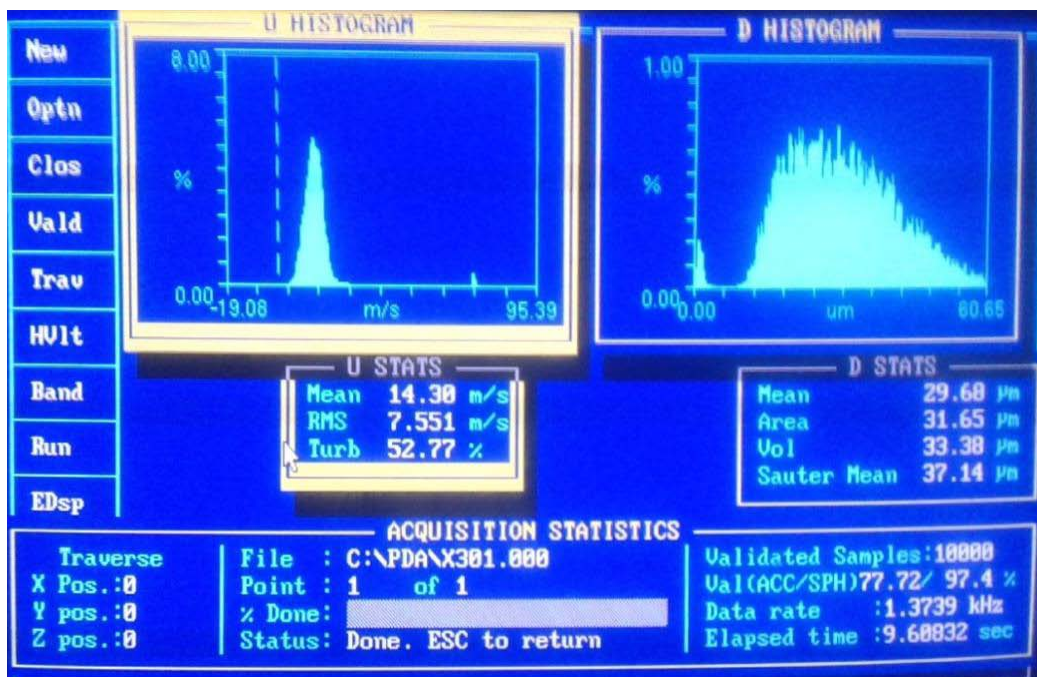
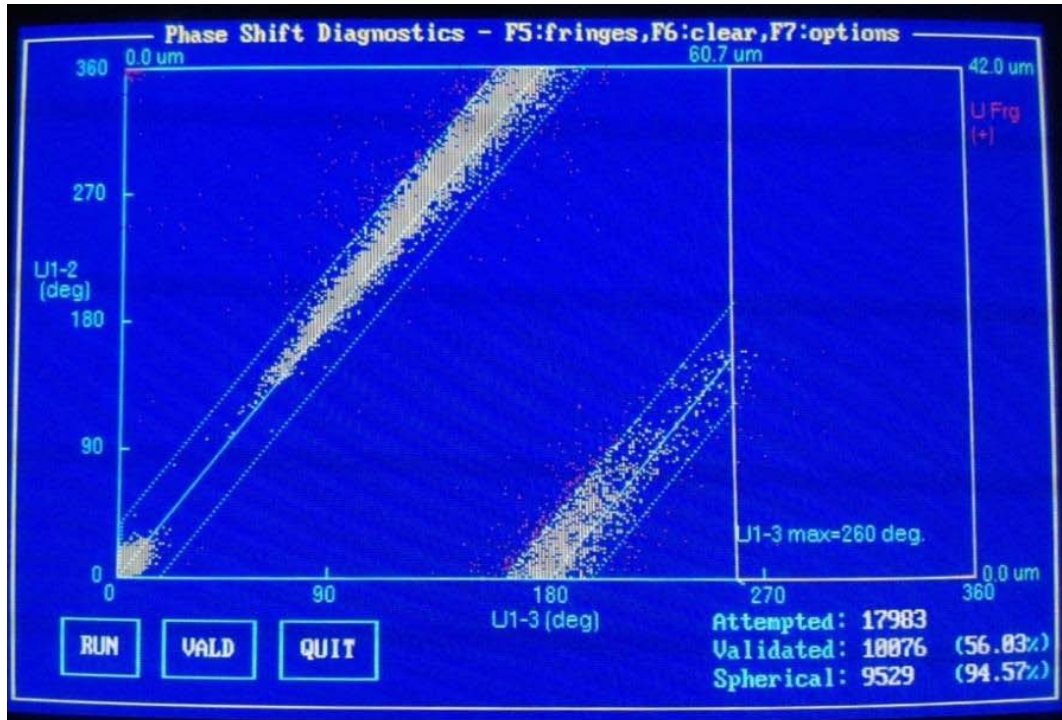


Εικόνα 67:Εικόνα οπτικού σήματος (Doppler burst - κροσσοί συμβολής) στον παλμογράφο.



Υπενθυμίζεται ότι μετρήσεις καταγράφονται μόνο όταν το σήμα ικανοποιεί τα κριτήρια αξιολόγησης του συνοδευτικού λογισμικού (PDA) δηλ. όταν ξεπερνά τη στάθμη του θορύβου και η σφαιρικότητα των σταγονιδίων έχει απόκλιση μέγιστο 10%. Επίσης το σήμα ελέγχεται στον παλμογράφο (Εικ.35). Ζητούμενο είναι πάντα μια εικόνα καθαρού όσο το δυνατόν σήματος που λαμβάνει το οπτικό συλλογής.

Τα δεδομένα των μετρήσεων καταγράφονται μέσω κάρτας δειγματοληψίας και η επεξεργασία γίνεται μέσω ΗΥ.

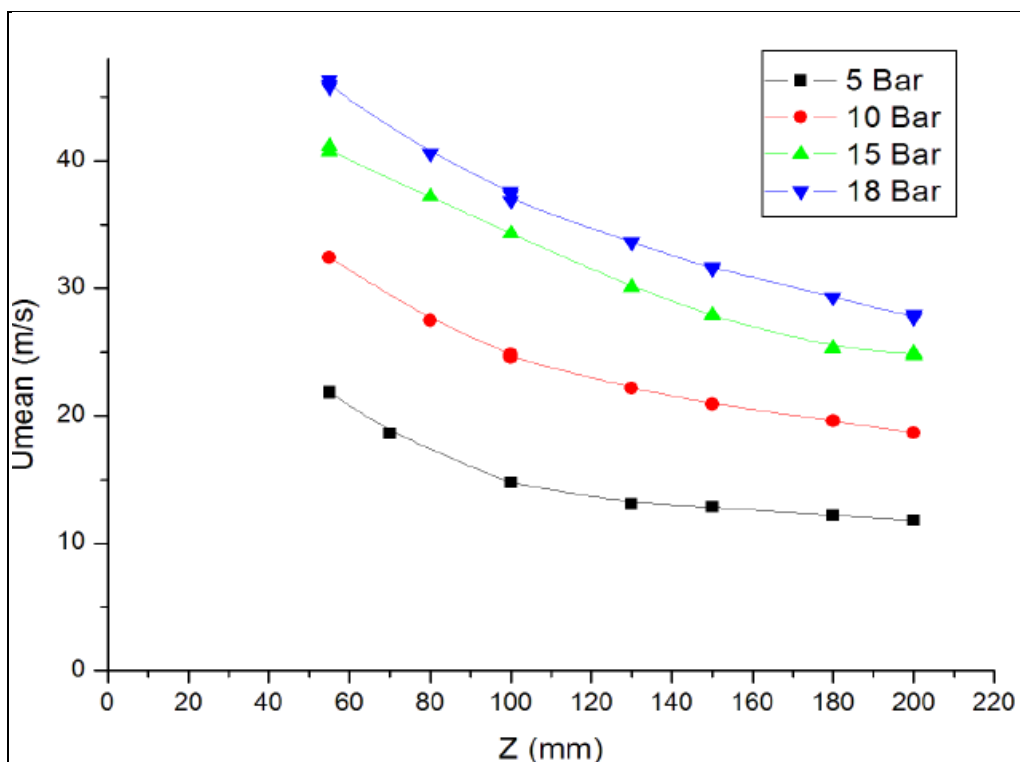




#### 4.1 Αξονική Εξέλιξη.

Η κοντινότερη απόσταση στην οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ήταν σε 55mm από την έξοδο του ακροφυσίου. Αυτό γίνεται για την ασφάλεια των πολλαπλασιαστών του οπτικού συστήματος. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι όπως λέει και το όνομά τους δίοδοι οι οποίες ενισχύουν το σήμα που λαμβάνουν. Επομένως όσο πιο κοντά στην έξοδο του ακροφυσίου τίθεται ο όγκος ελέγχου τόσο υψηλότερη ένταση φωτός λαμβάνει το οπτικό σύστημα PDA με κίνδυνο την καταστροφή των πολλαπλασιαστών ακόμα και αν είναι ρυθμισμένοι σε χαμηλή ενίσχυση του οπτικού σήματος. Αυτή η σκέψη αποτέλεσε οδηγό και για τις μετρήσεις που επακολούθησαν. Έτσι λόγω μεγάλης συγκέντρωσης σταγονιδίων κοντά στο ακροφύσιο (λόγω της υψηλής πίεσης που συνεπάγεται και μεγαλύτερη παροχή) επιλέχθηκε η χαμηλότερη δυνατή ενίσχυση σήματος στην κοντινότερη κατακόρυφη θέση μέτρησης (55cm), ενώ αυξανόμενη της διαμήκουσ απόστασης κατάντι του ακροφυσίου η ενίσχυση του σήματος αυξανόταν προοδευτικά.

Η ανάλυση αρχικά έγινε για την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος του άξονα εκροής (Z-άξονας). Στη συνέχεια αναλύεται η αξονική εξέλιξη της μέσης τιμής της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας καθώς και του μεγέθους των σταγονιδίων μέσω των διαμέτρων τους.



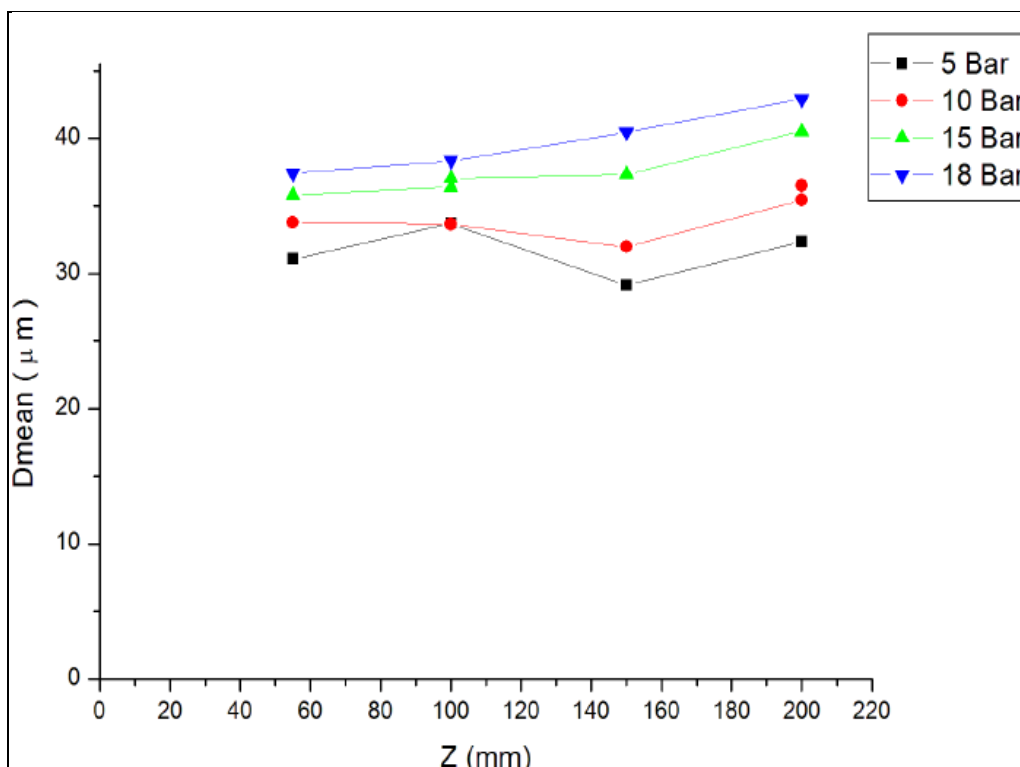
Εικόνα 68: Κατανομή της μέσης τιμής κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας κατάντι της ροής.

Από τις κατανομές μέσων ταχυτήτων παρατηρείται ότι σε μεγαλύτερες διαμήκεισ αποστάσεις από το ακροφύσιο οι ταχύτητες των σταγονιδίων μειώνονται. Αυτό συμβαίνει λόγω διάτμησης κατά την αλληλεπίδραση του καυσίμου με τον αέρα που γενικά κινείται εντός του θαλάμου με χαμηλότερες ταχύτητες στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης μέρος της ενέργειας των σταγονιδίων κατά την έγχυση στο θάλαμο δαπανάται για την διάσπαση της δέσμης ροής επομένως για τον διασκορπισμό και την εξάπλωση του ψεκασμού.



Πιο αναλυτικά σε όλες τις πιέσεις ψεκασμού (5 – 18bar) παρατηρείται ελάττωση του ρυθμού μείωσης της ταχύτητας αυξανόμενης της απόστασης από το ακροφύσιο. Επίσης όπως αναμένεται αυξανόμενης της εφαρμοζόμενης πίεσης αυξάνονται και οι μέγιστες ταχύτητες. Για παράδειγμα για πίεση 5bar μέγιστη τιμή μέσης ταχύτητας είναι τα 21.8 m/s ενώ για πίεση 18bar η μέγιστη τιμή μέσης ταχύτητας έχει φτάσει στα 45.9 m/s. Τέλος ακόμα και στη μεγαλύτερη απόσταση από το ακροφύσιο ( $z=200\text{mm}$ ) φαίνεται ότι οι κατανομές εξακολουθούν να εξελίσσονται διατεταγμένα με τις μεγαλύτερες ταχύτητες να διατηρούνται για τον ψεκασμό στην υψηλότερη μετρούμενη πίεση των 18bar, κάτι που δείχνει ότι η ροή διατηρεί την ιστορία της.

Ειδικότερα από τις κατανομές προκύπτει ότι για πίεση ψεκασμού 5bar και σε διαμήκη απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου  $z=50\text{mm}$  καταγράφηκε ταχύτητα 21.8m/s ενώ σε απόσταση  $z=200\text{mm}$  η ταχύτητα μειώθηκε στα 11.8m/s. Αντίστοιχα για την υψηλότερη πίεση ψεκασμού 18bar στις αντίστοιχες θέσεις καταγράφηκαν ταχύτητες 45.9m/s και 27.7m/s.



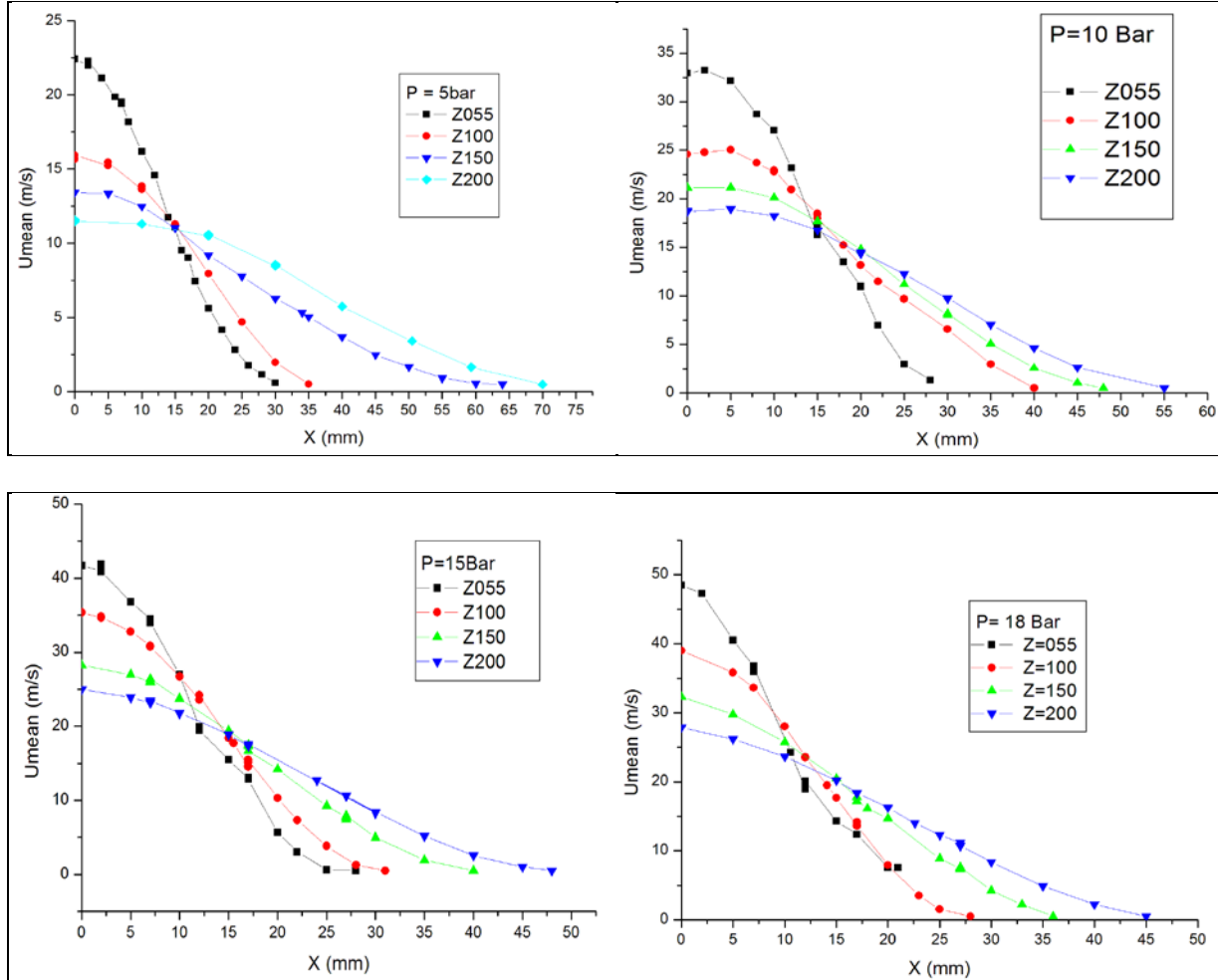
**Εικόνα 69:Κατανομή της μέσης διαμέτρου των σταγονιδίων.**

Παρατηρώντας τις κατανομές των διαμέτρων των σταγονιδίων φαίνεται μια αυξητική τάση της μέσης διαμέτρου στις υψηλότερες πιέσεις των 15 και 18bar. Αντίθετα για τις χαμηλότερες εφαρμοζόμενες πιέσεις των 5, 10 bar παρά κάποιες μικρές διακυμάνσεις οι τιμές των διαμέτρων κινούνται γύρω μια σταθερή περίπου μέση τιμή. Για την αύξηση της μέσης διαμέτρου σημαντικό ρόλο παίζει η ανακυκλοφορία ροής αέρα μέσα στο θάλαμο δοκιμών. Αυτό είναι σύνηθες φαινόμενο λόγω του περιορισμένου χώρου ανάπτυξης της δέσμης εντός του θαλάμου και προφανώς η συμπεριφορά διαφέρει από την κατάσταση της ελεύθερης δέσμης. Η τάξη μεγέθους της διαφοροποίησης των διαμέτρων είναι αρκετά μικρή αφού στις ακραίες τιμές κυμαίνεται περίπου στα 4μm.





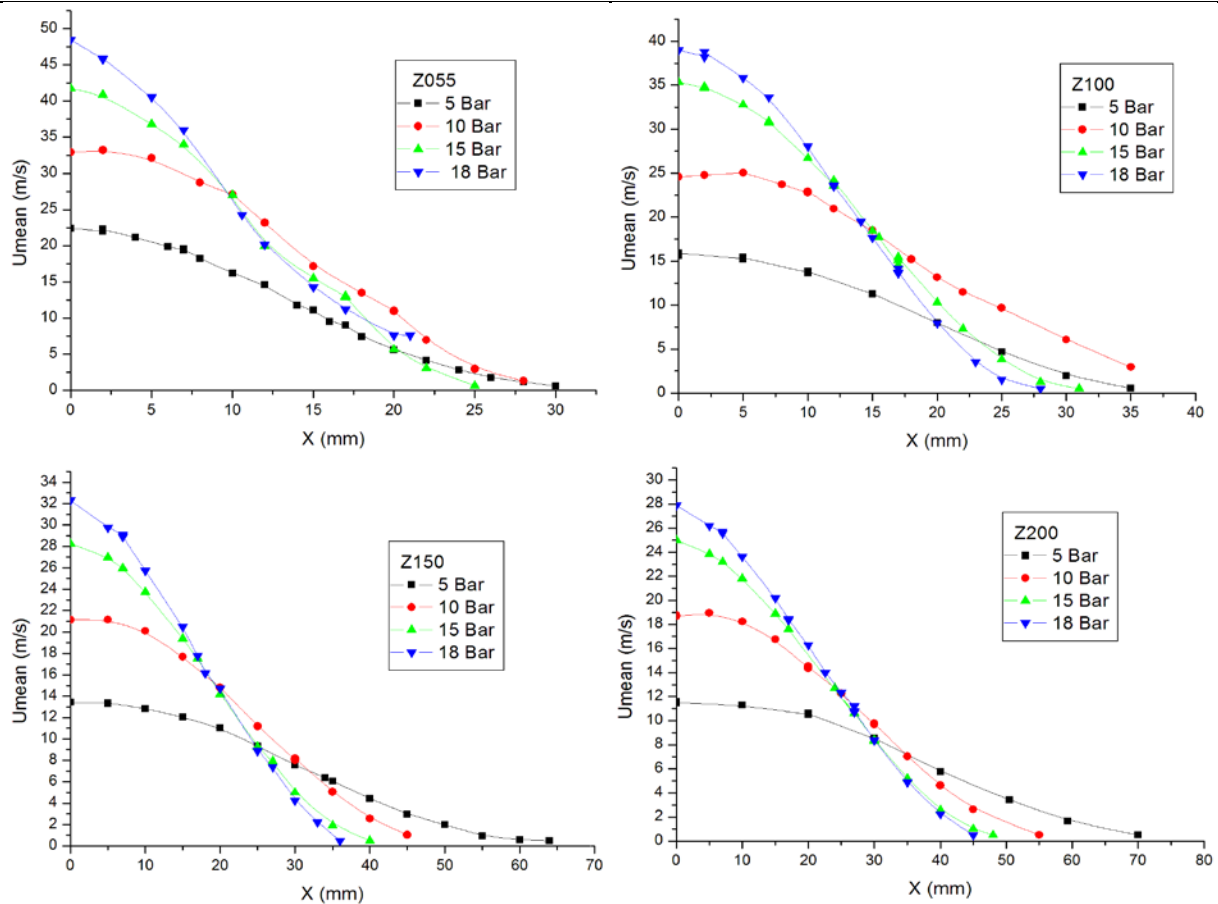
## 4.2 Εγκάρσια Εξέλιξη.



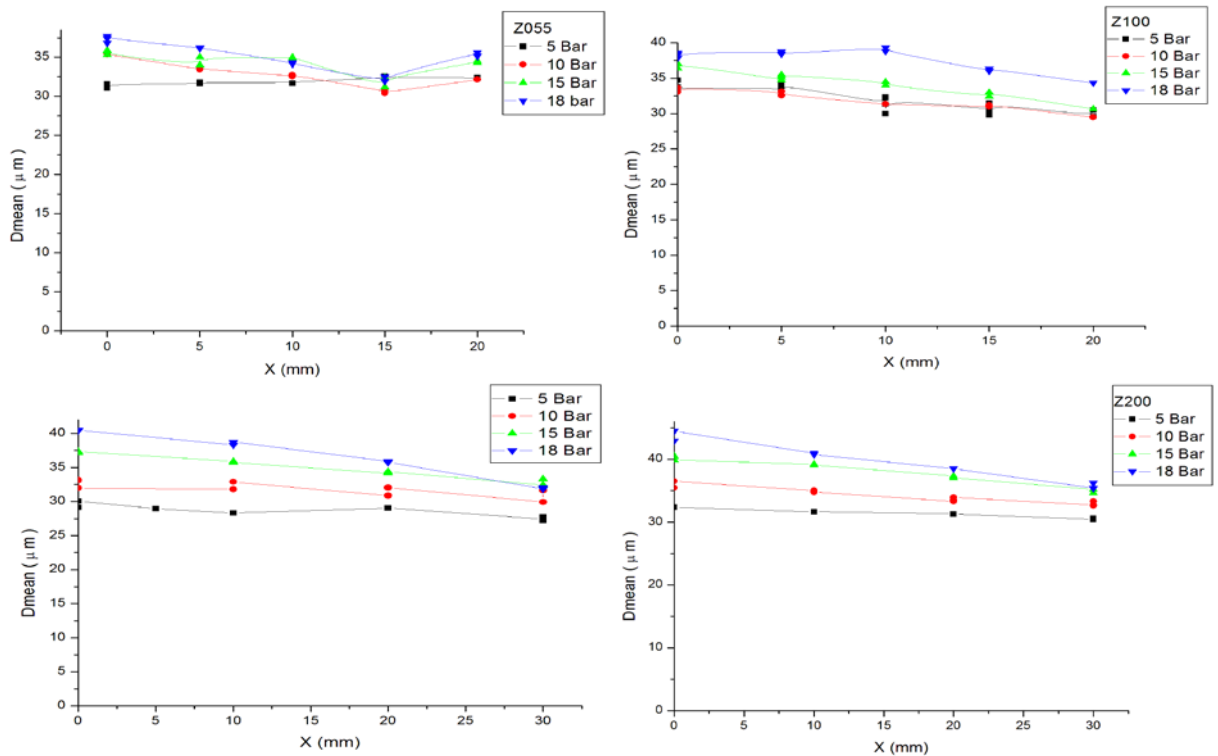
**Εικόνα 70:Εγκάρσιες Κατανομές μέσων κατακόρυφων συνιστωσών της ταχύτητας ως προς την πίεση ψεκασμού.**

Από τις εγκάρσιες κατανομές όπως αυτές παρουσιάζονται στην Εικ.70 παρατηρείται ότι στις περιοχές κοντά στον άξονα εκροής οι ταχύτητες λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές ενώ αυξανόμενης της κατακόρυφης απόστασης υπάρχει τάση εξομάλυνσης με τις μέγιστες τιμές της ταχύτητας να μειώνονται παράλληλα με την εξάπλωση της κατανομής σε μεγαλύτερες εγκάρσιες αποστάσεις. Οι κατανομές αποδίδονται για την ίδια πίεση ψεκασμού και αυξανόμενη απόσταση από το ακροφύσιο.

Στην Εικ.71 οι ίδιες κατανομές ταχύτητας τοποθετούνται ως προς την διαμήκη κατακόρυφη απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου. Παρατηρείται όπως και αναμένεται ότι αυξανόμενης της πίεσης κοντά στον άξονα εκροής τα σταγονίδια διατηρούν τις μεγαλύτερες ταχύτητες. Επίσης αυξανόμενης της κατακόρυφης απόστασης οι ταχύτητες στην περιοχή του άξονα εκροής μειώνονται. Για παράδειγμα οι κατανομές που αναφέρονται σε πίεση ψεκασμού 18bar μειώνονται από περίπου 48m/s σε  $z=50\text{mm}$ , σε περίπου 28m/s σε  $z=200\text{mm}$ .

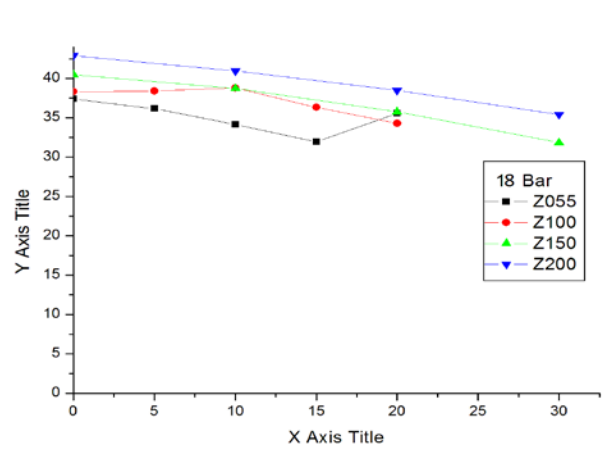
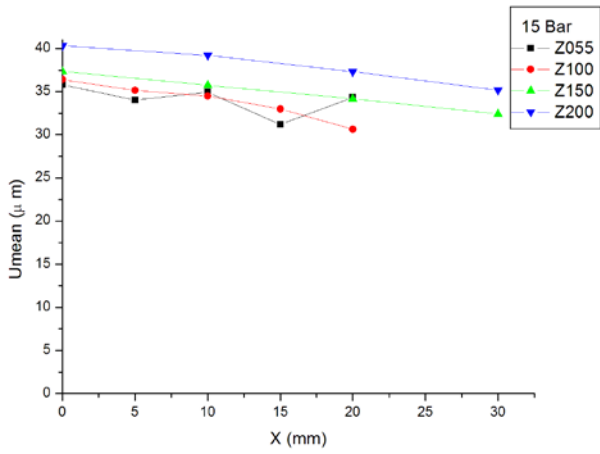
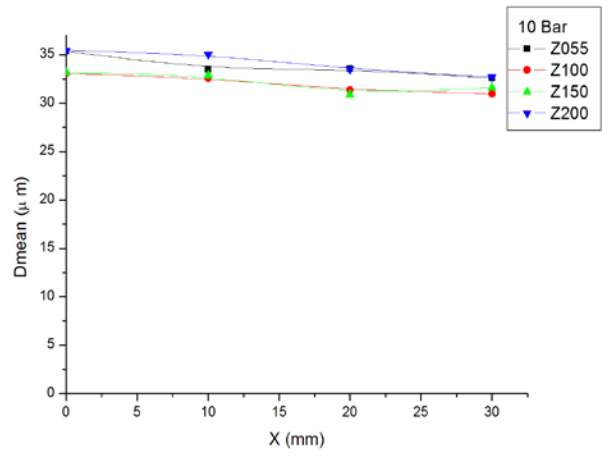
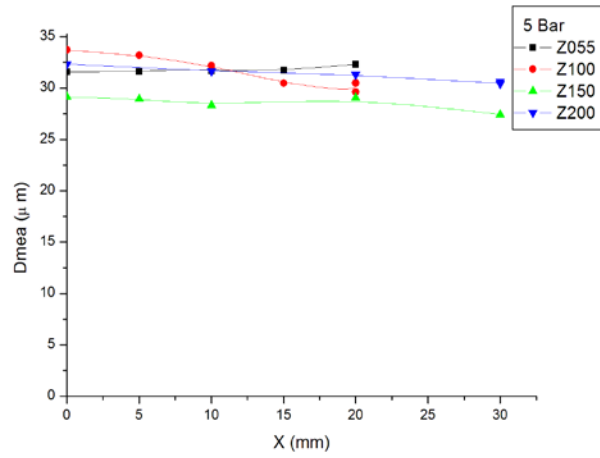


**Εικόνα 71: Εγκάρσιες Κατανομές μέσων κατακόρυφων συνιστωσών της ταχύτητας ως προς την κατακόρυφη απόσταση.**



**Εικόνα 72: Εγκάρσιες Κατανομές μέσων διαμέτρων σταγονιδίων ως προς την κατακόρυφη απόσταση.**









## 5 Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα.

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας τέθηκε ως κύριος σκοπός η τροποποίηση της ήδη υπάρχουσας διάταξης – θαλάμου δοκιμών υγρού καυσίμου ώστε να διαθέτει τη δυνατότητα ισόθερμου ψεκασμού σε συνθήκες υψηλών πιέσεων, υψηλότερων προηγούμενων εργασιών (π.χ Πτυχιακή Γεωργακόπουλου – Παπασπυρόπουλου 2012) στις οποίες η πίεση ψεκασμού είχε φθάσει έως και τα 11 bar. Κατά τις δοκιμές που έγιναν στη συγκεκριμένη εργασία η πίεση ψεκασμού έφθασε έως και τα 18bar.

Ως γνωστόν στους κινητήρες αεροσκαφών η συμπίεση του καυσίμου φθάνει έως και τα 50bar περίπου, οπότε για να έχει νόημα μια προσομοίωση τουλάχιστον της ισόθερμης κατάστασης ψεκασμού εντός θαλάμου δοκιμών η πίεση ψεκασμού πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη. Προς το σκοπό αυτό αντικαταστάθηκε η αντλητική αντλία Danfoss που χρησιμοποιούταν στο κύκλωμα και έφθανε έως πίεση λειτουργίας τα 16 bar με νέα αντλία πετρελαίου και συνοδευτικό μοτέρ. Η νέα αντλία που δοκιμάστηκε στο κλειστό κύκλωμα έχει μέγιστη δυνατότητα συμπίεσης τα 200bar και είναι γραναζωτή. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου αντλίας έγινε ώστε να είναι δυνατή η διατήρηση σταθερής πίεσης καθόλη τη διάρκεια μιας μέτρησης αφού άλλου τύπου αντλίες όπως οι εμβολοφόρες θα έδιναν διακυμάνσεις στην πίεση λειτουργίας κάτι που δεν είναι επιθυμητό για τη συνθήκη ψεκασμού που μελετήθηκε. Επίσης αντικαταστάθηκαν οι σωληνώσεις ώστε να έχουν όριο αντοχής τα 200bar, κωνικές συνδέσεις για τέλεια στεγανοποίηση και μέγιστη αντοχή και επίσης τοποθετήθηκε μανόμετρο γλυκερίνης μέγιστης τιμής 200bar.

Η συναρμογή και στεγανοποίηση του θαλάμου δοκιμών έγινε με ειδικό τύπο σιλικόνης μεγάλης αντοχής σε χημικά. Στο μέλλον σχεδιάζεται η επανάληψη των πειραμάτων στις ίδιες αλλά και πολύ υψηλότερες πιέσεις με καύσιμο την κηροζίνη, που είναι ισχυρά διαλυτικό καύσιμο σε οποιοδήποτε συνθετικό υλικό.

Μια άλλη τροποποίηση που πραγματοποιήθηκε στον υπάρχοντα θάλαμο δοκιμών ήταν η προσθήκη ενός κωνικού πλέγματος κατά μήκος του άξονα εκροής της δέσμης καυσίμου. Παρατηρήθηκε ότι οι υψηλές πιέσεις ψεκασμού είχαν ως συνέπεια την εμφάνιση ισχυρής ανακυκλοφορίας σταγονιδίων καυσίμου που συμπιέσσονται προφανώς και αέρα κατά την κίνησή τους. Η ανακυκλοφορία των σταγονιδίων με τη σειρά της δημιουργούσε νέφος σταγονιδίων τόσο μεγάλων συγκεντρώσεων που παρεμπόδιζαν τον οπτικό δρόμο των φακών συλλογής του PDA με αποτέλεσμα την εμφάνιση ισχυρού θορύβου στο σήμα.

Για την άρση του ως άνω περιγραφόμενου προβλήματος κατασκευάστηκε μια τετράγωνη πλάκα από φύλλο αλουμινίου πάχους 2mm με μια οπή στο κέντρο της ακτίνας 5cm στα άκρα της οποίας περιμετρικά περιτυλίχθηκε μεταλλικό πλέγμα σε σχήμα κώνου. Η πλάκα αλουμινίου τοποθετήθηκε κάτω από το ακροφύσιο και σε κατακόρυφες θέσεις κατώτερες του όγκου ελέγχου των μετρήσεων κάθε φορά με σκοπό τον ακόμα καλύτερο διασκορπισμό των σταγονιδίων και τον περιορισμό της ανακυκλοφορίας τους. Αν και όπως έχει περιγραφεί νωρίτερα (Πειραματική διαδικασία) το μήκος του θαλάμου είναι 1m και καταλήγει σε κωνικό γωνίας 45° εντούτοις ο σημαντικότερος παράγοντας ανακυκλοφορίας είναι το φαινόμενο των microphysics γνωστό και ως rebound κατά το οποίο σταγονίδια λόγω των μεγάλων ταχυτήτων εξόδου από το ακροφύσιο προσκρούν στο «πάτωμα» του θαλάμου και επανέρχονται έχοντας χάσει κάποιο μόνο μέρος της κινητικής τους ενέργειας κινούμενα ανοδικά.



Αυτό έχει ως συνέπεια να αναμιγνύονται με σταγονίδια που ψεκάζονται και περαιτέρω τη δημιουργία σήματος ισχυρού θορύβου τέτοιου που να καθίσταται δύσκολη η αναγνώριση και η τήρηση των κριτηρίων αξιολόγησης που είχαν τεθεί για όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστες μετρήσεις.

Με την επιβολή εντός της διάταξης του επιπλέον κωνικού πλέγματος η ανακυκλοφορία περιοσρίστηκε σημαντικά, ο οπτικός δρόμος καθάρισε και εξήχθησαν ασφαλέστερα αποτελέσματα. Αυτό είναι επίσης εμφανές από τις καταγραφές των μεγεθών (διαμέτρων σταγονιδίων) σύμφωνα με τις οποίες σε εγκάρσιες αποστάσεις από τον άξονα εκροής εμφανίζονταν μεγαλύτερα μεγέθη σταγονιδίων σε αντιδιαστολή με ότι αναμένεται για την ελεύθερη δέσμη.

Με το χρησιμοποιούμενο γενικού τύπου ακροφύσιο (generic) που δοκιμάστηκε (full – cone), η πίεση λειτουργίας του καυσίμου έφθασε τα 18bar. Η γριναζωτή αντλία ανεβάζει την πίεση του καυσίμου όταν η παροχή της στην έξοδο είναι μεγαλύτερη από την παροχή του καυσίμου που εκτονώνεται. Τα ο ακροφύσιο λόγω της μεγάλης σχετικά διαμέτρου (0.79mm) έχει παροχή περίπου 1.3 lt/min, ενώ με μέγιστη παροχή της αντλίας προσαρμοσμένη στον συγκεκριμένο κινητήρα (0.75kW, 1400rpm) είναι περίπου 1.6lt/min. Αυτή η διαφορά παροχής δίνει μια αύξηση στην πίεση του ρευστού στα 18bar. Με την αντικατάσταση του ακροφυσίου με ένα μικρότερης οπής και συνεπώς παροχής θα δοθεί οπωσδήποτε ο επιθυμητός λόγος διαφοράς παροχών που θα επιτρέψει τη διενέργεια μετρήσεων ψεκασμού σε μεγαλύτερες πιέσεις έως και τα 50bar τουλάχιστον.

Επίσης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων έγινε αντιστοίχιση του αριθμού στροφών του κινητήρα με την πίεση του καυσίμου έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ακριβώς ίδιες συνθήκες κατά την επανάληψη των μετρήσεων αφού η ρύθμιση των στροφών του κινητήρα είναι πιο ακριβής και απλή από τον οπτικό έλεγχο στο μανόμετρο.

Κατά τις δοκιμές ως καύσιμο χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο πετρέλαιο κίνησης. Η φθορά της μέσης ταχύτητας σταγονιδίων κατά μήκος του άξονα εκροής είναι εμφανής και τα αποτελέσματα είχαν πλήρη ταύτιση κατά την επανάληψη των μετρήσεων. Επίσης κατά τις μετρήσεις σε εγκάρσια επίπεδα του άξονα εκροής φαίνεται η εξάλειψη του μεγέθους της ταχύτητας προς μικρότερες τιμές αυξανόμενης της απόστασης από τον άξονα κατά την εξάπλωση της δέσμης ψεκασμού.

Οι μετρήσεις των κατανομών της μέσης διαμέτρου Sauter παρουσιάζουν σποραδικά μικρή ασυνέπεια που οφείλεται σε ένα βαθμό στην ενυπάρχουσα ανακυκλοφορία εντός του θαλάμου δοκιμών. Λόγω μεγάλης συγκέντρωσης σταγονιδίων καυσίμου είναι πιθανή η αύξηση των συγκρούσεων μεταξύ των σταγονιδίων που μπορεί να οδηγήσει σε συσσωματώματα και επομένως ασυνέπεια στο μέγεθος.

Βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν στη διάταξη είναι η προσαρμογή ακροφυσίου μικρότερης οπής που θα μειώσει την ανακυκλοφορία και θα αυξήσει την πίεση ψεκασμού. Ακόμα η προσαρμογή παροχόμετρου στη διάταξη θα δώσει την άμεση μέτρηση της παροχής για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του ψεκασμού αλλά και για τον τρόπο λειτουργίας του ακροφυσίου.



## 6 Αναφορές.

- [1]. Spalding, D.B., (1953), Proc. Combust. Inst. 4 847–864
- [2]. Banhawy, Y. El, Whitelaw, J.H., (1981), Combust. Flame 42 253–275
- [3]. Sornek, R.J., Dobashi, R., Hirano, T., (2000), Combust. Flame 120 479–491
- [4]. Rao, K.V.L., Lefebvre, A.H., (1976), Combust. Flame 26 303–309
- [5]. Li, S.C., Libby, P.A., Williams, F.A., (1993), Combust. Flame 94 161–177
- [6]. Bazile, R., Stepowski, D., (1994), Proc. Combust. Inst. 25 363–370
- [7]. Chigier, N.A., McCreath, C.G., Makepeace, R.W. (1974), Combust. Flame 23 11–16
- [8]. Hardalupas, Y., Taylor, A.M.K.P. Whitelaw, J.H., (1990), Proc. R. Soc. London Ser. A 428 (1874) 129–155
- [9]. Edwards, C.F., Rudoff, R.C., (1990), Proc. Combust. Inst. 23 1353–1359
- [10]. Ghaffarpour, M. Chehroudi, B., (1993), Combust. Sci. Technol. 92 173–200
- [11]. Presser, C., Gupta, A.K., Semerjian, H.G., (1993), Combust. Flame 92 25–44
- [12]. Hardalupas, Y., Liu, C.H., Whitelaw, J.H., (1994), Combust. Sci. Technol. 97 157–191
- [13]. Sivasegaram, S., Tsai, R.F., Whitelaw, J.H., (1995), Combust. Sci. Technol. 105, 67–83
- [14]. Haile, E., Delabroy, O., Lacas, F., Veynante, D., Candel, S., (1996), Proc. Combust. Inst. 26 1663–1670
- [15]. Eckstein, J., Freitag, E., Hirsch, C., Sattelmayer, T.R. von der Bank, T. Schilling, J. (2005), Eng. Gas Turb. Power 127 301–306
- [16]. Pera, C., Reveillon, J., (2007), Proc. Combust. Inst. 31 2283–2290
- [17]. Gradinger, T.B., Inauen, A., Bombach, R., Kappeli, B., Hubschmid, W., Boulouchos, K., (2001), Combust. Flame 124 422–443
- [18]. Carl, M., Behrendt, T., Fleing, C., Frodermann, M., Heinze, J., Hassa, C., Meier, U., Wolff-Gassmann, D., Hohmann, S., Zarzalis, N., (2001), Trans. ASME 123 810–816



- [19]. Patel, N., Kirtas, M., Sankaran, V., Menon, S., (2007), Proc. Combust. Inst. 31 2327–2334
- [20]. Conrad T., A. Bibik, D. Shcherbik, E. Lubarsky, B.T. Zinn, (2007), “ Proc. Combust. Inst. 31 pp.2327–2334
- [21]. Lefebvre A., (2002) “Sprays and Atomization
- [22]. Γεωργακόπουλος Σ. & Παπασπυρόπουλος Α. (2012) Πειραματική Μελέτη Εξέλιξης Πεδίου Ταχυτήτων και Μεγέθους Σταγονιδίων κατά τον Ψεκασμό Εναλλακτικών Καυσίμων Αεροσκαφών Υψηλών Πιέσεων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας.
- [23]. Σωτηρίου Δ., Παπαδόπουλος Χ., (2012) «Μετρήσεις Χαρακτηριστικών Δέσμης Εκροής Σταγονιδίων για Διαφορετικά Καύσιμα με Μέθοδο PDA» Διπλωματική Εργασία Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής & Περιβάλλοντος Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής.