

ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΥΓΡΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΟΜΟΙΟΓΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗΣ ΤΥΡΒΗΣ

Γεώργιος Χαραλάμπους, Παυλίνα Χούντα, Γιάννης Χαρδαλούπας

Επίκουρος καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Λεωφόρος
Αθηνών, Πεδίον Άρεως, 38334 Βόλος, georgios.charalampous@uth.gr

Μηχανολόγος Μηχανικός, Imperial College London, Exhibition rd, London SW7 2AZ, UK

Καθηγητής, Imperial College London, Exhibition rd, London SW7 2AZ, UK,
y.hardalupas@imperial.ac.uk

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εκπονείται πειραματική μελέτη της διάσπασης δέσμης νερού κάτω από την επίδραση τύρβης. Η έρευνα λαμβάνει χώρα σε πρότυπη πειραματική διάταξη η οποία βασίζεται σε συστοιχίες συνθετικών δεσμών τοποθετημένες στις κορυφές ενός κυβικού πλαισίου και με εκροή προς το κέντρο του κύβου. Η ροή που παράγεται από τις εκατέρωθεν συστοιχίες συνθετικών δεσμών ανακόπτεται στο κέντρο του κύβου όπου και παράγεται ομογενής και ισοτροπική τύρβη με μηδενική μέση ταχύτητα. Εξετάζεται η διάσπαση της δέσμης υγρού σε ήρεμη κατάσταση περιβάλλοντος ως σημείο αναφοράς όπου $u' = 0 \text{ m/s}$ και για επίπεδα τύρβης $u' = 0.20 \text{ m/s}$, $u' = 0.38 \text{ m/s}$ και $u' = 0.53 \text{ m/s}$ που αντιστοιχούν σε $Re_\lambda = 0, 132, 180$ και 207 . Η δέσμη του νερού εκχέεται στο κέντρο της διάταξης από ακροφύσιο κυκλικής διατομής από το οποίο εκρέει με $Re = 823$ και $Re = 1029$. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται συμπεριλαμβάνουν τη μέση τιμή και τις διακυμάνσεις του μήκους διάσπασης της υγρής δέσμης και τα χαρακτηριστικά των σταγονιδίων που παράγονται από τη διάσπαση της δέσμης του υγρού. Βρέθηκε ότι η ένταση της τύρβης συσχετίζεται αρνητικά με το μήκος διάσπασης και μετά από κάποιο Re_λ η τύρβη κυριαρχεί στο ρυθμό ανάπτυξης της αστάθειας. Η χαρακτηριστική διάμετρος των σταγόνων είναι της τάξης των $2D_0$ και αυξάνει ελαφρά με την κατάντη απόσταση από το ακροφύσιο. Το μήκος κύματος της αστάθειας στην επιφάνεια της δέσμης του υγρού δεν επηρεάζεται από την τύρβη του περιβάλλοντος.

Λέξεις Κλειδιά: Υγρή δέσμη, Τύρβη, Διάσπαση, Σταγόνες

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της διάσπασης δέσμης υγρού έχει μελετηθεί εκτεταμένα και έχουν εξεταστεί πληθώρα μηχανισμών. Για δέσμες που εκχέονται σε ήρεμη κατάσταση αερίου περιβάλλοντος περιβάλλοντα έχουν αναπτυχθεί θεωρίες και έχουν γίνει πειράματα που δίνουν θεμελιώδη κατανόηση των φαινομένων (Plateau 1873, Rayleigh 1878, Weber 1931, Grant and Middleman 1966, Pan and Suga 2006, Delteil, Vincent et al. 2011). Σε πρακτικές εφαρμογές η έκχυση της υγρής δέσμης λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον όπου υπάρχει σημαντική ροή του περιβάλλοντος αερίου, όπως σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, ξηραντήρες, τουρμπίνες ή κάποιας άλλης βιομηχανικής εφαρμογής όπου τα συμπεράσματα των μελετών για διάσπαση σε ήρεμη κατάσταση αερίου περιβάλλοντος μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμα. Για αυτό το λόγο έχουν γίνει εκτεταμένες μελέτες για τη διάσπαση της δέσμης του υγρού σε πολλούς τύπους ψεκαστήρων και έχουν προταθεί πολλοί επιπλέον φυσικοί μηχανισμοί.

Σύνοψη της γνώσης του αντικειμένου μπορεί να βρεθεί στις επιθεωρήσεις των (Sirignano and Mehring 2000, Eggers and Villermaux 2008).

Ωστόσο, σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δύσκολο να γίνει συστηματική μελέτη της επιμέρους συμβολής της κάθε παραμέτρου της περιβάλλουσας ροής. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα της ροής όπου υπάρχουν αλληλεπιδράσεις πολλών συνιστωσών στην υγρή δέσμη. Η επίδρασή πολλοπλών συνιστωσών της ροής του περιβάλλοντος αέρα στη διάσπαση της υγρής δέσμης δυσκολεύει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον ρόλο που διαδραματίζει η τύρβη η οποία υπερβάλλεται στην ολική κίνηση της αέριας φάσης. Για παράδειγμα η έρευνα των (Marmottant and Villermaux 2004) σε ψεκαστήρες αέριας διάσπασης ομοαξονικής ροής (coaxial airblast atomisers), έδειξε ότι η ενώ η αύξηση της τύρβης στην αέρια δέσμη δεν αλλάζει το μήκος κύματος της πρωτεύουσας αστάθειας στην υγρή δέσμη, επηρεάζει το τελικό μέγεθος των σταγόνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μία μη μονοσήμαντη σχέση μεταξύ τύρβης και της εξέλιξης της ροής. Επίσης σε πρόσφατες μελέτες βρέθηκε ότι αλλαγή του επιπέδου της τύρβης της αέριας ροής σε prefilming atomisers (Matas, Marty et al. 2015, Déjean, Berthoumieu et al. 2016, Déjean, Berthoumieu et al. 2016) είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή των χαρακτηριστικών της διάσπασης του υγρού υμένα. Ακόμα υπάρχουν εφαρμογές όπου η τύρβη μπορεί να είναι υψηλή σε σχέση με τη μέση κλίση ταχύτητας όπως σε μηχανές υγρού προωθητικού όπου υπάρχει υψηλό επίπεδο ακουστικής επιβολής ((Davis and Chehroudi 2007, Teshome, Leyva et al. 2012, Forliti, Badakhshan et al. 2015).

Έτσι, προκύπτει η ανάγκη να μελετηθεί η συμβολή της τύρβης του αερίου περιβάλλοντος ανεξάρτητα από τη μέση ταχύτητα της ροής καθώς η συμβολή της δεν είναι ξεκάθαρη και πρέπει να μελετηθεί ανεξάρτητα από την παρουσία της μέσης ροής. Για αυτό το σκοπό εκτελείται μελέτη σε πρότυπη πειραματική διάταξη στην οποία παράγεται ομοιογενής και ισοτροπική τύρβη με μηδενική μέση ταχύτητα. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την καθαρή συμβολή της τύρβης στην διάσπαση απλής δέσμης υγρού ανεξάρτητα από τη συμβολή μέσης σχετικής ταχύτητας ανάμεσα στην υγρή και την αέρια φάση.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το πείραμα επικεντρώνεται γύρω από μια δέσμη νερού που εκρέει από ακροφύσιο ανοξειδωτού χάλυβα κυκλικής διατομής. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε πιστοποιημένο απιονισμένο νερό (VWR Water Ph. Eur., USP, NF, JP, purified) ώστε οι φυσικές του ιδιότητες να είναι σταθερές και παράλληλα να αποφευχθεί η εναπόθεση αλάτων στο ακροφύσιο που θα μπορούσε να προκαλέσει διαταραχή της εγγεόμενης δέσμης. Το ακροφύσιο τοποθετείται με κάθετο προσανατολισμό και με την υγρή δέσμη να εκρέει προς τα κάτω. Η εσωτερική διάμετρος του ακροφυσίου είναι $D_0=0.514\text{mm}$ και το μήκος του ακροφυσίου είναι 100mm . Αυτό εξασφαλίζει ότι στην έξοδο η ροή της δέσμης είναι πλήρως ανεπτυγμένη αφού ο λόγος διαμέτρου προς μήκους είναι περίπου 200. Επίσης ο λόγος μήκους ως προς τη διάμετρο του ακροφυσίου είναι επαρκής για να τη καταστολή της vena contracta, (Lichtarowicz, Duggins et al. 1965), η παρουσία της οποίας είναι ανεπιθύμητη γιατί μπορεί να επηρεάσει την εξέλιξη της υγρής δέσμης. Η διάσπαση της δέσμης του υγρού εξετάστηκε για αριθμούς Reynolds, $Re=823$ και $Re=1029$ βασισμένους στην εσωτερική διάμετρο του ακροφυσίου.

$$Re = \frac{\rho_L D_0 U}{\mu_L} \quad (1)$$

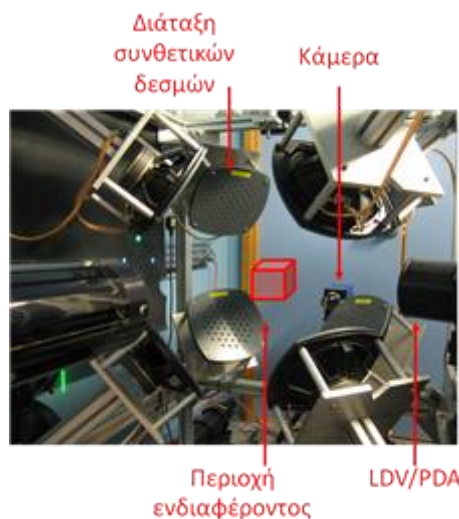
όπου ρ_L η πυκνότητα του νερού, U η μέση ταχύτητα του νερού στην έξοδο του ακροφυσίου και μ_L , το δυναμικό ιξώδες του νερού. Για αυτούς τους αριθμούς Re η ροή της υγρής δέσμης είναι στρωτή.

Η έξοδος του ακροφυσίου τοποθετείται εντός πρότυπης διάταξης τύπου box of turbulence ((Hwang and Eaton 2004, Goepfert, Marie et al. 2010). Η διάταξη αυτού του τύπου εξασφαλίζει δημιουργία ομοιογενούς και ισοτροπικής τύρβης με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της μέσης ταχύτητας. Η παρούσα υλοποίηση ((Charalampous and Hardalupas 2010) βασίζεται στη χρήση 8 συστοιχιών συνθετικών δεσμών οι οποίες τοποθετούνται στις κορυφές κυβικού πλαισίου ακμής 1m με εκροή προς το κέντρο του κύβου. (Σχήμα 1). Η κάθε συστοιχία συνθετικών δεσμών υλοποιείται από ένα ηχείο (Davis Acoustics,) στο οποίο το άνοιγμα του κώνου έχει προσαρτηθεί διάτρητη πλάκα. Οι διατρήσεις στην πλάκα είναι κυκλικής διατομής διαμέτρου 6mm και αριθμούν 55 στο σύνολο τους. Η διάταξη των οπών είναι τριγωνικού πλέγματος με ακμή τριγώνου 20mm και περικλείονται εντός

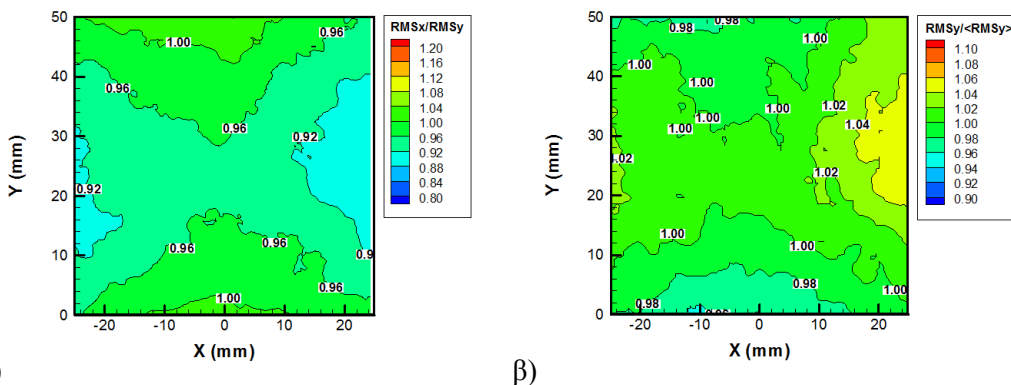
νοητού κύκλου διαμέτρου 160mm. Το κάθε ηχείο οδηγείται ανεξάρτητα από ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 50Hz που παράγεται από 16-bit National Instruments analogue output card (PCI 6733) και ενισχύεται από ενισχυτή Behringer Europower 2000. Η παλμική μετατόπιση της μεμβράνης του ηχείου προκαλεί εισρόφιση και εκπλήρωση του αέρα από τις διατρήσεις της πλάκας που καλύπτει το ηχείο και κατά συνέπεια τη δημιουργία συνθετικών δεσμών. Η ροή που παράγεται από τις εκατέρωθεν συστοιχίες συνθετικών δεσμών ανακόπτεται στο κέντρο του κύβου. Στο σημείο αυτό παράγεται τύρβη. Μετά από κατάλληλη ρύθμιση του εύρους ταλάντωσης της μεμβράνης του κάθε ηχείου είναι δυνατό η τύρβη να γίνει ομοιογενής και ισοτροπική και η μέση ταχύτητα της ροής στο κέντρο της διάταξης να είναι μηδενική. Το περίγραμμα της ισοτροπίας και ομοιογένειας του αέρα στο κέντρο του box of turbulence παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του αέρα στο κέντρο του κύβου, u' , για την οποία έγιναν μετρήσεις της διάσπασης της υγρής δέσμης ήταν $u'=0.20\text{m/s}$, $u'=0.38\text{m/s}$ και $u'=0.53\text{m/s}$. Ο αριθμός Reynolds της τύρβης βασισμένος στην κλίμακα Taylor

$$Re_\lambda = \frac{\rho_G \lambda u'}{\mu_G} \quad (2)$$

όπου ρ_G η πυκνότητα του αέρα, λ η κλίμακα Taylor και μ_G το δυναμικό ιξώδες του αέρα ήταν $Re_\lambda=144, 196, 236$ για τις τυπικές αποκλίσεις u' που εξετάστηκαν. Σύνοψη των χαρακτηριστικών της ροής της αέρας και υγρής ροής παρατίθεται στον Πίνακα 1.



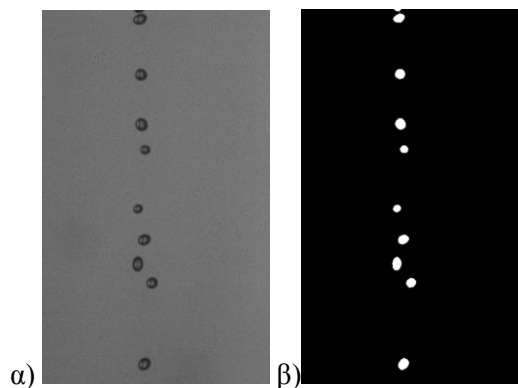
Σχήμα 1: Πειραματική διάταξη στην οποία διακρίνεται ο χώρος μέτρησης στον οποίο εφαρμόζεται ομοιογενής ισότροπη τύρβη σε σχέση με τη θέση των συστοιχιών συνθετικών δεσμών



Σχήμα 2: Περιγράμματα α) ισοτροπίας και β) ομοιογένειας της τύρβης του αέρα.

Πίνακας 1: Σύνοψη των πειραματικών καταστάσεων	
Re	823, 1029
Re _λ	0, 132, 180, 207

Η οπτικοποίηση της δέσμης του υγρού έγινε με την τεχνική της σκιαγραφίας και με χρήση CCD κάμερας PCO Sensicam QE. Η ανάλυση του αισθητήρα της κάμερας ήταν 1376x1040 pixel και η χωρική ανάλυση 34μm/pixel. Για αυτή τη χωρική ανάλυση η διάμετρος της υγρής δέσμης μπορεί να μετρηθεί σε διαστήματα μικρότερα από 7%D₀. Ο φωτισμός του υποβάθρου της δέσμης του υγρού έγινε με λάμπα 100W η οποία παρήγε ομοιόμορφη φωτεινότητα λευκού φωτός σε όλο το εύρος πεδίου απεικόνισης της ροής. Οι εικόνες που καταγράφηκαν, χαρακτηριστικό παραδείγματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3α**, επεξεργαστήκαν ψηφιακά για να απομονωθούν και να αναγνωριστούν η συνεχής δέσμη του υγρού και οι διάσπαρτες σταγόνες. Η ψηφιακή επεξεργασία έγινε αρχικά με αφαίρεση του θορύβου με φίλτρα Reconstruction Opening ρ⁻ and Reconstruction Closing ρ⁺ και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν Alternating Sequential Filters (ASF). Τοπικά μέγιστα και ελάχιστα χρησιμοποιήθηκαν ως δείκτες της υγρής φάσης και τελικά η εικόνα έγινε binarized. Παράδειγμα της επεξεργασίας παρατίθεται στο **Σχήμα 3β**. Μπορεί να διακριθεί η αντιστοιχία μεταξύ της υγρής φάσης στο **Σχήμα 3α** και της ανιχνευμένης υγρής φάσης στο **Σχήμα 3β**.



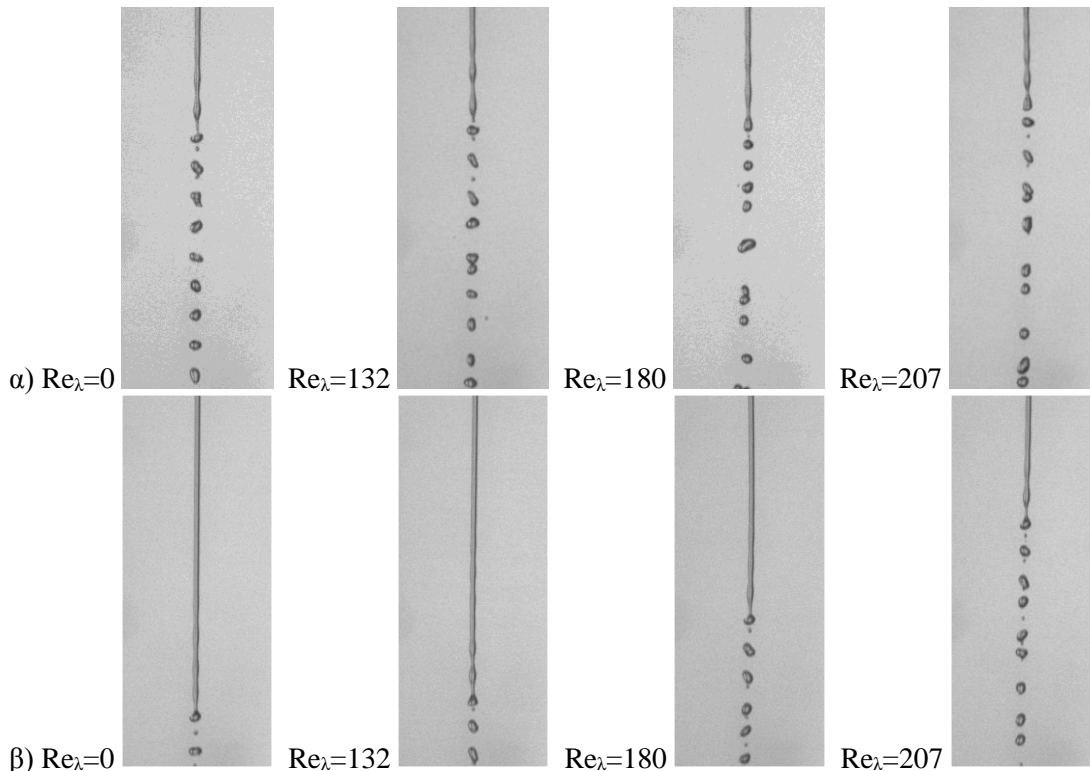
Σχήμα 3: Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας για την εύρεση της υγρής φάσης α) αρχική εικόνα β) τελική δυαδική εικόνα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

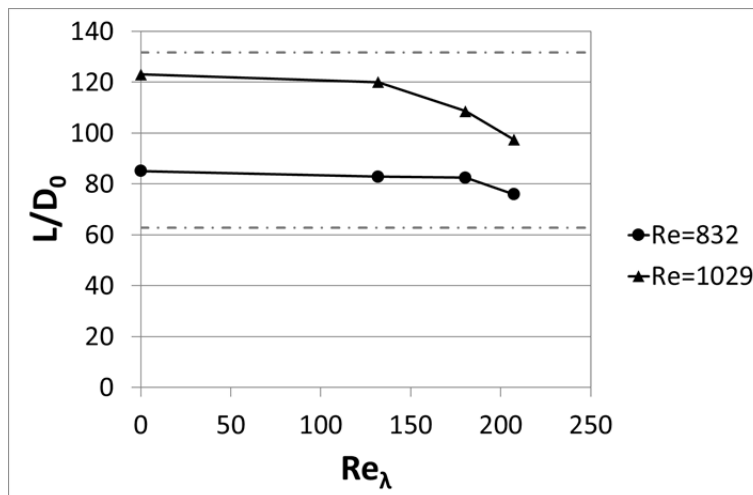
Αρχικά εξετάζεται η διάσπαση της δέσμης του υγρού. Παραδείγματα της εξέλιξης της υγρής δέσμης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4** για όλους τους συνδυασμούς εκροής υγρού και έντασης τύρβης της παρούσας μελέτης. Για εκροή σε περιβάλλον στάσιμου αέρα (Re_λ=0) δέσμη του νερού αναπτύσσεται συμμετρικά και με εξαίρεση την περιοχή κοντά στο σημείο διάσπασης η επιφάνεια δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις. Η ροή των σταγόνων εξελίσσεται με σειρά με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Η σφαιρικότητα των σταγόνων δεν είναι τέλεια, καθώς το μέγεθός τους (~1mm) είναι αρκετά μεγάλο και οι αδρανειακές δυνάμεις είναι σημαντικές σε σχέση με τις δυνάμεις ιξώδους και επιφανειακής τάσης ώστε να υπάρξει υδροστατική ισορροπία, ειδικά κοντά στο σημείο διάσπασής της δέσμης όπου προκαλούνται ταλαντώσεις εξαιτίας τις αποκοπής. Η σφαιρικότητα βελτιώνεται κατόπιν του σημείου διάσπασης όπου και μεσολαβεί χρόνος για απόσβεση της ταλάντωσης.

Η επιβολή της τύρβης γύρω από την υγρή δέσμη έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του μήκους διάσπασης τόσο στην περίπτωση της δέσμης με Re=823 όσο και στην περίπτωση της δέσμης με Re=1029 (**Σχήμα 4**). Η επίδραση της τύρβης στην εξέλιξη της υγρής δέσμης είναι ποιοτικά όμοια και στις δύο περιπτώσεις αλλά διαφέρει ποσοτικά. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στο **Σχήμα 5** Για χαμηλά επίπεδα τύρβης το μήκος διάσπασης μειώνεται αργά μέχρι έναν κρίσιμο αριθμό Re_λ. Η ο ρυθμός μεταβολής του μέσου μήκους διάσπασης σε σχέση με τον αριθμό Re_λ είναι της τάξης του -10⁻² και για τους 2 αριθμούς Re της υγρής δέσμης, **Σχήμα 6**. Μέχρι αυτό το σημείο μπορεί να θεωρηθεί ότι ο

πρωτεύοντας μηχανισμός διάσπασης της δέσμης είναι αυτός που έχει περιγράψει από τους (Plateau 1873, Rayleigh 1878) με κινητήρια δύναμη την επιφανειακή τάση.



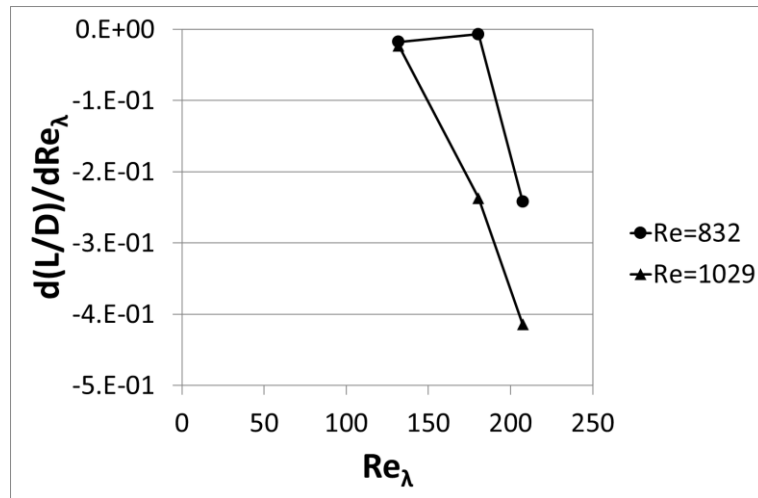
Σχήμα 4: Παράδειγμα διάσπασης υγρής δέσμης για α) $Re=823$ και β) $Re=1029$ για $Re_\lambda=0$, $Re_\lambda=132$, $Re_\lambda=180$ και $Re_\lambda=207$.



Σχήμα 5: Μήκος διάσπασης (αδιαστατοποιημένο ως προς τη διάμετρο του ακροφυσίου) ως συνάρτηση της τύρβης του αέρα.

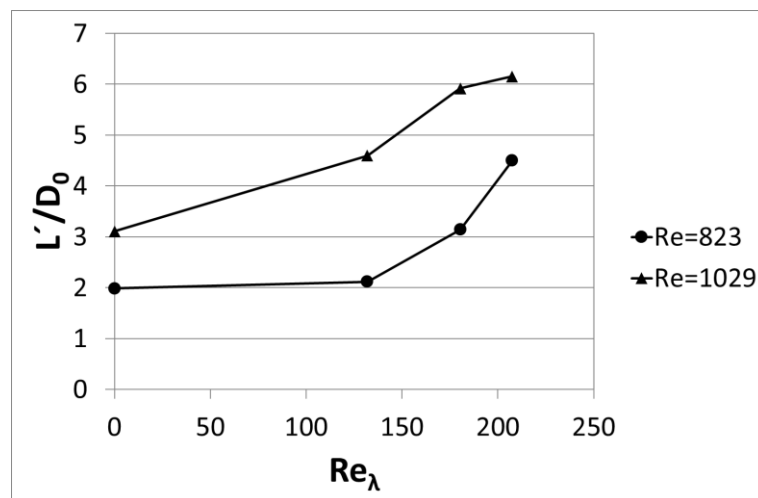
Περαιτέρω αύξηση στην τύρβη του περιβάλλοντος αέρα συνεπάγεται σε ραγδαία μεταβολή του μήκους διάσπασης της τάξης του 10^{-1} και για τους 2 αριθμούς Re της υγρής δέσμης. Παρά αυτή την ομοιότητα, η μετάβαση από την κατάσταση χαμηλής επιρροής της περιβάλλουσας τύρβης στην κατάσταση στο μήκος διάσπασης σε ραγδαία μείωση συμβαίνει σε διαφορετικούς αριθμούς Re_λ . Για υγρές δέσμες με $Re=823$ η μετάβαση συμβαίνει σε $Re_\lambda=180$ ενώ για υγρές δέσμες με $Re=1029$ η μετάβαση αρχίζει σε $Re_\lambda=132$. Η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο μήκος της υγρής δέσμης με υψηλότερο Re . Καθώς το μήκος της δέσμης του υγρού είναι μεγαλύτερο, η δέσμη είναι περισσότερο εκτεθειμένη στην τύρβη και συνεπώς περισσότερο επιρρεπής στην αυξανόμενη

διαταραχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την νωρίτερη μετάβαση σε καθεστώς επικράτησης της τύρβης σε σχέση με τις δυνάμεις επιφανειακής τάσης.



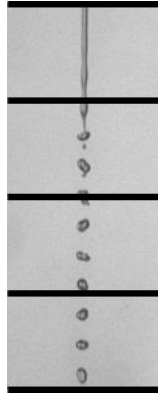
Σχήμα 6: Ρυθμός μείωσης του μήκους διάσπασης (αδιαστατοποιημένο ως προς τη διάμετρο του ακροφυσίου) ως συνάρτηση της τύρβης του αέρα.

Η σχέση ανάμεσα στη διακύμανση του μήκους διάσπασης της υγρής δέσμης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7**, ως συνάρτηση της τύρβης του περιβάλλοντος. Σε συμφωνία με την μέση τιμή του μήκους διάσπασης έτσι και η διακύμανση του είναι μεγαλύτερη για τη δέσμη με το μεγαλύτερο Re . Όταν δεν υφίσταται τύρβη το μέγεθος της διακύμανσης είναι 2-3 διαμέτροι του ακροφυσίου για τις δέσμες με $Re=823$ και $Re=1029$ αντιστοίχως. Η παρουσία τύρβης προκαλεί πάντα αύξηση της διακύμανσης του μήκους διάσπασης η οποία όμως δεν συσχετίζεται καλά με την μείωση της μέσης τιμής του. Και για τους δύο αριθμούς Re της υγρής δέσμης που εξετάστηκαν δεν εμφανίζεται μετάβαση στην διακύμανση του μήκους διάσπασης στις τιμές $Re_\lambda=823$ και $Re_\lambda=1029$ για $Re_\lambda=180$ και $Re_\lambda=132$ αντιστοίχως. Στην περίπτωση της δέσμης με $Re=823$ η διακύμανση του μήκους διάσπασης παραμένει σταθερή μέχρι $Re_\lambda=132$ από όπου και μετά υπάρχει απότομη αύξηση. Αντίθετα, η διακύμανση του μήκους διάσπασης για $Re=1029$ αυξάνεται άμεσα κάτω από την παρουσία τύρβης χωρίς να παρατηρείται κάποια μεταβατική κατάσταση. Συνεπώς, μπορεί να υποστηριχθεί ότι προτού γίνει η μετάβαση του μηχανισμού διάσπασης από την επιφανειακή τάση στην τύρβη του περιβάλλοντος εμφανίζεται αύξηση της διακύμανσης χωρίς να συνεπάγεται μείωση του μέσου μήκους. Μετά το σημείο μετάβασης η διακύμανση του μήκους διάσπασης αυξάνεται πάντα με την αύξηση της τύρβης με αυξάνουσα τάση για δέσμες με $Re=823$ ενώ στην περίπτωση της δέσμης με $Re=1029$ μετά από $Re_\lambda=180$ παρατηρείται σημείο καμπής και περιορισμός της αύξησης της διακύμανσης του μήκους διάσπασης.



Σχήμα 7: Διακύμανση του μήκους διάσπασης αδιαστατοποιημένο ως προς τη διάμετρο του ακροφυσίου ως συνάρτηση της τύρβης του αέρα

Τα χαρακτηριστικά των σταγόνων για κάθε ροή υπολογίστηκαν διαιρώντας τις εικόνες σε 4 τμήματα κατά μήκος της κατεύθυνσης έκχυσης (**Σχήμα 8**). Σε κάθε τμήμα μετρήθηκαν η χαρακτηριστική διάμετρος και οι συντεταγμένες του κέντρου της κάθε σταγόνας. Στη συνέχεια υπολογίστηκε σε κάθε περιοχή η χαρακτηριστική διάμετρος και η μέση θέση των σταγόνων.

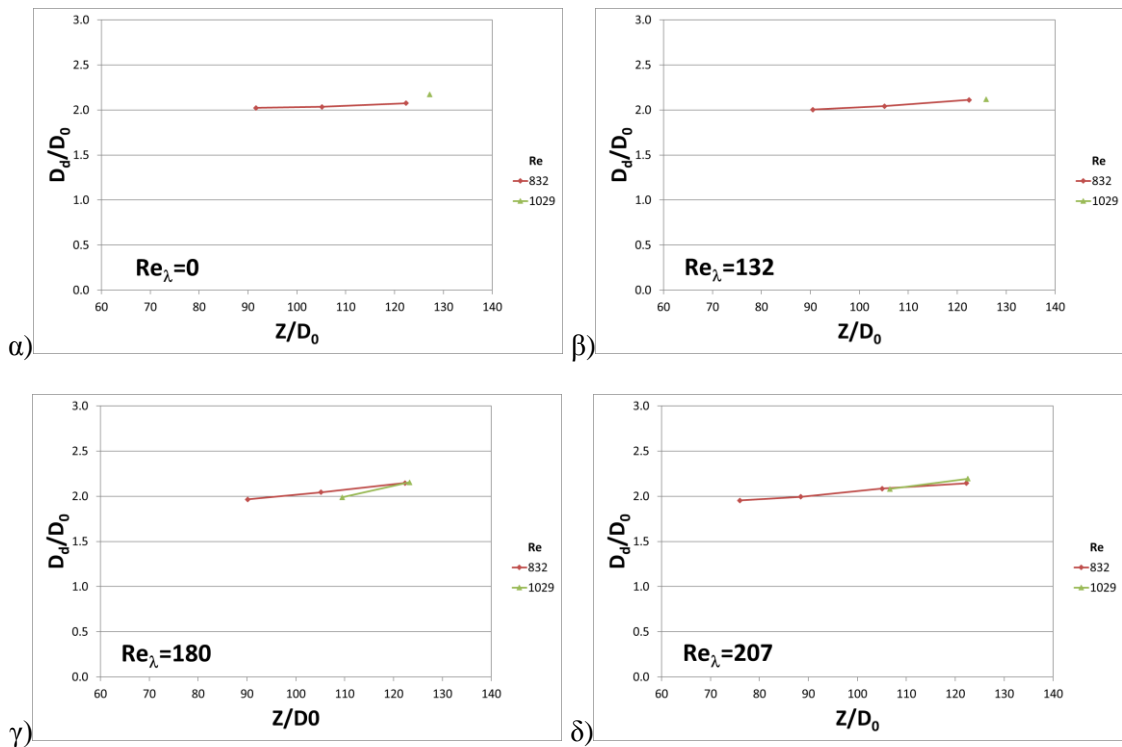


Σχήμα 8: Υποδιαίρεση της εικόνας σε 4 τμήματα. Χαρακτηριστική διάμετρος και μέση θέση υπολογίστηκαν ξεχωριστά σε κάθε τμήμα.

Στο σχήμα **Σχήμα 9** παρουσιάζεται η χαρακτηριστική διάμετρος των σταγονιδίων σε συνάρτηση με την κατάντη απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου Z αδιαστατοποιημένη με τη διάμετρο του ακροφυσίου D_0 . Όταν η εκροή της υγρής δέσμης γίνεται σε ήρεμο περιβάλλον η χαρακτηριστική διάμετρος των σταγονιδίων κοντά στην έξοδο του ακροφυσίου είναι $2D_0$ για $Re=832$ και $2.2D_0$ για $Re=102$ (**Σχήμα 9α**). Αυτό το μέγεθος είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο που προκύπτει από τη θεωρία του Rayleigh που προβλέπει $1.89D_0$ (Rayleigh 1878). Η μελέτη του Weber αναφέρει επίσης ότι η ίδια διάμετρος των σταγονιδίων είναι $1.89D_0$ (Weber 1931). Σε αντίθεση με τις θεωρητικές μελέτες, πειραματικές έρευνες αναφέρουν ότι η διάμετρος δεν είναι σταθερή αλλά κυμαίνεται στα $1.86-2.19D_0$. (Haenlein 1931, Haenlein 1932). Ανεξάρτητη πειραματική μελέτη αναφέρει διάμετρο σταγονιδίων $2.1D_0$ (Merrington and Richardson 1947). Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η διάμετρος που μετρήθηκε εδώ είναι σε σύμφωνη με τις θεωρητικές μελέτες και συμπίπτει ακριβώς με προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα. Όσο αυξάνει η απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου αυξάνει και η χαρακτηριστική διάμετρος των σταγόνων. Η αύξηση είναι μικρή δεν ξεπερνάει το 5% και είναι συνέπεια της συνένωσης των δορυφορικών σταγόνων που βρίσκονται στο διάκενο ανάμεσα στις σταγόνες κύριας αλληλουχίας. Η μείωση των δορυφορικών σταγόνων όσο αυξάνεται η απόσταση από το ακροφύσιο είναι εμφανής και στα παραδείγματα του **Σχήματος 4**.

Η παρουσία της τύρβης στην περιβάλλουσα ροή δεν προκαλεί μεγάλη αλλαγή στη διάμετρο της σταγόνας στην έξοδο του ακροφυσίου σε σχέση με την κατάσταση ήρεμου περιβάλλοντος για όλα τα επίπεδα τύρβης που δοκιμάστηκαν (**Σχήμα 9**). Αυτό φανερώνει ότι παρά την κυριαρχία της τύρβης στον ρυθμό ανάπτυξης της αστάθειας σε κάποιες περιπτώσεις, όπως έγινε φανερό από το μήκος διάσπασης της υγρής δέσμης (**Σχήμα 5**), η επιφανειακή τάση είναι που καθορίζει το μήκος κύματος της αστάθειας στην επιφάνεια της υγρής δέσμης και όχι οι κλίμακες της τύρβης που αλληλεπιδρούν με τη δέσμη.

Σημαντική απόκλιση παρατηρείται στην χαρακτηριστική διάμετρο των σταγόνων σε σχέση με την απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου. Η παρουσία της τύρβης συνεπάγεται σε συγκρούσεις και συνένωση όχι μόνο σταγόνων κύριας αλληλουχίας με δορυφορικές αλλά και συνένωση ανάμεσα σε σταγόνες κύριας αλληλουχίας μεταξύ τους (**Σχήμα 4**). Ως αποτέλεσμα ο ρυθμός μεταβολής της χαρακτηριστικής διαμέτρου με την απόσταση από το ακροφύσιο αυξάνεται σε σχέση με την κατάσταση ήρεμου περιβάλλοντος και μπορεί να φτάσει μέχρι και στο τριπλάσιο για τα επίπεδα τύρβης που εξετάστηκαν εδώ.



Σχήμα 9: Χαρακτηριστική διάμετρος των σταγόνων(αδιαστατοποιημένη ως προς τη διάμετρο του ακροφυσίου) ως συνάρτηση της απόστασής από την έξοδο από το ακροφύσιο (αδιαστατοποιημένη ως προς τη διάμετρο του ακροφυσίου) για α) $Re_\lambda=0$ β) $Re_\lambda=132$ γ) $Re_\lambda=180$ και δ) $Re_\lambda=207$

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έγινε μελέτη της διάσπασης υγρής δέσμης κάτω από την επιρροή ομοιογενούς και ισότροπης τύρβης χωρίς μέση ταχύτητα, για δέσμης νερού που εκρέει από ακροφύσιο κυκλικής διατομής με $Re=823$ και $Re=1029$ και τύρβη στο περιβάλλον αέριο με $Re_\lambda=0, 132, 180$ και 207 . Διαπιστώθηκε ότι το μήκος διάσπασής της υγρής δέσμης συσχετίζεται θετικά με τον αριθμό Re της υγρής δέσμης και αρνητικά με τον Re_λ της περιβάλλουσας αέριας ροής. Η τύρβη φαίνεται να επηρεάζει το ρυθμό ανάπτυξης της αστάθειας στην επιφάνεια της δέσμης του υγρού επάνω από κρίσιμο αριθμό Re_λ αλλά να μην επηρεάζει το μήκος κύματος της αστάθειας για όλο το εύρος Re_λ που εξετάστηκαν. Το χαρακτηριστικό μέγεθος των σταγόνων φαίνεται να αυξάνει κατάντη του ακροφυσίου εξαιτίας συγκρούσεων και συνενώσεων σταγόνων μεταξύ. Η παρουσία τύρβης στην αέρια ροή οδήγησε αύξηση των συγκρούσεων και οδήγησε σε τριπλασιασμό του ρυθμού αύξησης στη χαρακτηριστικής διαμέτρου σε σχέση με την εκροή σε ήρεμο περιβάλλον για το εύρος Re_λ που εξετάστηκαν

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Charalampous, G. and Y. Hardalupas (2010). Clustering of mono-disperse and poly-disperse particle in a “box of turbulence”. 7th International Conference on Multiphase Flow, Tampa, USA.
- Davis, D. W. and B. Chehroudi (2007). "Measurements in an Acoustically Driven Coaxial Jet under Sub-, Near-, and Supercritical Conditions." Journal of Propulsion and Power **23**(2): 364-374.
- Déjean, B., P. Berthoumieu and P. Gajan (2016). "Experimental study on the influence of liquid and air boundary conditions on a planar air-blasted liquid sheet, Part I: Liquid and air thicknesses." International Journal of Multiphase Flow **79**: 202-213.
- Déjean, B., P. Berthoumieu and P. Gajan (2016). "Experimental study on the influence of liquid and air boundary conditions on a planar air-blasted liquid sheet, Part II: prefilming zone length." International Journal of Multiphase Flow **79**: 214-224.

- Delteil, J., S. Vincent, A. Erriguible and P. Subra-Paternault (2011). "Numerical investigations in Rayleigh breakup of round liquid jets with VOF methods." Computers & Fluids **50**(1): 10-23.
- Eggers, J. and E. Villermaux (2008). "Physics of liquid jets." Reports on Progress in Physics **71**(3): 79.
- Forliti, D. J., A. Badakhshan, J. Wegener, I. A. Leyva and D. G. Talley (2015). The Response of Cryogenic H₂/O₂ Coaxial Jet Flames to Acoustic Disturbances. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Goepfert, C., J. L. Marie, D. Chareyron and M. Lance (2010). "Characterization of a system generating a homogeneous isotropic turbulence field by free synthetic jets." Experiments in Fluids **48**(5): 809-822.
- Grant, R. P. and S. Middleman (1966). "Newtonian jet stability." AICHE Journal **12**(4): 669-678.
- Haenlein, A. (1931). "über den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles." Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A **2**(4): 139-149.
- Haenlein, A. (1932). "Disintegration of a liquid jet." NACA TM 659.
- Hwang, W. T. and J. K. Eaton (2004). "Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow." Experiments in Fluids **36**(3): 444-454.
- Lichtarowicz, A., R. K. Duggins and E. Markland (1965). "Discharge Coefficients for Incompressible Non-Cavitating Flow through Long Orifices." Journal of Mechanical Engineering Science **7**(2): 210-219.
- Marmottant, P. H. and E. Villermaux (2004). "On spray formation." Journal of Fluid Mechanics **498**: 73-111.
- Matas, J.-P., S. Marty, M. S. Dem and A. Cartellier (2015). "Influence of Gas Turbulence on the Instability of an Air-Water Mixing Layer." Physical Review Letters **115**(7): 074501.
- Merrington, A. C. and E. G. Richardson (1947). "The break-up of liquid jets." Proceedings of the Physical Society **59**(1): 1.
- Pan, Y. and K. Suga (2006). "A numerical study on the breakup process of laminar liquid jets into a gas." Physics of Fluids **18**(5): 052101.
- Plateau, J. (1873). Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires. Paris, Cauthier Villars.
- Rayleigh, L. (1878). "On the instability of jets." Proceedings of the London Mathematical Society **10**: 4-13.
- Sirignano, W. A. and C. Mehring (2000). "Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams." Progress in Energy and Combustion Science **26**(4-6): 609-655.
- Teshome, S., I. Leyva, D. Talley and A. Karagozian (2012). Cryogenic High-Pressure Shear-Coaxial Jets Exposed to Transverse Acoustic Forcing. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Weber, C. Z. (1931). "Disintegration of Liquid Jets/Zum zerfall eines flüssigkeitsstrahles." ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik **11**(2): 136-159.

ABSTRACT

An experimental investigation is conducted which examines the breakup of a water jet under the influence of homogenous and isotropic turbulence without mean flow. The jet was injected by a circular orifice with $Re=823$ and $Re=1029$ and the gas phase turbulence spanned $Re_\lambda=0, 132, 180$ and 207 . It is found that the breakup length of the liquid jet is positively correlated with Re and negatively correlated with Re_λ . Turbulence appears to affect the growth rate of the instability of the liquid jet surface above a critical Re_λ but does not affect the wavelength of the instability for the full range of examined Re_λ . The characteristic diameter of the appears to increase downstream the nozzle exit due to coalescence of successive droplets. The presence of gas phase turbulence increased the collision rates which in turn tripled the rate of growth the droplet diameter with distance from the nozzle compared to the quiescent case for the range of examined Re_λ .