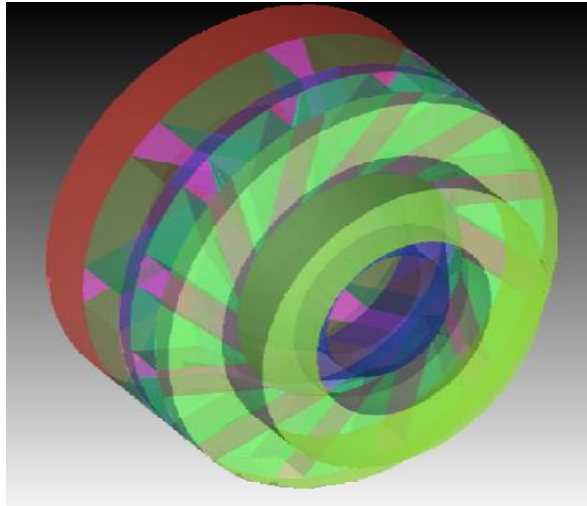


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ**  
**ΙΣΟΘΕΡΜΗΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΟ**  
**ΚΑΥΣΤΗΡΑ RQL**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΤΟΥΛΙΑΤΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**  
**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ**

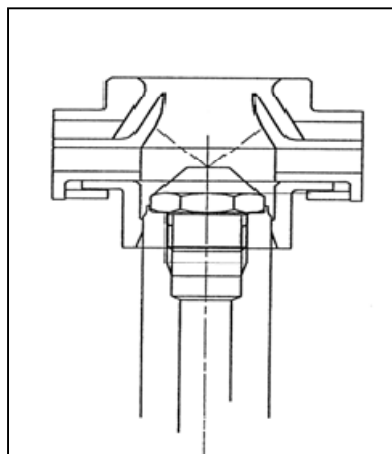
**ΠΑΤΡΑ 2009**

## Περιεχόμενα

Εισαγωγή .....	1
Κεφάλαιο 1: Σχετικά με την τεχνολογία RQL .....	2
Κεφάλαιο 2: Πειραματική Διαδικασία .....	7
2.1 Πειραματική Διάταξη .....	7
2.2 Τεχνική οπτικοποίησης ροής. ....	11
Κεφάλαιο 3: Θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος. ....	24
3.1 Περιγραφή ροής με τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής (Navier - Stokes).....	24
3.2 Γραμμική και τυρβώδης ροή.....	24
3.2.1 Οριακό στρώμα .....	25
3.3 Συσχέτιση μεταφοράς μάζας και μετάδοσης θερμότητας .....	28
3.4 Ροή με αμελητέα σκέδαση ενέργειας.....	28
3.5 Μετάδοση θερμότητας με εξαναγκασμένη ροή σε σωλήνες.....	31
3.5.1 Περίπτωση γραμμικής ροής .....	31
3.5.2 Περίπτωση τυρβώδους ροής .....	33
Κεφάλαιο 4: Σημασία και ορισμός CAD και CFD . ....	35
Κεφάλαιο 5: Διαδικασία σχεδίασης και ελέγχου σε περιβάλλον Ansys. ....	37
5.1 Κυκλικός Δίσκος στη βάση (έξοδο ροής).....	38
5.2 Οκτάοπο Σώμα Διάχυσης .....	41
5.3 Στοιχείο Διαχωρισμού Αέρα άνω και κάτω Διαχυτών .....	45
5.4 Δωδεκάοπο Σώμα Διάχυσης.....	49
5.5 Τμήμα Εισαγωγής και Διαμοιρασμού .....	52
5.6 Τελική Μορφή Μοντέλου.....	54
5.7 Ορισμός Όγκου Ελέγχου .....	55
5.8 Έλεγχος και Διακριτοποίηση .....	55
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	58
Βιβλιογραφία .....	59

## Εισαγωγή

Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να δουλέψει το σχεδιαστικό μοντέλο εξομοίωσης καυστήρα RQL για ισόθερμη ανάμειξη. Το περιβάλλον εργασίας είναι το πρόγραμμα ANSYS ICEM CFD. Πρόκειται για λογισμικό που επιτρέπει στο χειριστή την εισαγωγή κατασκευαστικών στοιχείων και την εξομοίωση συνθηκών ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στον μηχανολογικό τομέα. Τέτοιες είναι : κατανομές πιέσεων, μάζας και θερμοκρασίας με τις αντίστοιχες προεκτάσεις στα πεδία της ρευστομηχανικής, θερμοδυναμικής κ.ο.κ. Παρόλο που η σημερινή τεχνολογία μας επιτρέπει με τα υπολογιστικά μέσα να εξομοιώνουμε συνθήκες και μοντέλα, είναι απαραίτητο το θεωρητικό υπόβαθρο στο σχεδιαστικό τομέα αλλά και στον ενεργειακό προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως το πρόβλημα και να αντιμετωπιστεί κατάλληλα. Ακόμα και όταν όλα τα στοιχεία που έχουν εισαχθεί είναι σωστά, πρέπει να γίνεται σχολαστικός έλεγχος της ορθότητας όλων των παραμέτρων. Το επίκεντρο του ενδιαφέροντος στη συγκεκριμένη εργασία αποτελεί ο σχεδιασμός και η μελέτη των σωμάτων διάχυσης αέρα στο θάλαμο καύσης RQL. Αυτή είναι και η απαίτηση της εργασίας, δηλαδή η λεπτομερειακή μελέτη των συνθηκών και παραμέτρων που πρέπει να εισαχθούν ώστε να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες εισόδου του ρευστού και να ακολουθήσει στο μέλλον η διαδικασία δικτύωσης του μοντέλου (meshing) καθιστώντας δυνατή τη μελέτη της θερμοδυναμικής και ρευστομηχανικής συμπεριφορά του συστήματος καυστήρα – ρευστού.



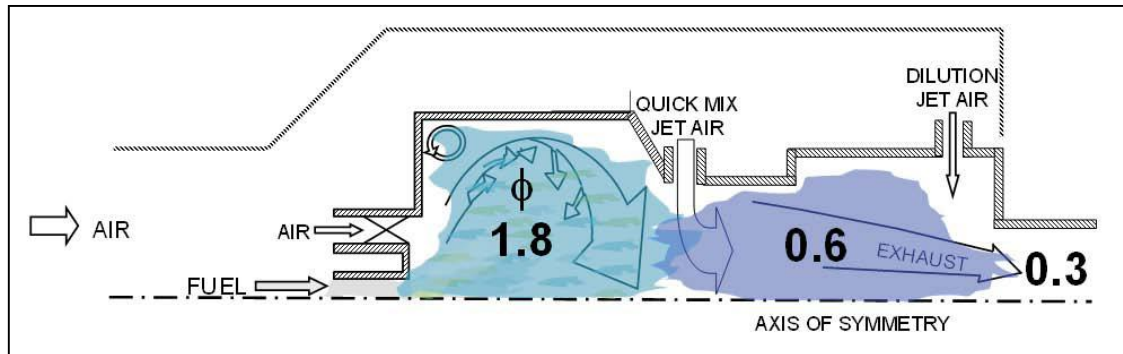
## Κεφάλαιο 1: Σχετικά με την τεχνολογία RQL

Η έννοια του καυστήρα RQL εισηγήθηκε το 1980, ως στρατηγική μείωσης των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) που εκπέμπονται από μηχανές αεροστροβίλων. Τα αρχικά RQL είναι συντομογραφία των λέξεων Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn. Δηλαδή προσδιορίζουν τον τρόπο καύσης διαδικαστικά ως εξής: πλούσια καύση, γρήγορη ανάμειξη, πτωχή καύση. Στη δεκαετία του '90 η NASA έδειξε ενδιαφέρον γι' αυτούς τους καυστήρες για την ελάττωση των οξειδίων του αζώτου, ως εφαρμογή σε κινητήρες προώθησης αερίων επόμενης γενιάς. Σήμερα η τεχνολογία RQL είναι η βασική τεχνολογία καύσης σε αεριοκινητήρες που διατίθενται εμπορικά από την Pratt & Whitney με την επωνυμία TALON (Technology for Advanced Low  $\text{NO}_x$ ). Η τεχνολογία RQL προτιμάται σαν εφαρμογή σε αεριοκινητήρες κυρίως λόγω μεγαλύτερης ασφάλειας και πιο σταθερού κύκλου λειτουργίας σε σχέση με επιλογές πτωχών μειγμάτων προανάμειξης.

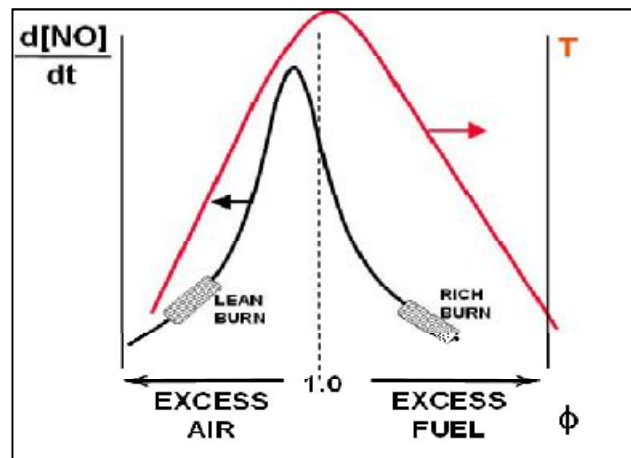
Παρόλο που σε στατικές εφαρμογές η τεχνολογία προανάμειξης πτωχών μειγμάτων είναι πιο διαδεδομένη καθώς δεν υπάρχουν θέματα ασφαλείας και σημαντικά μεγάλες διαφορές, οι καυστήρες RQL τυγχάνουν διαρκούς αυξανόμενου ενδιαφέροντος γι' αυτές τις εφαρμογές γιατί: 1) μπορούν να επεξεργαστούν πιο αποτελεσματικά πολύπλοκης σύνθεσης καύσιμα και 2) γιατί μπορούν να επεξεργαστούν καύσιμα μεταβαλλόμενης σύνθεσης. Ο τελευταίος λόγος είναι αυτός που έχει κερδίσει και σημαντικό μερίδιο του ενδιαφέροντος για τους RQL, καθώς αυξάνεται ο ανταγωνισμός για τα καύσιμα και κερδίζουν έδαφος εναλλακτικά καύσιμα όπως καύσιμα βιομάζας. Αλλά και η αυξανόμενη χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου είτε ως συμπλήρωμα σε οικιακές ενεργειακές ανάγκες, είτε ως αποκλειστική προέλευση φυσικού αερίου σε μεγάλες περιοχές ή ακόμα και χώρες, χρήζουν ενδιαφέροντος της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Η τεχνολογία RQL στηρίζεται στην προϋπόθεση ότι η αρχική ζώνη καυστήρα αεροστροβίλου λειτουργεί πιο αποτελεσματικά με αναλογίες πλούσιας ανάμειξης (Σχήμα 1.1). Πρώτα, μία συνθήκη πλούσιας καύσης στην αρχική ζώνη με αναλογία  $\Phi=1,8$  για παράδειγμα βελτιώνει τη

σταθερότητα της αντίδρασης της καύσης με την παραγωγή και διατήρηση υψηλής συγκέντρωσης υδρογόνου και υδρογονανθράκων. Έπειτα, η συνθήκη πλούσιας καύσης ελαχιστοποιεί την παραγωγή οξειδίων του αζώτου λόγω των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών και χαμηλής περιεκτικότητας οξυγόνου (Σχήμα 1.2).



(Σχήμα 1.1 – RQL καυστήρας με αναλογία καυσίμου-αέρα  $\Phi$ )

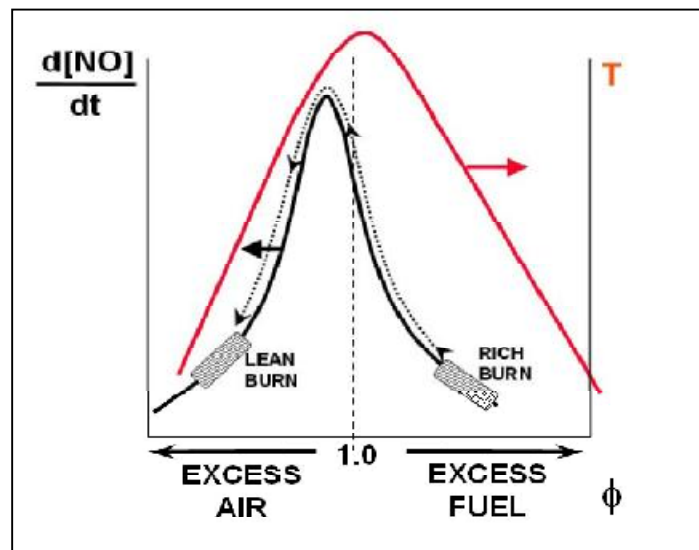


(Σχήμα 1.2- Σχηματισμός οξειδίων του αζώτου)

Τα παράγωγα που προέρχονται από την πλούσια αρχική ζώνη έχουν υψηλή συγκέντρωση σε μερικώς οξειδωμένους και μερικώς πυρολυμένους υδρογονάνθρακες, υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Ως αποτέλεσμα τα παράγωγα αυτά δεν μπορούν να διαφύγουν χωρίς να έχουν επεξεργαστεί περαιτέρω. Συγκεκριμένα, χρειάζεται η προσθήκη οξυγόνου για να

οξειδωθούν οι υψηλές συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα, του υδρογόνου και των υδρογονανθράκων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό σημαντικού ποσού αέρα από τα τοιχώματα, ο οποίος αναμιγνύεται με τα παράγωγα της αρχικής ζώνης και δημιουργεί συνθήκη πτωχής καύσης προτού διαφύγουν τα καυσαέρια. Σε ιδανική κατάσταση, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή καυσαερίων που αποτελούνται από τα κύρια παράγωγα της καύσης ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) και μια συγκέντρωση ρύπων ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ) που τείνει στο μηδέν.

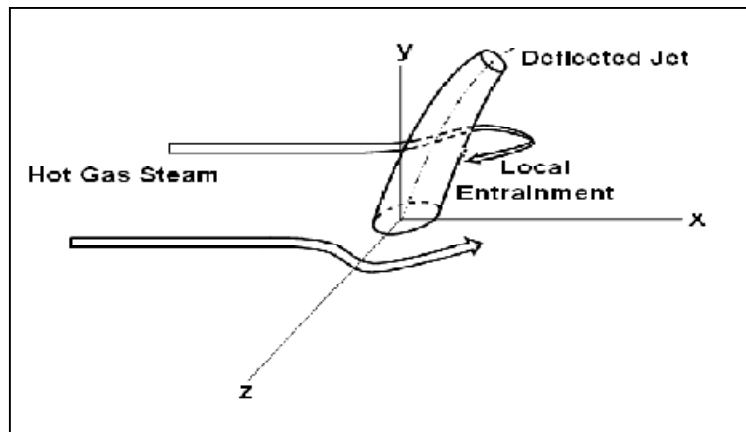
Σημαντική πρόκληση στο σχεδιασμό ενός καυστήρα RQL είναι το τμήμα της γρήγορης ανάμειξης. Η επιτυχία του RQL βρίσκεται στην αποτελεσματικότητα της ανάμειξης του αέρα με τα παράγωγα της αρχικής ζώνης. Αυτή ακριβώς είναι και το στάδιο που προσπερνά τις πιο προσοδοφόρες συνθήκες υψηλής παραγωγής οξειδίων του αζώτου. Η ταχεία αυτή ανάμειξη του αέρα στο παράγωγο της πλούσιας καύσης επιβάλλεται ώστε να δημιουργήσει τάχιστα τις συνθήκες πτωχού μείγματος (Σχήμα 1.3).



(Σχήμα 1.3)

Το ενδιαφέρον στη ζώνη γρήγορης ανάμειξης σε καυστήρα RQL είχε ως αποτέλεσμα την εστίαση στις εκτοξευόμενες φλέβες ή δέσμες (jets) σε μελέτες διασταυρούμενης ροής. Μια τέτοια περίπτωση μονού κυκλικού jet σε διασταυρούμενη ροή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.4). Η δέσμη εισέρχεται στη ροή και εκτρέπεται κατάντη ως αποτέλεσμα της

ορμής της διασταυρούμενης ροής. Μια ζώνη ανακυκλοφορίας μπορεί να σχηματιστεί στο κατάντη οπισθόρευμα του πλησιέστερου τοιχώματος. Η ακτινική έκταση της διείσδυσης της δέσμης εξαρτάται από τη γωνία που σχηματίζει με τη ροή και την εισερχόμενη ορμή της δέσμης που αντιτίθεται στην ορμή της ροής.



(Σχήμα 1.4 – Μονό jet σε διασταυρούμενη ροή)

Εμπειρικές συσχετίσεις από πειράματα έχουν αποδείξει την εξής σχέση για τη μέγιστη διείσδυση μονής φλέβας:

$$Y_{max} = 1.15(dj)(J^{0.5})\sin\theta$$

Όπου :

- $Y_{max}$  = μέγιστη ακτινική διείσδυση της κεντρικής γραμμής της δέσμης
- $dj$  = διάμετρος ακροφυσίου της εισερχόμενης δέσμης
- $J$  = λόγος ορμής ροής δέσμης προς ορμή κύριας ροής  

$$\frac{\rho_{jet} \cdot V_{jet}^2}{\rho_{main} \cdot V_{main}^2}$$
- $P$  = πυκνότητα
- $V$  = ταχύτητα
- $\theta$  = γωνία εισόδου της δέσμης

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλαπλά jet, η αλληλεπίδρασή τους καθορίζει κατά ένα σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά της ανάμειξης. Για πολλαπλά jet σε σωληνοειδή αγωγό, προκειμένου να υπολογιστεί η διείσδυση μιας μονής εκτοξευόμενης φλέβας και λαμβάνοντας υπόψη τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση, έχει βρεθεί ότι:

$$Y_{max} = 1.25(dj)(J^{0.5})MR$$

Όπου:

MR = λόγος ροής μάζας δέσμης προς ροή μάζας κύριας ροής.

Ο λόγος ροών μάζας MR είναι πολύ μεγαλύτερος για έναν καυστήρα RQL (περίπου 2,5) απ' ό τι σε ένα συμβατικό καυστήρα (MR περίπου 0.25). Αφού η πυκνότητα  $\rho$  και ο λόγος ορμών ροής jet προς κύρια ροή J, θα είναι περίπου ίδιες και για τους καυστήρες, η μεγαλύτερη τους διαφορά όσον αφορά τις δέσμες (jets) είναι το μέγεθος του στομίου.

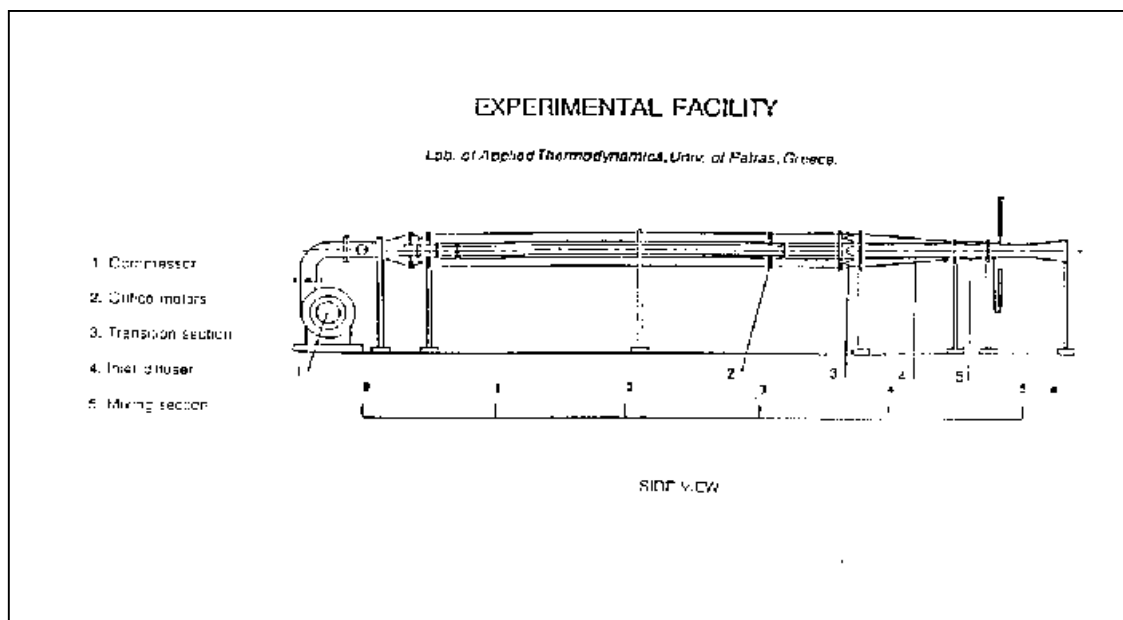
Η βελτιστοποίηση της ανάμειξης επίσης εξαρτάται τόσο από γεωμετρικά χαρακτηριστικά (σχήμα και πλήθος στομίων και η τοποθέτησή τους εκατέρωθεν ενός άξονα – μορφή ζιγκ ζαγκ), όσο και από χαρακτηριστικά λειτουργίας (για παράδειγμα ορμή ροής, πυκνότητα, ροή μάζας). Έτσι σαν άριστη ανάμειξη ορίζεται η μικρότερη αξονική απόσταση από το αντίθετα στο ρεύμα χείλος του στομίου του jet, όπου λαμβάνει χώρα ένα ομοιόμορφο ακτινικό προφίλ από σημαντικούς παράγοντες ανάμειξης (όπως η θερμοκρασία και η συγκέντρωση σωματιδίων), με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση παραγωγής οξειδίων του αζώτου. Η εφαρμογή ισόθερμης ανάμειξης σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας δίνει υψηλή απόδοση στον καυστήρα RQL και χαμηλή εκπομπή οξειδίων του αζώτου.



## Κεφάλαιο 2: Πειραματική Διαδικασία

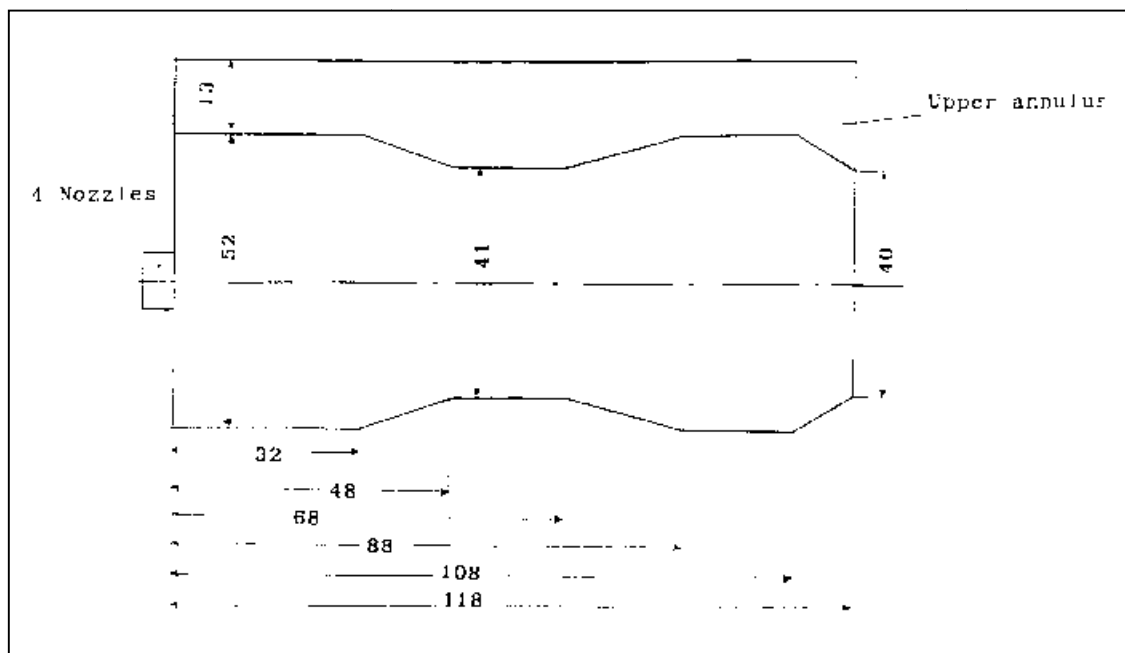
### 2.1 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική συσκευή που έλαβαν χώρα πειράματα ισόθερμης ανάμειξης φαίνεται στο Σχήμα 2.1 . Πρόκειται για αεροσήραγγα ανοιχτού κυκλώματος, τριών αγωγών με δύο φυγοκεντρικούς συμπιεστές. Η μέγιστη παροχή μάζας είναι 0.16 kg/s σε συνθήκες υπερπίεσης 0.5 bar . Με σύστημα βαλβίδων η παροχή του αέρα χωρίζεται στο ρεύμα της εκτοξευόμενης δέσμης (jetstream) - δευτερεύουσα ροή και στο κυρίως ρεύμα. Για την περίπτωση όπου παίρνονται μετρήσεις για την κατανομή της θερμότητας, το κύριο ρεύμα αέρα έχει θερμανθεί ελαφρώς σε σχέση με τη δευτερεύουσα ροή. Τρεις ανεξάρτητα ελεγχόμενες κυλινδρικές παροχές αέρα προμηθεύουν τους δύο δακτυλίους και το κύριο ρεύμα. Οι αντίστοιχες μετρήσεις ροής γίνονται με τρία στόμια (μετρητές) με ακρίβεια καλύτερη από 2%. Το άνω και κάτω ρεύμα jet και η κύρια ροή, περνούν διαδοχικά από θαλάμους καθίζησης και κυσέλες, έπειτα εκτρέπονται σε ορθογώνιους μετασχηματιστές και καταλήγουν στο ορθογώνιο τμήμα ανάμειξης.



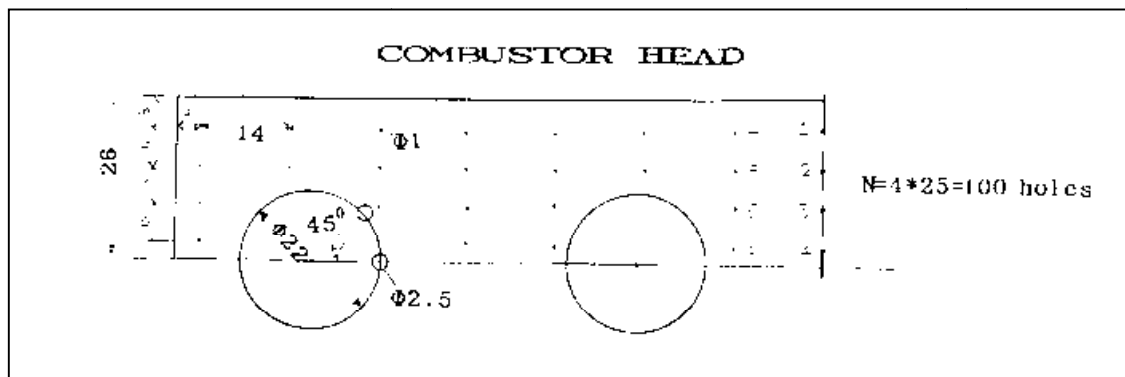
Σχήμα 2.1

Το μοντέλο στο οποίο γίνονται οι δοκιμές φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Το ορθογώνιο μοντέλο εξομοιώνει το δακτυλιοειδές τμήμα ενός καυστήρα RQL. Στο διαχωρισμό της ροής στο μοντέλο ανάμειξης λήφθηκαν υπ' όψη μοντέλα θερμής ροής καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ισόθερμης ροής. Τα χαρακτηριστικά ψυχρής ροής κυρίως επηρέασαν το ποσοστό της συνολικής ροής που μοιράζεται στο κυρίως ρεύμα, στους δύο δακτυλίους και στη γεωμετρία και κατανομή των οπών ψύξης του αγωγού. Ειδικότερα, οι ρυθμοί ροής του κυρίως ρεύματος και του ρεύματος εκτοξευόμενης δέσμης, κατανέμονται διαφορετικά στο πείραμα σταθεράς πυκνότητας, έτσι ώστε να αποκτήσουν ιδανικές αναλογίες ορμής με την συνθήκη καύσης όπου η συγκέντρωση των ρευμάτων διαφέρει σημαντικά. Η ροή στους δακτυλίους χωρίζεται σε τρία μέρη, (ψύξη πλούσιου μείγματος, ψύξη πτωχού μείγματος και ροή έγχυσης εκτοξευόμενης δέσμης). Η ροή στο κυρίως ρεύμα επίσης υποδιαιρείται σε ροή ψύξης, σε εξαερωτήρες και σε ροή ψύξης στην κεφαλή του καυστήρα.

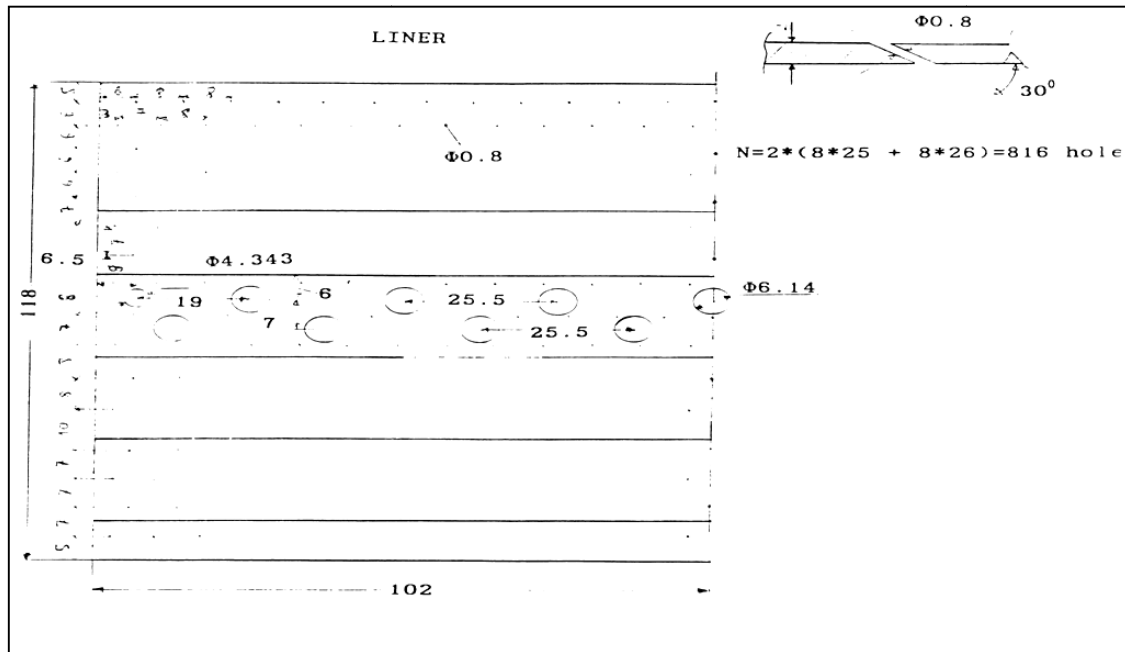


Σχήμα 2.2

Τέσσερις εξαερωτήρες είναι τοποθετημένοι στην κεφαλή του καυστήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η οποία ψύχεται με πρόσπτωση ψύξης. Ο ψυχρός αέρας εισέρχεται στην κύρια ζώνη από 32 οπές που βρίσκονται γύρω από τους εξαερωτήρες. Αυτός ο αέρας χρησιμοποιείται εκεί επίσης για την περίπτωση της καύσης. Η γεωμετρία των οπών πρόσπτωσης ψυχρού αέρα φαίνεται επίσης στο Σχήμα 2.3. Κάθε αγωγός ψύχεται με διάχυση. Η σχεδιάσή τους φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Αυτές οι ψυκτικές οπές έχουν κλίση 30 μοιρών. Η περιοχή έγχυσης εκτοξευόμενης φλέβας (jet), αποτελείται από δύο σειρές οπών με εναλλάξ διάταξη όπως φαίνεται επίσης στο Σχήμα 2.4. Διάφορες φωτογραφίες της πειραματικής διάταξης και του plexiglass μοντέλου παρουσιάζονται στα σχήματα 2.5 , 2.6 .



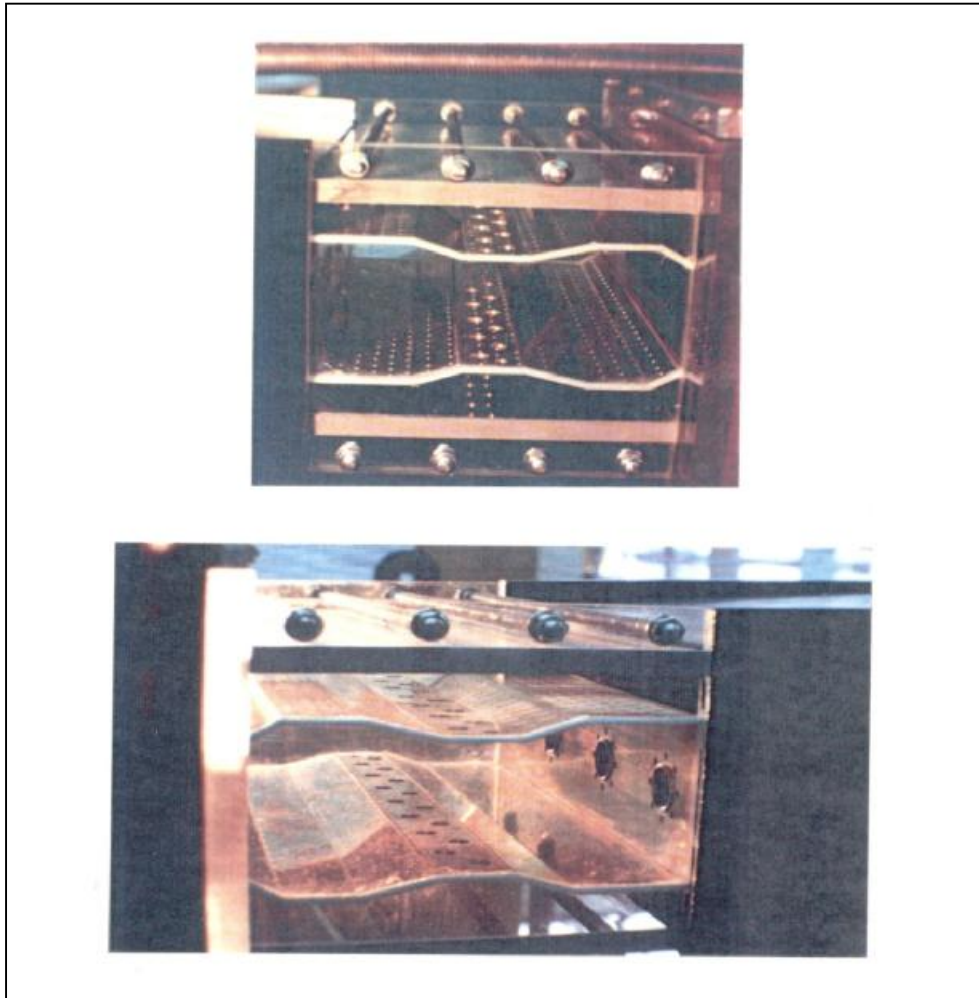
Σχήμα 2.3



Σχήμα 2.4



Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6

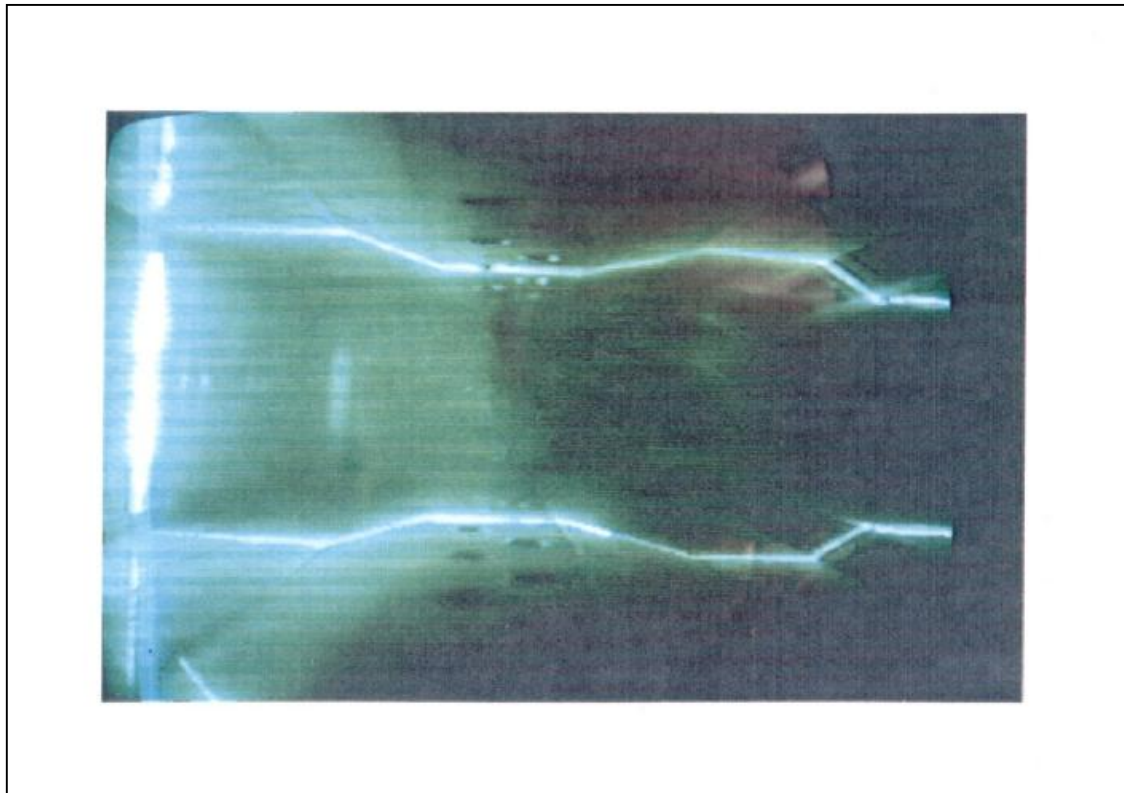
## 2.2 Τεχνική οπτικοποίησης ροής.

Ο λόγος  $J$ , της ορμής των jets προς την ορμή της κυρίως ροής είναι η μεταβλητή – κλειδί σύμφωνα με την οποία διεξάγεται το πείραμα της ισόθερμης ανάμειξης. Οι τιμές που παίρνει κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι  $J=80$ ,  $100$  και  $120$ . Ο λόγος για τον οποίο η οπτική παρακολούθηση είναι σημαντική και εξέχουσας σημασίας, είναι επειδή βοηθά στην επίλυση ορισμένων πτυχών της ροής όπως: περιοχές ανακυκλοφορίας, διείσδυση εκτοξευόμενης δέσμης, αλληλεπίδραση αντιτιθέμενων εκτοξευόμενων δεσμών, αλληλεπίδραση μεταξύ jet και κυρίως ρεύματος ροής. Η ποιοτική περιγραφή του οπτικού αποτελέσματος ενισχύει την κατανόηση της φυσικής

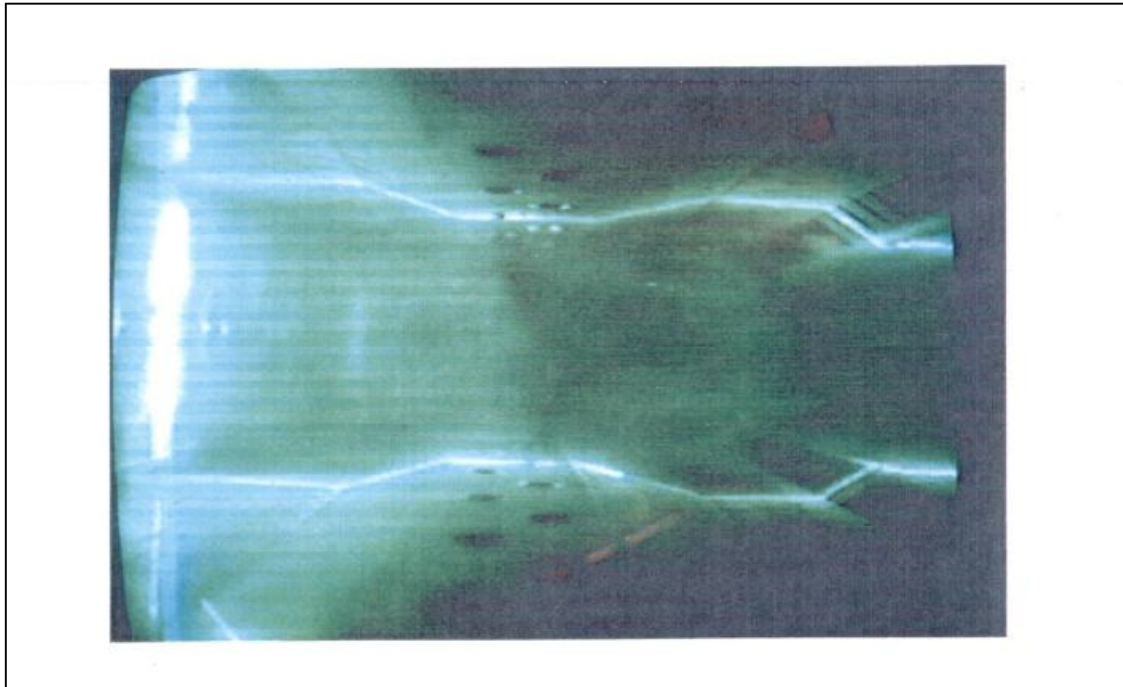
στο εσωτερικό της ροής, αλλά και αναδεικνύει περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τις οποίες μπορούν να γίνουν πιο εκτεταμένες μετρήσεις. Ως προς τη διαδικασία οπτικοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια οξειδίων του μαγνησίου τα οποία φωτιζόμενα με laser ιόντων Αργού (Argon-ion laser) 4 Watt και με τη βοήθεια συστήματος κατόπτρων και φακών, έδωσαν τα απαραίτητα στοιχεία για την κατανομή τους στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο. Χρησιμοποιήθηκε camera υψηλής ταχύτητας για την καταγραφή διαδοχικών εικόνων των σχηματισμών του αποτελέσματος της ανάμειξης, όπως και συσκευή εγγραφής και χρονομέτρησης των εικόνων αυτών.

Τα Σχήματα 2.7 έως 2.16 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης για όλες τις συνθήκες που μελετήθηκαν. Από αυτές τα Σχήματα 2.7 έως 2.12 αντιστοιχούν σε συνθήκη λόγου ορμής υψηλής τιμής ( $J=120$ ) και τα Σχήματα 2.12 έως 2.16 σε διαμορφώσεις ροής χαμηλής τιμής λόγου ορμής ( $J=80$ ). Και στις δύο περιπτώσεις επίπεδα κατά μήκος της κύριας ροής αλλά και κατά πλάτος (οριζόντια και κάθετα) φωτίστηκαν, καθώς και εγκάρσια επίπεδα υπό δεξιά γωνία της ροής. Σε όλες τις περιπτώσεις δημιουργήθηκε λεπτή λωρίδα φωτός laser πάχους περίπου 2mm, επιτρέποντας έτσι τη μελέτη της ροής σε κάθε επίπεδο. Το ίχνος που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση, εγχύθηκε σε καθένα από τα τρία ρεύματα ξεχωριστά, σε ανεκτή απόσταση από το τη ζώνη ανάμειξης στο μοντέλο, ώστε να ελαχιστοποιηθούν εμπόδια στη ροή και να παραχθεί καθαρή εικόνα της διαδικασίας.

Στο Σχήμα 2.7 πραγματοποιείται ροή στο κεντρικό αζιμουθιακό επίπεδο στο μοντέλο ανάμειξης. Τα ίχνη οξειδίων του μαγνησίου διοχετεύονται μόνο στην κύρια ροή, ώστε να παρατηρηθεί ο ρυθμός μεταβολής θέσης σημείων πάνω σε ροϊκές γραμμές δημιουργώντας μία καμπύλη (streakline). Οι εκτοξευόμενες φλέβες στο επίπεδο συμμετρίας φαίνονται ως σκοτεινές περιοχές στο κέντρο της φωτογραφίας, εγκάρσια στον άξονα της ροής. Οι ζώνες ανακυκλοφορίας παρατηρούνται στις περιοχές αλληλεπίδρασης της κύριας ροής και της ροής εκτοξευόμενων φλεβών, ανάντη του άνω jet που έχει κατεύθυνση προς τα κάτω και κατάντη του κάτω jet που έχει κατεύθυνση προς τα πάνω και εγγύς του κάτω τοιχώματος.



Σχήμα 2.7(i)

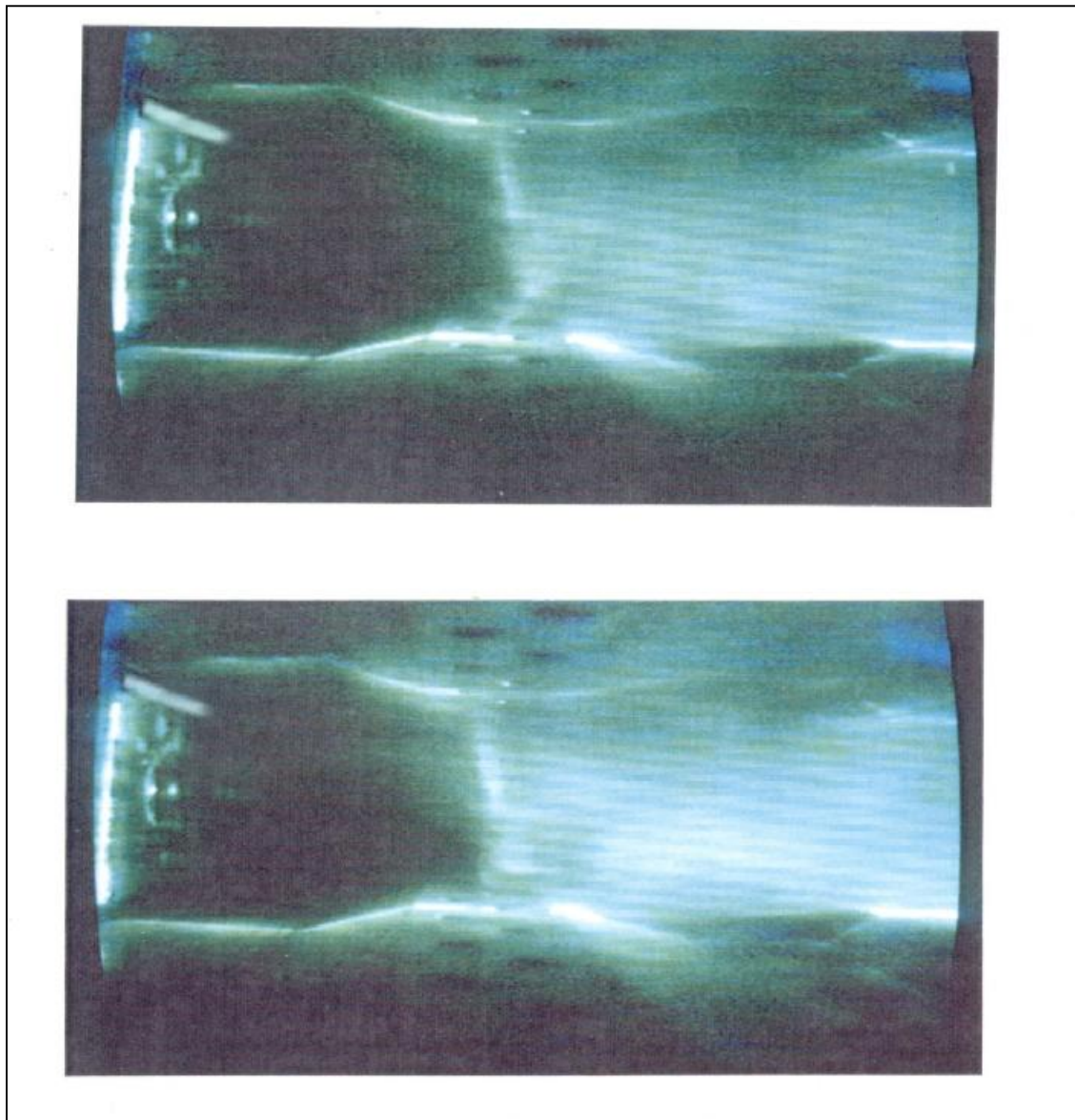


Σχήμα 2.7(ii) – οι φωτογραφίες των σχημάτων 2.7 αφορούν οπτικοποίηση του κυρίου ρεύματος για  $z=0(\text{mm})$ ,  $J=120$ ,

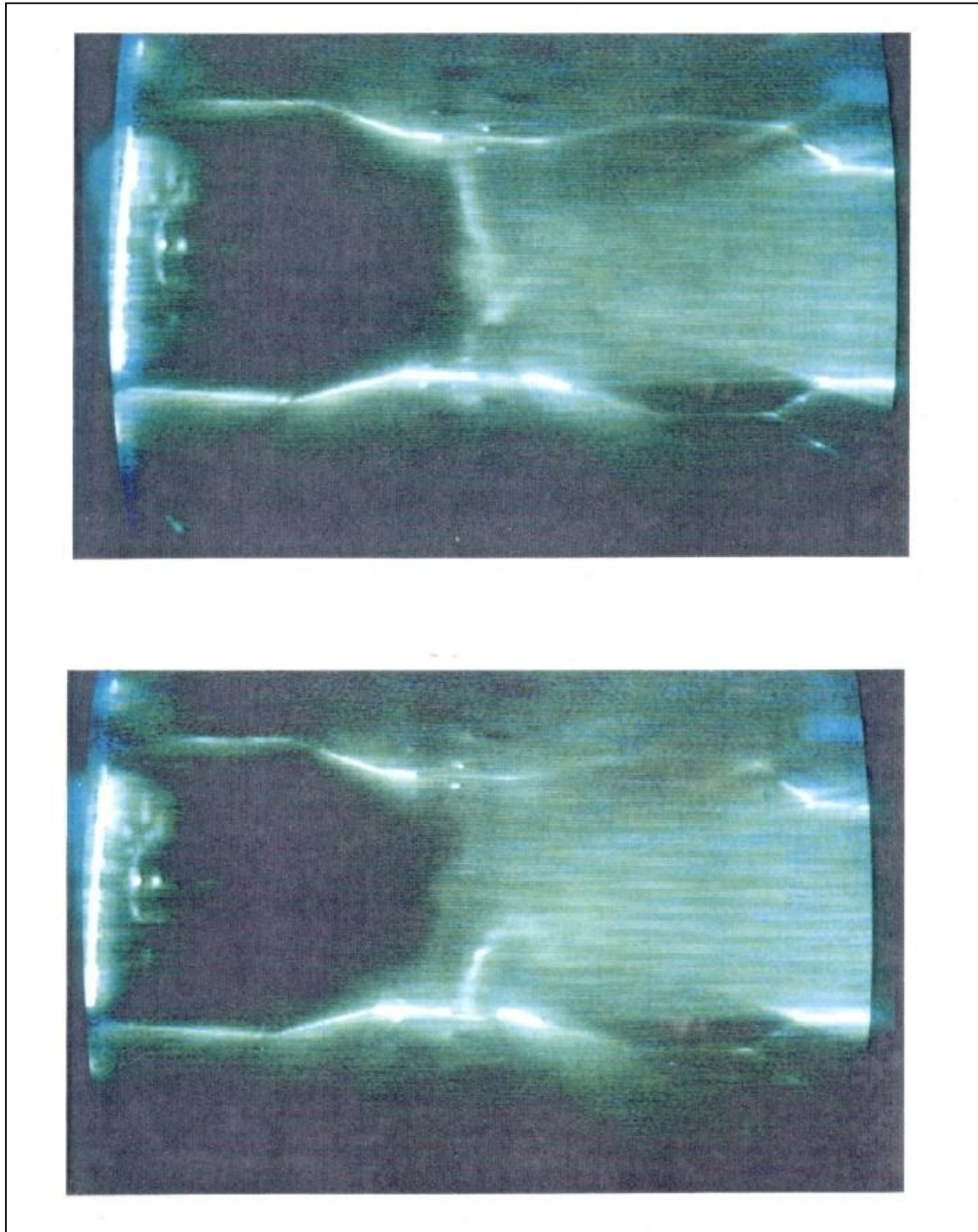
Στις φωτογραφίες του Σχήματος 2.8 η διοχέτευση ιχνών  $\text{MgO}$ , έγινε μόνο στην άνω και κάτω δακτυλιοειδή ροή. Σε αυτές οι πρώτες δύο εμφανίζουν την αλληλεπίδραση των δύο jet ενώ οι δύο τελευταίες δείχνουν την κίνηση κάθε εκτοξευόμενης δέσμης ξεχωριστά. Η θέση όπου οι δύο δέσμες ενώνονται βρίσκεται κάτω από την κεντρική γραμμή της ροής πιο κοντά στο κάτω τοίχωμα και το κάτω jet εκτρέπεται μερικώς ανάντη και κυρίως κατάντη του κυρίου ρεύματος ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασής του με το άνω jet. Στο διάστημα μεταξύ των δύο jet και πάνω από την περιοχή όπου ενώνονται, δημιουργείται μία περιοχή αριστερόστροφης ανακυκλοφορίας. Η ροή αέρα από τους αγωγούς άνω και κάτω, δημιουργεί ένα ψυκτικό φιλμ στο εσωτερικό των αγωγών προσκείμενο στα οριζόντια τοιχώματα και το οποίο φαίνεται με έντονο πράσινο χρώμα. Όπως φαίνεται και στο σημείο της πρώτης στένωσης, αυτό το φιλμ διεισδύει σε σημαντικό βάθος και συμβάλλει σημαντικά στην ανάμειξη με το κυρίως ρεύμα. Στα Σχήματα 2.9 και 2.10 εμφανίζεται σχηματικά η ροή για αζιμουθιακό επίπεδο



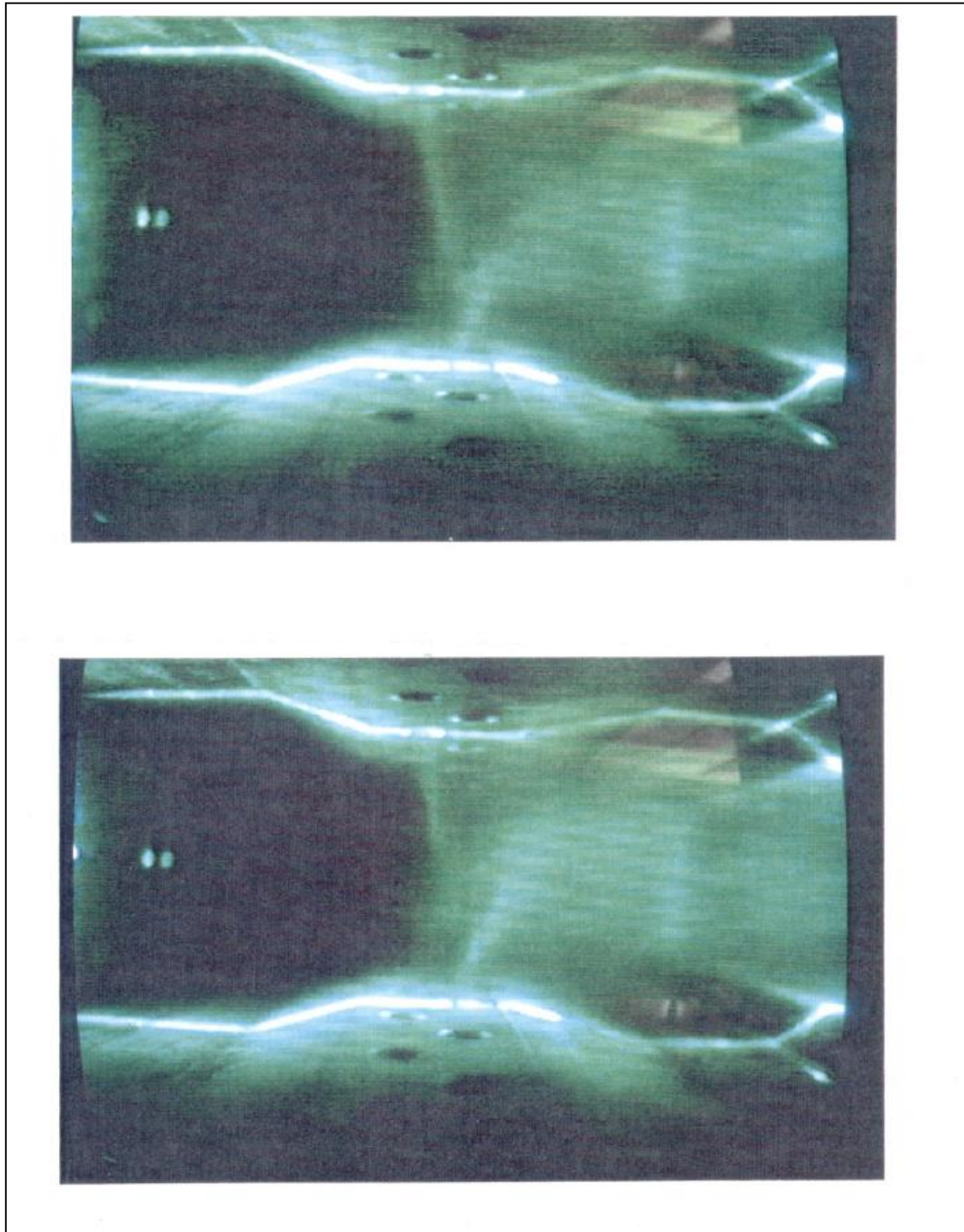
αντίστοιχα με τιμή  $z=-30$  (όπου και συμπίπτει με συμμετρικό επίπεδο κεντρικού στροβιλιστή και  $z=-50$  (το αζιμουθιακό επίπεδο στο κέντρο των στροβιλιστών). Στο Σχήμα 2.9 διακρίνονται λεπτομέρειες της διάχυσης των φλεβών ψύξης και της διαδικασίας ανάμειξής τους στα άνω και κάτω τοιχώματα. Αποτέλεσμα της μελέτης των εικόνων στα σχήματα 2.8 έως 2.10 είναι η διαφορά στον  $y$  άξονα όπου ενώνονται τα jet λόγω της επίδρασης των στροβιλιστών στην κυκλοφορία της κύριας ροής.



Σχήμα 2.8(i) – οπτικοποίηση αλληλεπίδρασης των jet,  $z=0(\text{mm})$ ,  $J=120$

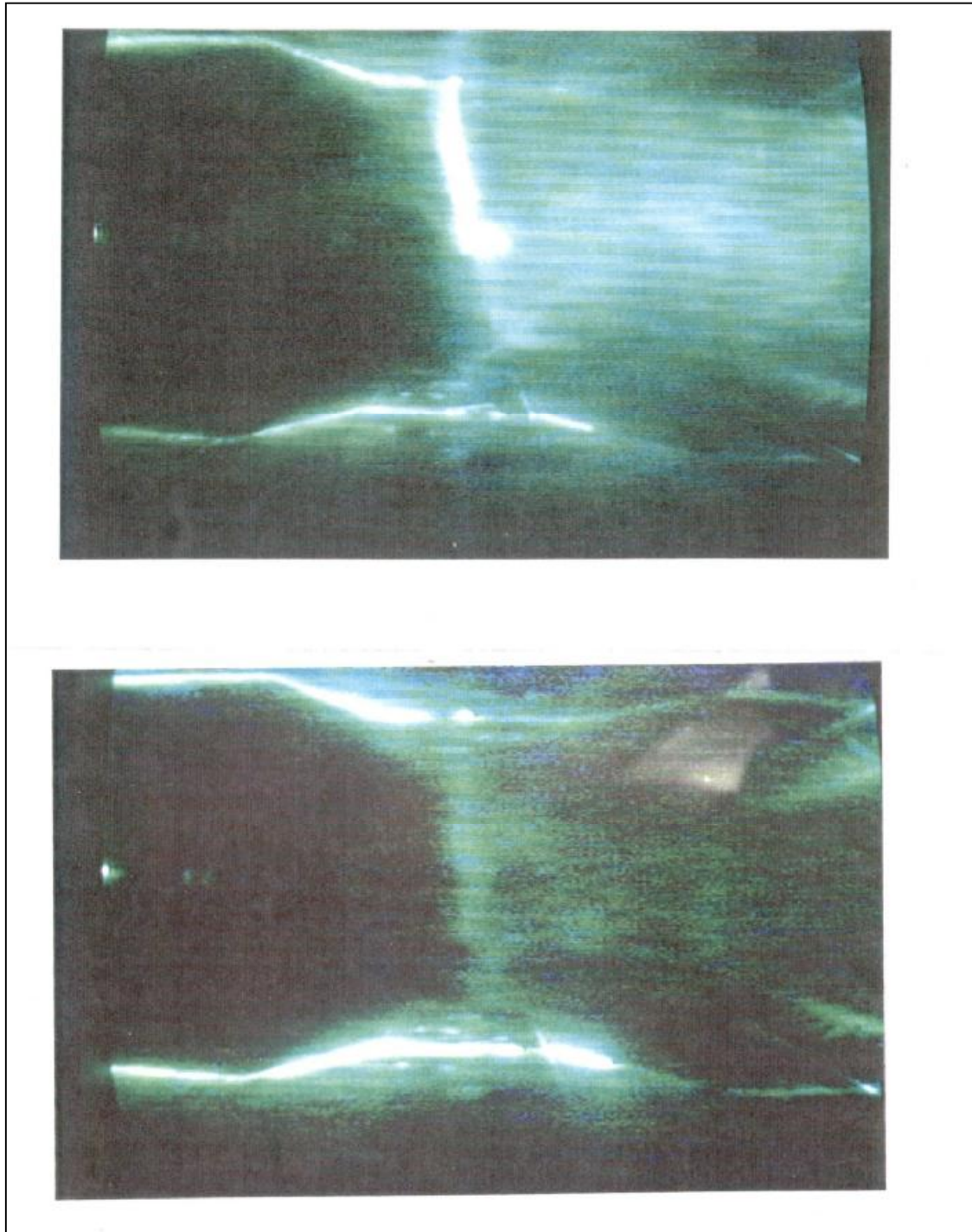


Σχήμα 2.8(ii) – οπτικοποίηση ξεχωριστά για το άνω και κάτω jet αντίστοιχα,  $z=0(\text{mm})$ ,  $J=120$



Σχήμα 2.9 – οπτικοποίηση ροής jet για  $z=-30(\text{mm})$ ,  $J=120$

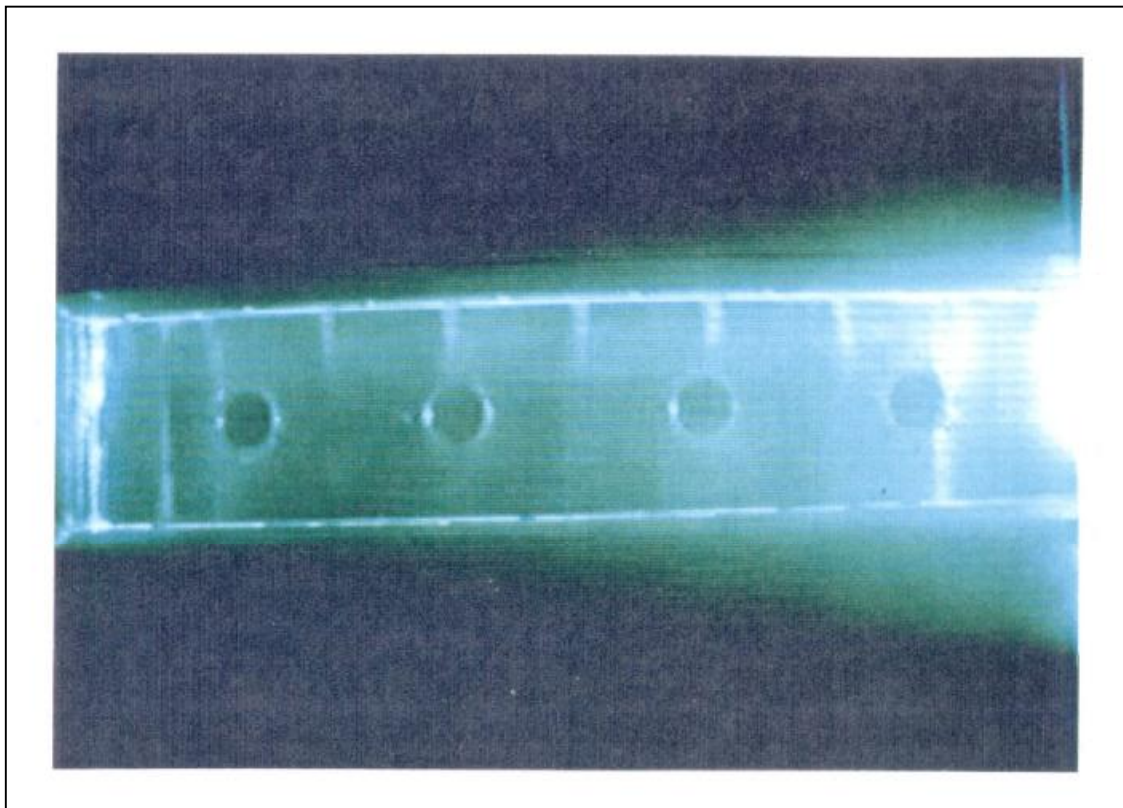




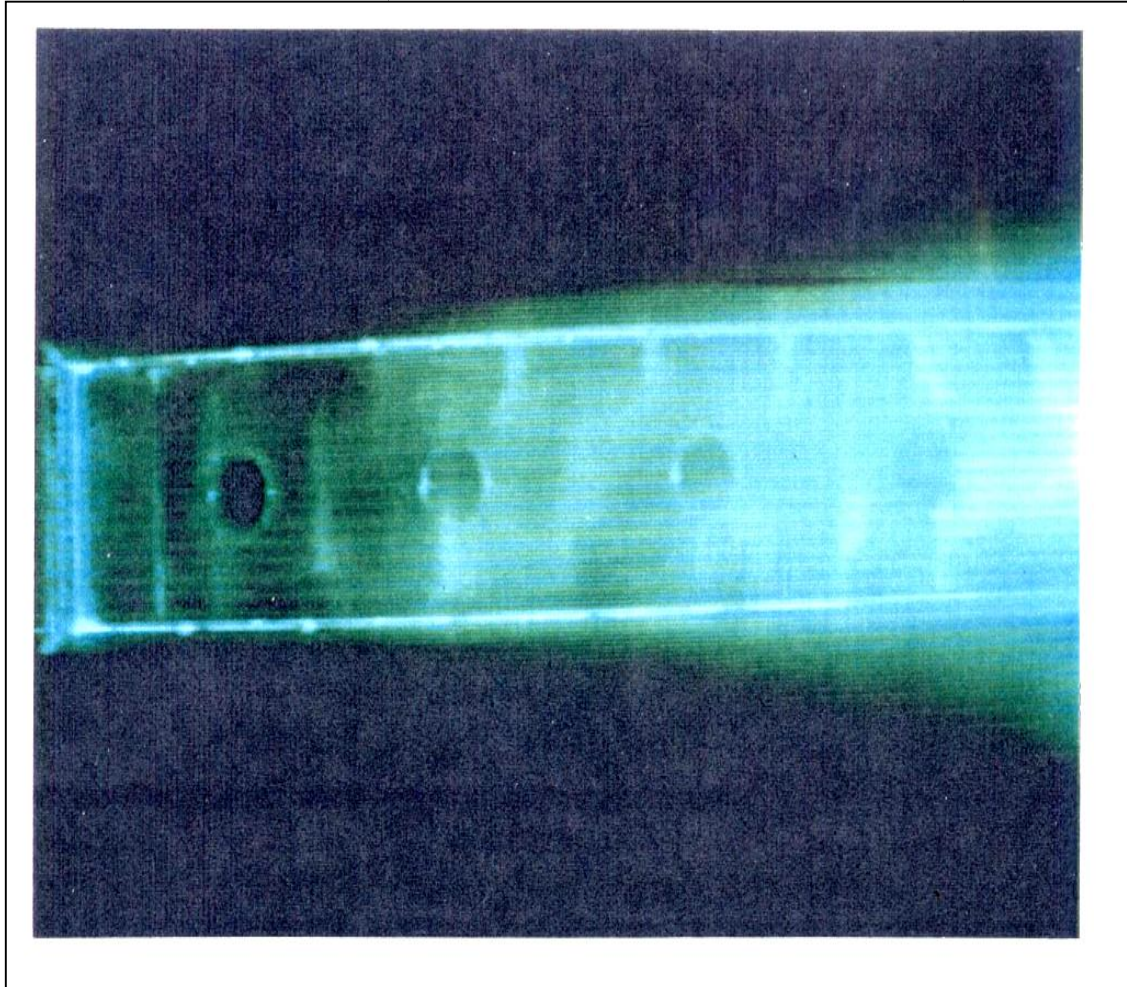
Σχήμα 2.10 – οπτικοποίηση ροής jet για  $z=-50(\text{mm})$ ,  $J=120$

Στα Σχήματα 2.11 και 2.12 τα φωτιζόμενα εγκάρσια επίπεδα συμπίπτουν με τα αξονικά επίπεδα του πρώτου και του δεύτερου στοίχου των εγχυόμενων jet αντίστοιχα. Παρατηρείται η αριστερόστροφη εκτροπή της κύριας ροής

από την εναλλάξ τοποθέτηση των jet και τον στροβιλισμό τους από τους στροβιλιστές. Σημαντική παρατήρηση είναι επίσης ότι όταν η αναλογία διοχέτευσης είναι χαμηλή, δημιουργούνται περιοχές υψηλής αλληλεπίδρασης, μεταξύ των εκτοξευόμενων δεσμών και των στροβιλιζόμενων μαζών, περιφερειακά των κεντρικών ζωνών αξονικής περιστροφής. Αυτό είναι ένα πολύ χρήσιμο στοιχείο, που βοηθά στη σωστή κατανομή του άκαυστου καυσίμου στην περιοχή πτωχού μείγματος. Τα ποιοτικά συμπεράσματα που λαμβάνονται από τη μελέτη των φωτογραφιών των σχημάτων 2.13 έως 2.16 δείχνουν (για  $J=80$  και διάφορες αποστάσεις του άξονα  $z$ ) ότι οι σχηματισμοί της ροής είναι παρόμοιοι με αυτούς της υψηλής αναλογίας διοχέτευσης, με την διαφορά της αλλαγής της θέσης της περιοχής ανακυκλοφορίας και του βάθους διείσδυσης των εκτοξευόμενων δεσμών ανάμειξης.

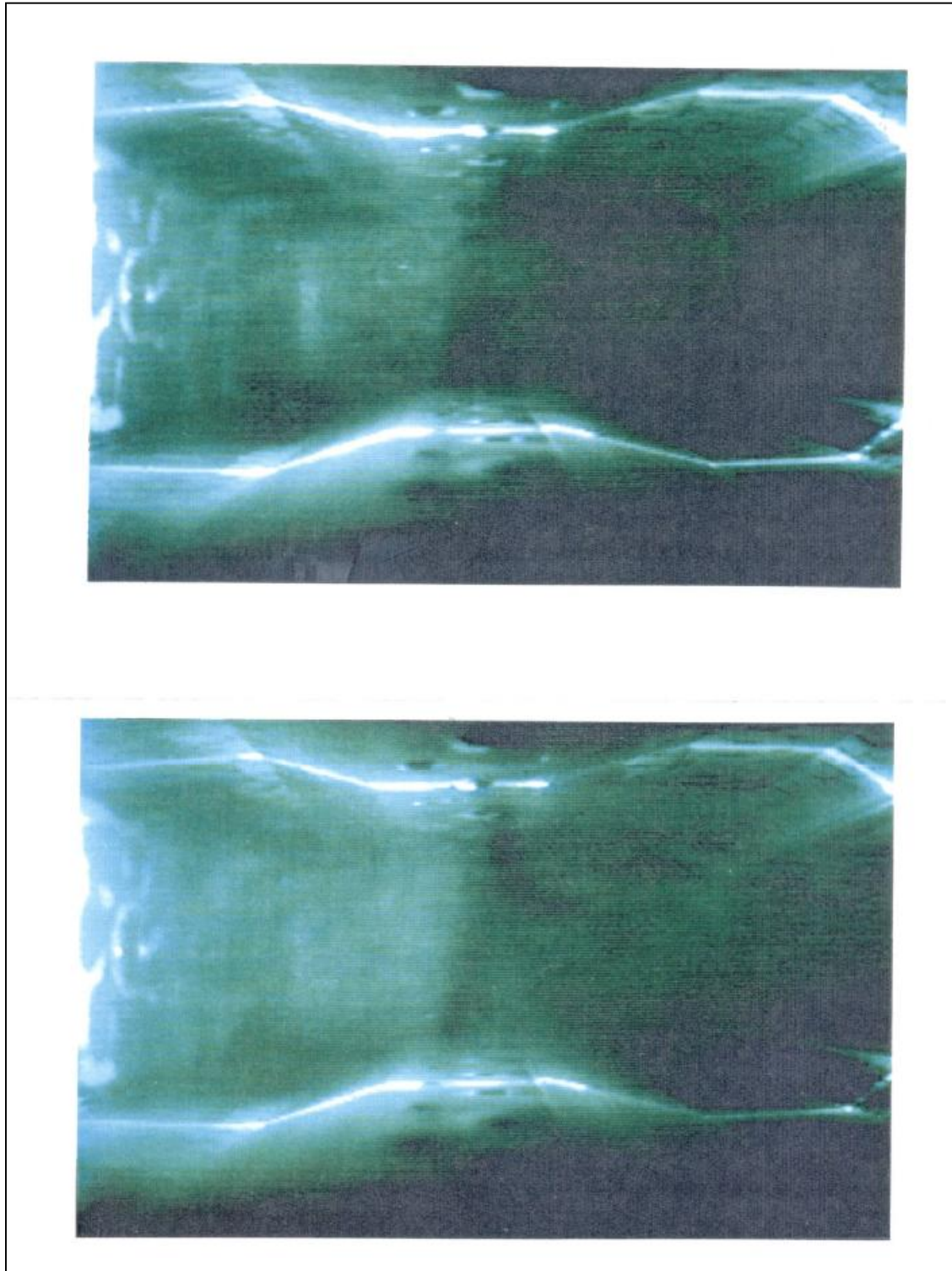


Σχήμα 2.11- οπτικοποίηση ροής jet για  $x=54(\text{mm})$ , (πρώτη σειρά στοίχων),  $J=120$

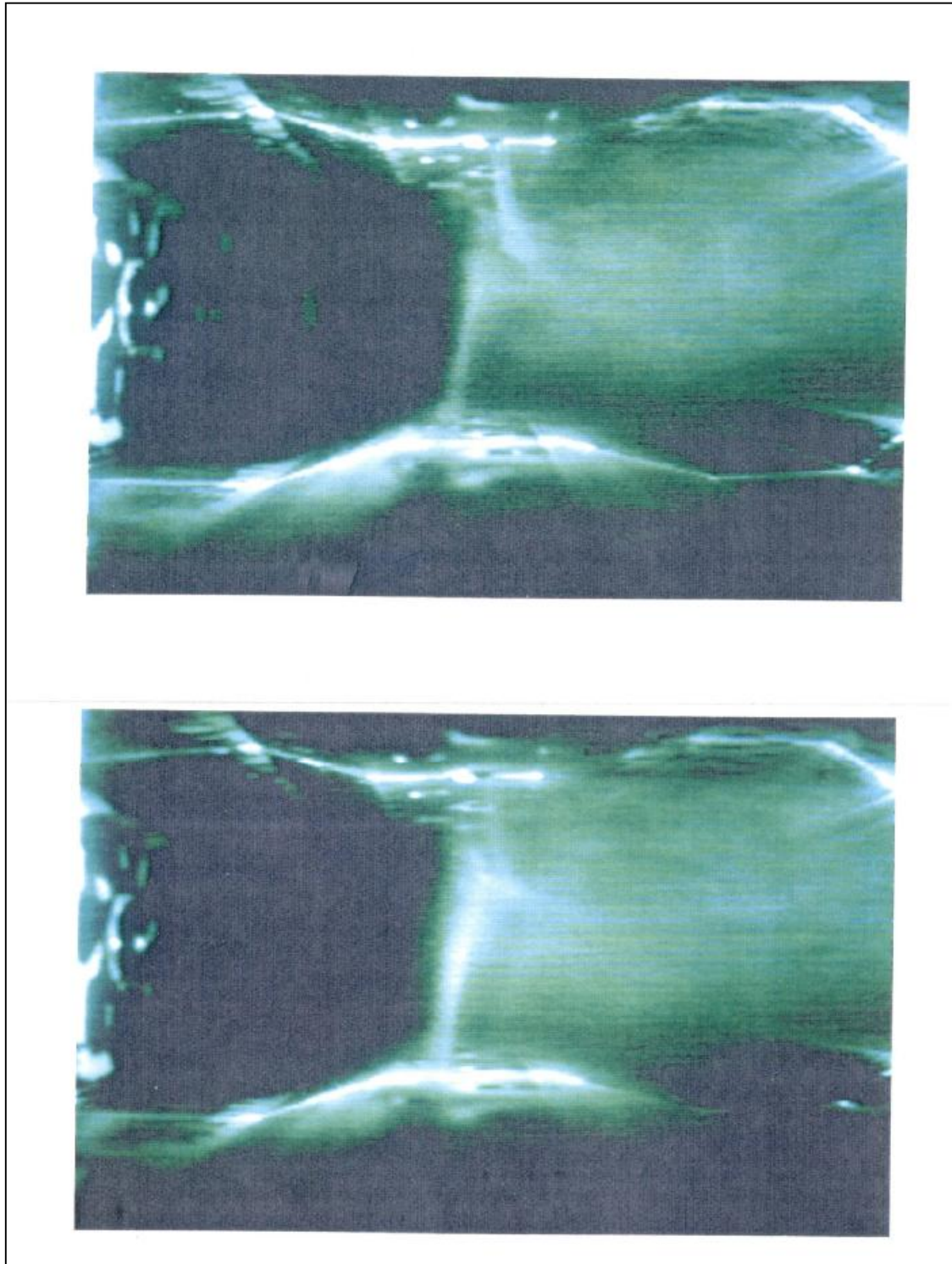


Σχήμα 2.12 – οπτικοποίηση ροής jet για  $x=61(\text{mm})$ , (δεύτερη σειρά στοίχων),  $J=120$



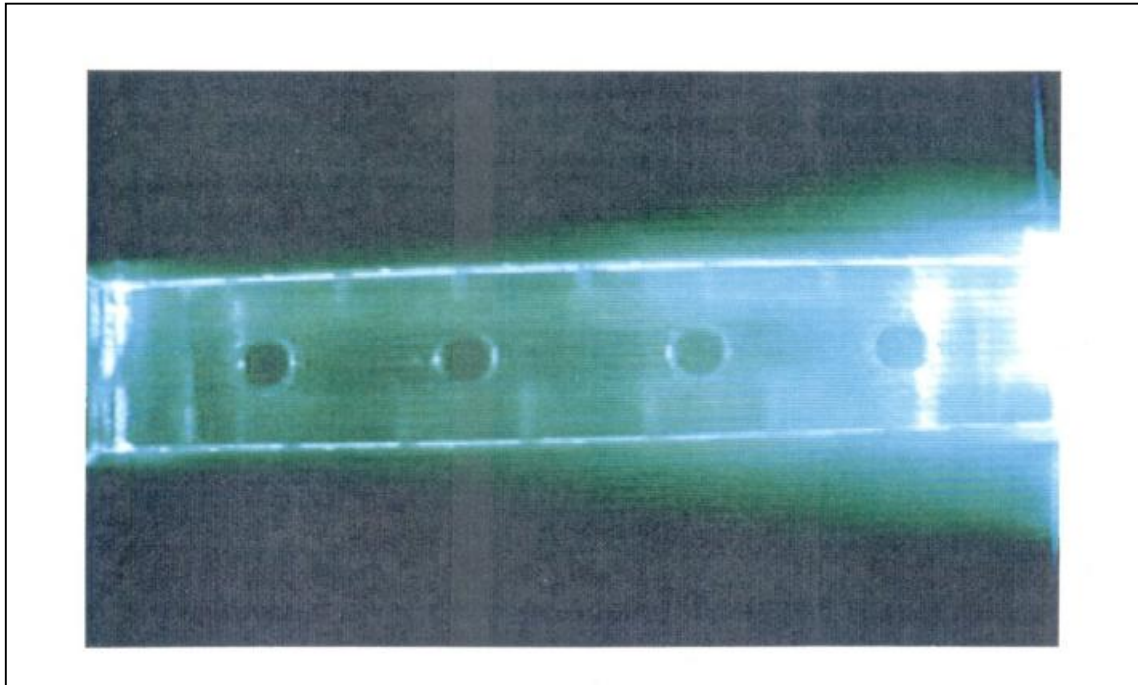


Σχήμα 2.13 – οπτικοποίηση κύριας ροής για  $z=-14(\text{mm})$ ,  $J=80$

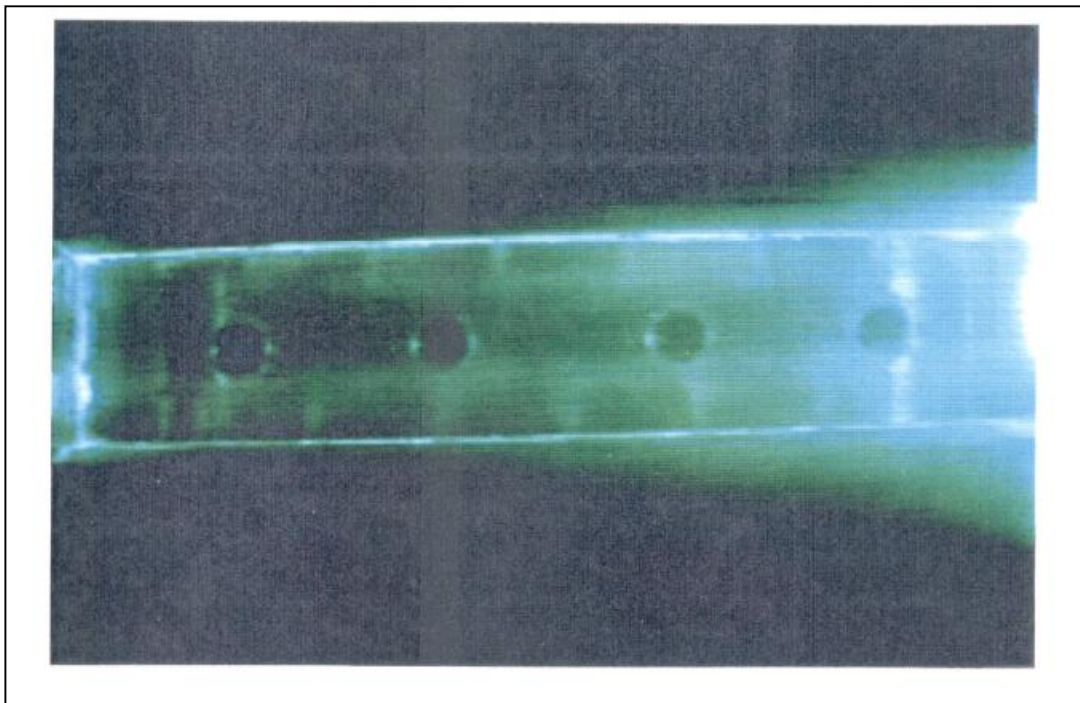


Σχήμα 2.14 – οπτικοποίηση ροής jet για  $z=-14(\text{mm})$ ,  $J=80$





Σχήμα 2.15 – οπτικοποίηση ροής jet για  $x=54(\text{mm})$ , (πρώτη σειρά στοίχων),  $J=80$



Σχήμα 2.16 – οπτικοποίηση ροής jet για  $x=61(\text{mm})$ , (δεύτερη σειρά στοίχων),  $J=80$

### Κεφάλαιο 3: Θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος.

Στο πρόβλημα της ροής σε καυστήρα RQL ο υπολογισμός των εξισώσεων ροής και ενέργειας περιλαμβάνει : γραμμική και τυρβώδη ροή, ροή με αμελητέα σκέδαση ενέργειας και μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη ροή. Για το σκοπό της καλύτερης κατανόησης του προβλήματος, είναι χρήσιμο να προσδιοριστούν και να περιγραφούν οι έννοιες των καταστάσεων ροής και των φαινομένων μεταφοράς που προαναφερθήκαν.

#### 3.1 Περιγραφή ροής με τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής (Navier - Stokes)

Η ροή των πραγματικών ρευστών είναι εξαιρετικά πολύπλοκη καθώς περιλαμβάνει την κίνηση των μορίων από τα οποία αποτελείται και τις μεταξύ τους συγκρούσεις που του προσδίδουν τις ιδιότητες της εσωτερικής τριβής, της θερμικής αγωγιμότητας και της διάχυσης. Γι' αυτό το λόγο οι εξισώσεις ενέργειας και συνέχειας ορμής χρησιμοποιούνται αφού περιλαμβάνουν την επίδραση της τριβής και τη μεταφορά θερμότητας. Για συμπίεστο ρευστό με σταθερό ιξώδες είναι:

Η εξίσωση της συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Η διανυσματική μορφή των εξισώσεων ορμής (εξισώσεις Navier – Stokes) :

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{F} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} = \frac{D\vec{V}}{Dt}$$

Όπου με  $\vec{F} = iX + jY + kZ$  , εκφράζονται οι δυνάμεις πεδίου.

#### 3.2 Γραμμική και τυρβώδης ροή

Οι δυνάμεις συνεκτικότητας και αδράνειας είναι αυτές που χαρακτηρίζουν το είδος της ροής, το πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων στο ρευστό. Ο αριθμός

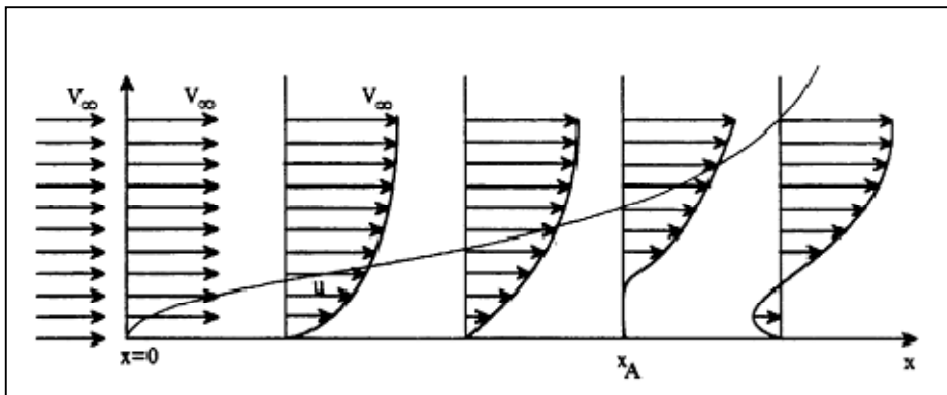
Reynolds χρησιμοποιείται σαν μέτρο σύγκρισης αυτών των δυνάμεων. Όταν οι δυνάμεις συνεκτικότητας είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις δυνάμεις αδράνειας ο αριθμός Reynolds είναι μικρός και η ροή χαρακτηρίζεται στρωτή ή ευσταθής ή ακόμα πιο απλά γραμμική. Όταν ο αριθμός Reynolds είναι μεγάλος, τότε η ροή επηρεάζεται κυρίως από τις δυνάμεις αδράνειας, αφού αυτές είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις δυνάμεις συνεκτικότητας, έτσι η ροή ονομάζεται ασταθής ή τυρβώδης. Για τον κυκλικό αγωγό ο Reynolds πήρε σαν χαρακτηριστική ταχύτητα τη μέση ταχύτητα  $V = 4Q/\pi D^2$  και σαν χαρακτηριστικό μήκος τη διάμετρο  $D$  του σωλήνα δηλαδή:  $Re = \rho V D / \mu$ . Μεταβάλλοντας την παροχή και άρα την ταχύτητα σε σταθερής διαμέτρου κυλινδρικό σωλήνα παρατηρήθηκε η ύπαρξη μεταβατικής περιοχής με άκρα ανώτερης και κατώτερης τιμής για τα οποία η ροή αλλάζει συμπεριφορά. Η ροή είναι πάντα γραμμική για κατώτερη κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds,  $Re < 2000$ . Σε διάγραμμα  $h-V$  (ύψος πίεσης συναρτήσει του μέσου όρου της ταχύτητας της ροής) για μικρές τιμές ταχύτητας, η συνάρτηση είναι γραμμική και εκφράζει τη στρωτή ροή, ενώ για μεγαλύτερες τιμές είναι εκθετική ( $h-V^n$ ) με τον εκθέτη να παίρνει τιμές από 1.75 έως 2 εκφράζοντας την τυρβώδη ροή.

### 3.2.1 Οριακό στρώμα

Όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ σώματος και ρευστού που το περιβάλλει, δημιουργείται οριακό στρώμα. Σε στερεή επίπεδη πλάκα παράλληλη προς τη διεύθυνση της ροής, στο σημείο  $x=0$  και πολύ κοντά στην επιφάνειά της, η ταχύτητα της ροής μηδενίζεται λόγω της εσωτερικής τριβής ενώ ξαναπαίρνει την αρχική της τιμή για σημείο  $y$  (ύψος από το σημείο  $x$ ). Η περιοχή αυτή όπου εμφανίζεται αυτή η μεταβολή της ταχύτητας ονομάζεται οριακό στρώμα, και πάχος ( $\delta$ ) του οριακού στρώματος ονομάζεται η κάθετη απόσταση του σημείου  $y$  για την οποία αποκαθίσταται η αρχική τιμή της ταχύτητας του εξωτερικού ροϊκού πεδίου. Στο οριακό στρώμα ισχύει ο νόμος της τριβής του Newton, κατά τον οποίο η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση είναι :  $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ , όπου  $\mu$  είναι ο συντελεστής του δυναμικού ιξώδους και  $du/dy$  η μεταβολή της ταχύτητας στο οριακό στρώμα. Μέσα στο οριακό στρώμα το ρευστό, εκτός από τη

διατμητική τάση που επενεργεί, υπόκειται σε μια κλίση πίεσης που καθορίζεται από τη δυναμική ροή.

Όταν η πίεση ελαττώνεται κατά τη διεύθυνση της ροής ( $dp/dx < 0$ ) το πάχος του οριακού στρώματος τείνει να ελαττωθεί. Αντίθετα όταν η αυξάνεται κατά την διεύθυνση της ροής ( $dp/dx > 0$ ) το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται γρήγορα. Στην περίπτωση αυτή η διατμητική τάση σε συνδυασμό με τη δύναμη που προκαλεί την αύξηση της πίεσης ελαττώνει την ορμή στο οριακό στρώμα και σε σημείο  $x_A$  η ροή ανακόπτεται. Για περιοχή όπου  $0 < x < x_A$  η ροή θεωρείται στρωτή και μόνιμη ενώ η περιοχή ονομάζεται στρωτό οριακό στρώμα.



Από την ανακοπή της ροής και έπειτα, δηλαδή μετά από το σημείο  $x_A$ , αλλάζει η μορφή του οριακού στρώματος διότι εμφανίζεται κοντά στην πλάκα αναστροφή της ροής. Αυτό συνεπάγεται τη δημιουργία στροβίλων στη ροή γύρω από το σημείο με αποτέλεσμα τη διαταραχή της ροής και την εξαφάνιση της μόνιμης και στρωτής ροής που υπήρχε έως το  $x_A$ . Η διαταραχή της ροής εκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση από την πλάκα όσο αυξάνεται το  $x$  και με μεγαλύτερη κλίση. Στην περίπτωση που η πλάκα έχει πεπερασμένο μήκος και σε αυτό περιλαμβάνεται και το  $x_A$ , τότε η διαταραχή δεν αυξάνεται σε εύρος μετά το πέρας της. Η επενέργεια της εσωτερικής τριβής εξασθενεί τους στροβιλισμούς και σε μεγάλη απόσταση από την πλάκα η ροή επανέρχεται στην παράλληλη μορφή της.

Το σημείο όπου  $x=x_A$  και ισχύει  $(\frac{\partial u}{\partial y})_{y=0} = 0$ , ονομάζεται σημείο αποκόλλησης, απ' όπου αρχίζει και η αναστροφή της ροής. Το οριακό στρώμα πέρα από το σημείο  $x_A$  λέγεται τυρβώδες οριακό στρώμα. Με

λεπτομερή εξέταση του τυρβώδους οριακού στρώματος, δείχθηκε ότι λίγο μετά το σημείο αποκόλλησης και πολύ κοντά στην πλάκα αρχίζει να σχηματίζεται νέο στρωτό οριακό στρώμα κάτω από το τυρβώδες, το οποίο καλείται στρωτό οριακό υπόστρωμα. Στο τυρβώδες οριακό στρώμα, ο νόμος της τριβής του Newton δεν ισχύει, καθώς είναι αδύνατο να βρει εφαρμογή αφού η διατμητική τάση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του στρωτού οριακού στρώματος.

Η σχέση που συνδέει τη διατμητική τάση με τη βαθμίδα της ροϊκής ταχύτητας και του ιξώδους δίνης  $n$ , προτάθηκε από τον Boussinesq και είναι η εξής:  $\tau = \nu \frac{du}{dy}$ . Σε πολλές περιπτώσεις το μοριακό ιξώδες και το ιξώδες δίνης συντελούν στην ανάπτυξη διατμητικών τάσεων το μέγεθος των οποίων ορίζεται από τη σχέση:  $\tau = (\mu + n) \frac{du}{dy}$ , όπου  $n$  ο συντελεστής της τυρβώδους συνεκτικότητας. Σε αντιστοιχία με το κινηματικό ιξώδες:  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , ορίστηκε και το κινηματικό ιξώδες δίνης:  $E = \frac{n}{\rho}$ . Διαστατικά, το ιξώδες δίνης ( $\rho E$ ) έχει μονάδες μέτρησης kg/ms, συνεπώς ο όρος  $E$  έχει τις ίδιες διαστάσεις με το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s).

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων τριβής που ασκούνται σε τοιχώματα κλειστών αγωγών, θα πρέπει να γνωρίζουμε τη διατμητική τάση στο τοίχωμα  $\tau_w$ . Για τα ασυμπιεστα νευτωνικά ρευστά ισχύει:  $\tau_w = \left. \frac{du_x}{dr} \right|_{r=R}$ , συνεπώς θα πρέπει να γνωρίζουμε την κατανομή της ταχύτητας, αφού η διαταραχή ακριβώς στο τοίχωμα είναι μηδενική (δηλαδή  $\rho E = 0$ ), ώστε να υπολογίσουμε τη διατμητική τάση. Κάτι τέτοιο για την τυρβώδη ροή δεν είναι εφικτό με ισοζύγια ορμής καθώς παρουσιάζονται σημαντικές δυσκολίες στην επίλυση. Ισχύει όμως ότι η διατμητική τάση στα τοιχώματα είναι συνάρτηση των εξής παραγόντων:  $\tau_w = f(\rho, n, u_x, D, \text{γεωμετρικά χαρακτηριστικά})$ . Για γεωμετρικά ισοδύναμα συστήματα (με το σωλήνα του πειράματος Reynolds) έχει δειχθεί πειραματικά ότι η διατμητική τάση εξαρτάται απευθείας από τον αριθμό Reynolds, με τη γνωστή σχέση:  $\tau_w = f \frac{1}{2} \rho u_x^2$ , όπου ο παράγοντας  $f$ , συντελεστής τριβής δρα σαν συνάρτηση της γεωμετρίας του συστήματος και του αριθμού Reynolds που χαρακτηρίζει τη ροή.

### 3.3 Συσχέτιση μεταφοράς μάζας και μετάδοσης θερμότητας

Είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον να συσχετιστεί η μεταφορά-μετάδοση θερμότητας και μάζας στην τυρβώδη ροή. Στην περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας, θεωρείται στρώμα πάχους  $\delta_T$ , εξωτερικά του οποίου πέφτει η συνολική θερμοκρασία. Εξωτερικά αυτού του στρώματος, τυρβώδεις δίνες διασκορπίζουν τη θερμότητα τόσο αποτελεσματικά, ώστε στο κέντρο της ροής η θερμοκρασία που υπάρχει να είναι παντού ομοιόμορφη. Μέσα στο στρώμα πάχους  $\delta_T$ , θεωρείται απουσία δινών και μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο του οριακού στρώματος  $\delta$  (ή  $\delta_h$ ). Με αυτήν την αντιστοιχία μπορούμε να μιλάμε για θερμικό οριακό στρώμα και να συσχετίζεται η μετάδοση θερμότητας με τη μεταφορά μάζας, με την προϋπόθεση ότι  $\delta_T \leq \delta_h$ .

Ισχύει για τη διαχυτικότητα δίνης,  $E$ :  $E = C_1 y^3$ . Δηλαδή αυξάνεται στην τρίτη δύναμη της απόστασης από το τοίχωμα του σωλήνα, με αυτό να συνεπάγεται ότι η στροβιλώδης μεταφορά ορμής υπερνικά την ιξώδη μεταφορά όταν:  $\rho E = \rho C_1 y^3 \geq n$ , ή  $E = C_1 y^3 \geq \frac{n}{\rho} = \nu$ , οπότε:  $C_1 \delta_h^3 = \nu$

Η διάχυση θερμότητας μέσω δινών περιγράφεται επίσης από τη σχέση  $E = C_1 y^3$ , ενώ η διάχυση της θερμότητας με αγωγή δίνεται από τη σχέση  $\alpha = \lambda / \rho c_p$  ( $m^2/s$ ). Συνεπώς κατ' αναλογία της σχέσης  $C_1 \delta_h^3 = \nu$ , θα ισχύει για την απόσταση  $\delta_T$ , όπου η μετάδοση θερμότητας μέσω στροβιλισμών υπερνικά την μετάδοση θερμότητας με αγωγή:  $C_1 \delta_T^3 = \alpha$ . Η σχέση μεταξύ  $\delta_T$  και  $\delta_h$  θα είναι:  $\frac{\delta_h}{\delta_T} = \left(\frac{\nu}{\alpha}\right)^{\frac{1}{3}} = Pr^{\frac{1}{3}}$ . Ο αριθμός Prandtl είναι για τα αέρια, για τα οποία και υπάρχει ενδιαφέρον στην εργασία, είναι:  $Pr \approx 1$ .

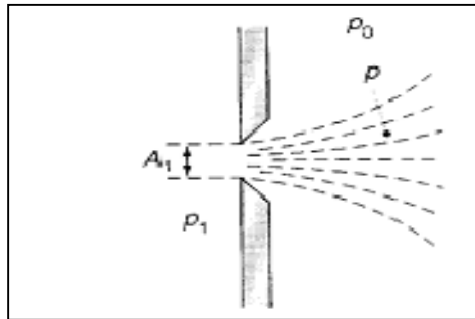
### 3.4 Ροή με αμελητέα σκέδαση ενέργειας

Ο διασκεδασμός ενέργειας σε πολλές περιπτώσεις ροής, μπορεί να θεωρηθεί μηδενικός ή αμελητέα μικρός σε σχέση με το συνολικό ποσό μηχανικής ενέργειας το οποίο αλλάζει από τη μία μορφή στην άλλη. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να ισχύσει η εξίσωση του Bernoulli με διαστάσεις

ύψους. Δηλαδή:  $\frac{p}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2g} = \text{σταθερά}$  κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής. Κατ' αντιστοιχία οι όροι της εξίσωσης ονομάζονται ύψος πίεσης, ύψος θέσης και ύψος κινητικής ενέργειας.

Περίπτωση αμελητέας ενεργειακής απώλειας είναι και η ροή από στόμια ή ακόμα και για ορισμένα μετρητικά όργανα, για συμπιεστά αέρια, θεωρώντας τις απώλειες λόγω τριβών αμελητέες και τη διαδικασία αδιαβατική.

Στη ροή από στόμια όμως, λόγω της αδιαβατικής εκτόνωσης, η πίεση στο jet θα είναι διαφορετική από την αρχική πίεση  $p_1$  και την τελική πίεση  $p_0$  εξωτερικά του jet.



Με εφαρμογή της υπόθεσης ισεντροπικής μεταβολής, και της καταστατικής εξίσωσης ιδανικών αερίων, προκύπτει ότι για κάθε σημείο της μεταβλητής (διατομή  $A$ ) του jet αερίου, θα ισχύει για το ρυθμό ροής μάζας:

$$\dot{m} = \rho v A = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \rho_1 v A =$$

$$= A \left\{ 2 \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1}\right) p_1 \rho_1 \left[ \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \right\}^{1/2}$$

Η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται για τις εξής τρεις καταστάσεις:

- i.  $p_0 = p_1$ . Με αυτές τις συνθήκες, η συμπιεστότητα των αερίων μπορεί να μη ληφθεί υπ' όψη και η παραπάνω εξίσωση να απλοποιηθεί στην εξής:

$\varphi_m = A\sqrt{2(p_1 - p_0)\rho_1} = CA_1\sqrt{2(p_1 - p_0)\rho_1}$  , όπου  $A$  η επιφάνεια διατομής του jet στο σημείο  $p = p_0$  ,  $A_1$  η διατομή του στομίου και  $C$  ο συντελεστής συστολής (στένωση) που κυμαίνεται από 0.6 έως 0.7 .

- ii.  $p_c < p_0 < p_1$  (με  $p_c$  την κρίσιμη πίεση για τον αέρα σε  $0^\circ\text{C}$  και  $p_c = 0.53p_1$ ). Η επιφάνεια διατομής δίνεται από το  $CA_1$  με το  $C$  να παίρνει τιμές  $0.6 < C < 0.7$  .
- iii.  $p_0 \leq p_c$  . Όταν η αρχική πίεση είναι τόσο μικρή στη διατομή  $A_c$ , η ταχύτητα του αέρα φτάνει την ταχύτητα του ήχου, ενώ περαιτέρω μείωση της αρχικής πίεσης δεν θα έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη πίεση στην  $A_c$ . Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι γιατί τα κύματα πίεσης ταξιδεύουν με την ταχύτητα του ήχου. Συνεπώς όταν η πίεση παίρνει την τιμή της κρίσιμης πίεσης στη διατομή  $A_c$ , το διαφορικό πίεσης  $p_1 - p_c$  καθορίζει το ρυθμό ροής ανεξάρτητα από την αρχική τιμή της πίεσης. Η εξίσωση για τη ροή μάζας γίνεται:

$$\varphi_m = \rho_c v_c A_c = A_c \left[ \kappa p_1 \rho_1 \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{(\kappa+1)/(\kappa-1)} \right]^{1/2} = C_K A_c \sqrt{p_1 \rho_1}$$

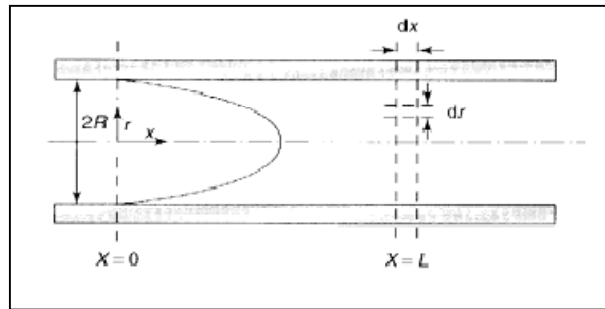
Όπου  $C_K = \left[ \kappa \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{(\kappa+1)/(\kappa-1)} \right]^{1/2}$  ,  $A_c = C_c A_1$  , με  $C_c \approx 0.6$  και  $C_c \approx 0.97$  για στόμια με αιχμηρά και κυκλικά χείλη αντίστοιχα. Ο συντελεστής  $C_K$  μπορεί να υπολογιστεί από το γνωστό  $\kappa$  του αέρα ( $C_K = 0.684$ ).

Για τον υπολογισμό ροής που αφορά σε αέρια διαφορετικά από τον αέρα και για άλλες θερμοκρασίες, υπεισέρχονται στην εξίσωση οι διορθωτικοί συντελεστές  $C_M$  και  $C_T$ . Γι' αυτές τις συνθήκες χρησιμοποιούμε αντί της  $p_0$  την πίεση  $p_0 C_M C_T$ . Ομοίως η ταχύτητα ροής θα είναι  $v C_M C_T$  και η πυκνότητα  $\rho / C_M C_T$  .



### 3.5 Μετάδοση θερμότητας με εξαναγκασμένη ροή σε σωλήνες

#### 3.5.1 Περίπτωση γραμμικής ροής



Στην περίπτωση γραμμικής ροής ιξώδους ρευστού διαμέσου κυκλικού σωλήνα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, στο  $x < 0$  το ρευστό και το τοίχωμα θα έχουν ομοιόμορφη θερμοκρασία  $T_0$ . Σε απόσταση  $x \geq 0$ , η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα είναι  $T_w$  ( $T_w > T_0$ ). Λόγω αυτής της θερμοκρασιακής διαφοράς θα υπάρξει ένας ρυθμός ροής θερμότητας  $q$  με αγωγή, από το τοίχωμα στο ρευστό, υπό γωνία. Το θερμοκρασιακό διάνυσμα έχει κλίση επίσης στον  $x$ -άξονα, συνεπώς και σ' αυτήν την διεύθυνση θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας. Επιπλέον, λόγω του ιξώδους του ρευστού, αναπτύσσεται θερμότητα  $\eta$  οποία μεταφέρεται στον  $x$ -άξονα με τη ροή του ρευστού. Το ενεργειακό ισοζύγιο σε όγκο ελέγχου  $2\pi r dx dr$  περιγράφεται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

Θερμότητα που παράγεται λόγω ιξώδους:

$$-2\pi dr dx \tau_{rx} \frac{\partial v_x}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} 2\pi r dr dx$$

Αγωγή στην αξονική διεύθυνση:

$$+q_{x|x} 2\pi r dx - q_{x|x+dx} 2\pi r dx$$

Αγωγή στην ακτινική διεύθυνση:

$$+q_{r|r} 2\pi r dx - q_{r|r+dr} 2\pi(r + dr) dx$$

Ενέργεια που μεταφέρεται από το ρευστό:

$$\rho c_p v_x (T - T_0)|_x 2\pi r dr - \rho c_p v_x (T - T_0)|_{x+dx} 2\pi r dr$$

Εξισώνοντας τη θερμότητα εισόδου με τη θερμότητα εξόδου στον όγκο ελέγχου και μη λαμβάνοντας υπ' όψη τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή στον x-άξονα, καθώς και την παραγωγή θερμότητας λόγω ιξώδους, βρίσκουμε:

$$\frac{\partial(rq_r)}{\partial r} + r\rho c_p v_x \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Με εφαρμογή του νόμου Fourier,  $q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$ , και για την περίπτωση γραμμικής ροής σε κυκλικό σωλήνα, προκύπτει η εξίσωση:

$$-\lambda \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + 2r\rho c_p \langle v \rangle \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Αυτή είναι η εξίσωση Graetz η οποία έχει λυθεί για διάφορες οριακές συνθήκες. Με περαιτέρω επίλυση της εξίσωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων και μεγάλες αποστάσεις από την είσοδο της ροής, εξάγεται το συμπέρασμα ότι, ενώ στην περιοχή εισόδου αρχίζει και σχηματίζεται το θερμικό οριακό στρώμα ο αριθμός Nusselt είναι της μορφής  $Nu \sim x^{-1/3}$ , σε μεγάλες αποστάσεις παίρνει σταθερή τιμή καθώς δεν αλλάζει σε σχέση με το  $x$ . Οι τιμές του αριθμού Nu και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, σχετίζονται με μία μέση θερμοκρασία ρευστού. Συνεπώς όσον αφορά στην γραμμική ροή, μπορούμε να πούμε ότι η μεταφορά θερμότητας παραμένει ίδια σε περιπτώσεις ίδιας ογκομετρικής παροχής σε σωλήνες ίδιου μήκους αλλά διαφορετικών διαμέτρων, καθώς ο αριθμός Nu δεν μεταβάλλεται, ενώ οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας είναι αντιστρόφως ανάλογοι των διαμέτρων.

Θεωρητική επίλυση άλλων τύπων κατανομής ταχύτητας, οριακών συνθηκών και γεωμετρίας αγωγών έχει γίνει, με αποτέλεσμα μόνο τη διαφοροποίηση των αριθμητικών σταθερών. Σαν γενική διατύπωση, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι όσο μεγαλύτερη η κλίση του διανύσματος της ταχύτητας κοντά στα τοιχώματα τόσο μεγαλύτερη η μεταφορά θερμότητας. Ισχύει:

$$\langle Nu \rangle = 1.62 Re^{1/3} Pr^{1/3} (x_e)^{-1/3}, \text{ με } \langle Nu \rangle_{\min} = 3.66$$

Στην αύξηση της μεταφοράς θερμότητας συνεπικουρεί και η διαφορά πυκνότητας λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας, εάν υπάρχει. Τότε κατά Sieder και Tate:

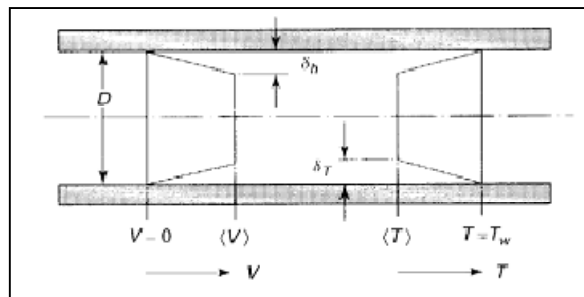
$$\langle Nu \rangle = 1.86 Re^{1/3} Pr^{1/3} (x_e)^{-1/3} \left( \frac{\eta}{\eta_w} \right)^{1/7}, \text{ με } \langle Nu \rangle_{\min} = 3.66$$

### 3.5.2 Περίπτωση τυρβώδους ροής

Η καλύτερη εμπειρική διατύπωση σχέσης για την μεταφορά θερμότητας σε κυκλικούς αγωγούς στην περίπτωση τυρβώδους ροής είναι:

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} = 0.027 Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\eta}{\eta_w} \right)^{\frac{1}{7}}$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για την περιοχή  $2 \times 10^3 < Re < 10^5$  και  $Pr \geq 0.7$ .



Η κατανόηση της σχέσης αυτής γίνεται αποτελεσματικότερη χρησιμοποιώντας την έννοια του οριακού στρώματος. Για τυρβώδη ροή σε κλειστούς αγωγούς, ολόκληρη η κλίση του διανύσματος της ταχύτητας μπορεί να θεωρηθεί στο πάχος  $\delta_h$  του υδροδυναμικού οριακού στρώματος, όπως ορίζεται:

$$\tau_w = \eta \frac{\langle v \rangle}{\delta_h} = \frac{f}{2} \rho \langle v \rangle^2$$

η οποία δίνει το λόγο της διαμέτρου του σωλήνα ως προς το οριακό στρώμα:

$$\frac{D}{\delta_h} = \frac{f}{2} Re$$

Ένα υποθέσουμε ότι η συνολική κλίση του διανύσματος της θερμοκρασίας περιέχεται σε στρώμα πάχους  $\delta_T$  μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ανάλογο μοντέλο για την κατανομή της θερμοκρασίας από τη σχέση:

$$h(T_w - \langle T \rangle) = \lambda \frac{T_w - \langle T \rangle}{\delta_T}, \quad \text{ή} \quad Nu = \frac{hD}{\lambda} = \frac{D}{\delta_T} = \frac{D}{\delta_h} \frac{\delta_h}{\delta_T} = \frac{f}{2} Re \frac{\delta_h}{\delta_T}$$

$$\text{και αφού: } \frac{\delta_h}{\delta_T} = Pr^{\frac{1}{3}}, \text{ τότε: } Nu = \frac{f}{2} Re Pr^{\frac{1}{3}}$$

Ο συντελεστής τριβής  $f$  μπορεί να αναληφθεί για λείους σωλήνες από την εμπειρική σχέση κατά Blasius :  $4f = 0.316 Re^{-0.25}$ , για  $4000 < Re < 10^5$ , οπότε γίνεται:  $Nu = 0.04 Re^{0.75} Pr^{1/3}$ . Η σχέση αυτή μοιάζει αρκετά

με την αρχικά ορισμένη εμπειρική ( $Nu = \frac{hD}{\lambda} = 0.027 Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\eta}{\eta_w} \right)^{\frac{1}{7}}$ ) αν προσθέσουμε τη διόρθωση κατά Sieder και Tate για την επιρροή του ιξώδους στην παραγωγή θερμότητας.

## **Κεφάλαιο 4: Σημασία και ορισμός CAD και CFD .**

Η χρησιμοποίηση της τεχνολογίας CAD (Computer Aided Design) είναι εξόχως σημαντική στην εποχή μας. Με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών σχεδιάζονται όχι μόνο αντικείμενα όπως στη συμβατική σχεδίαση, αλλά μπορούν να περιέχονται και πληροφορίες σχετικές με το υλικό του μοντέλου, διαδικασίες επεξεργασίας και ανοχές. Χρησιμοποιείται είτε για δισδιάστατη σχεδίαση είτε για τρισδιάστατη. Όλες οι σύγχρονες βιομηχανίες χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία, είτε πρόκειται για μηχανολογικά ή αρχιτεκτονικά σχέδια, είτε ακόμα για το σχεδιασμό της πιο απλής συσκευασίας εμπορικού προϊόντος. Τα σύγχρονα προγράμματα CAD επιτρέπουν την περιστροφή του μοντέλου υπό σχεδίαση στους τρεις άξονες καθιστώντας την οπτική κατανόηση κάθε λεπτομέρειας σε κάθε πιθανή γωνία, εφικτή και εύκολα προσεγγίσιμη.

Η τεχνολογία CAD έχει ιδιαίτερης βαρύτητας σημασία στα προγράμματα εξομοίωσης σαν πρωταρχικό στάδιο, καθώς όλες οι παραμετροποιήσεις και οι περαιτέρω διαδικασίες που ακολουθούν βασίζονται στο σωστό σχεδιασμό της γεωμετρίας του μοντέλου. Η χρησιμοποίηση υπολογιστών για το σχεδιασμό, προσφέρεται διότι κυρίως εξοικονομείται τόσο ο χρόνος σχεδιασμού, όσο και το κόστος παραγωγής ενός πραγματικού υπό κλίμακα μοντέλου.

Με την εισαγωγή της τεχνολογίας της υπολογιστικής ρευστομηχανικής – CFD (Computational Fluid Dynamics), μπόρεσαν να απλοποιηθούν οι πολύπλοκες και πολυέξοδες συνθήκες προσομοίωσης πραγματικών καταστάσεων και φαινομένων. Η υπολογιστική ρευστομηχανική είναι ένας κλάδος της μηχανικής των ρευστών όπου χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι και αλγόριθμοι για την ανάλυση και επίλυση προβλημάτων που περιέχουν ροές ρευστών. Ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνται για την επίλυση των πολύπλοκων υπολογισμών που χρειάζονται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης υγρών και αερίων με δεδομένες οριακές συνθήκες. Σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και με τη χρήση υπερυπολογιστών, το αποτέλεσμα έχει προσεγγιστική ακρίβεια και δεν είναι απόλυτο. Η

εξέλιξη της τεχνολογίας όμως βελτιώνει διαρκώς την ακρίβεια σε περίπλοκα προβλήματα, όπως υπερηχητικής ροής και τυρβώδους ροής.

Η πιο βασική θεώρηση στο CFD είναι ο τρόπος αντιμετώπισης ενός συνεχούς ρευστού με διακριτοποίηση σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αφού έχει διακριτοποιηθεί ο χώρος σε μικρά κελιά ώστε να σχηματιστεί ένα δικτύωμα ή πλέγμα στο χώρο, εφαρμόζεται ένας ικανοποιητικός αλγόριθμος για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης. Αυτό το δικτύωμα μπορεί να αποτελείται από τρίγωνα σε δισδιάστατη σχεδίαση ή στερεές πυραμίδες σε τρισδιάστατη σχεδίαση, είτε και από πιο πολύπλοκες δομές (μοναδιαία στοιχεία).

Η μεθοδολογία που ακολουθείται κατά κοινό λόγο όταν αντιμετωπίζεται ένα πρόβλημα για το οποίο χρησιμοποιούμε την CFD τεχνολογία έχει ως εξής:

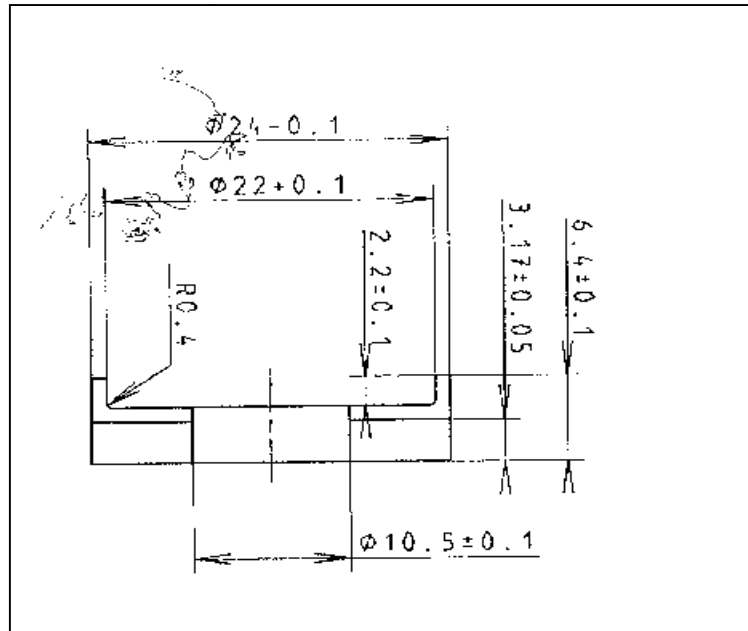
- i. Ορίζεται η γεωμετρία, δηλαδή τα φυσικά όρια του προβλήματος.
- ii. Ο όγκος που θα πληρωθεί με το ρευστό χωρίζεται σε διακριτοποιημένα κελιά που σχηματίζουν πλέγμα το οποίο είτε είναι ομοιόμορφο, είτε ανομοιόμορφο.
- iii. Ορίζονται οι εξισώσεις και οι νόμοι που διέπουν το πρόβλημα, όπως για παράδειγμα αρχή διατήρησης μάζας, ενθαλπία, κινητικές εξισώσεις κ.ο.κ.
- iv. Ορίζονται οι οριακές συνθήκες, δηλαδή η συμπεριφορά και οι ιδιότητες του ρευστού υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ή αν χρειάζεται η αρχική του κατάσταση.
- v. Η εξομοίωση γίνεται με την επίλυση των εξισώσεων να επαναλαμβάνεται είτε για μόνιμη (σταθερή) κατάσταση, είτε για μεταβαλλόμενη (ή περιοδική).
- vi. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι διαθέσιμα προς επεξεργασία και η οπτικοποίησή τους γίνεται εφικτή.

## **Κεφάλαιο 5: Διαδικασία σχεδίασης και ελέγχου σε περιβάλλον Ansys.**

Η διαδικασία σχεδίασης αφορά τη γεωμετρία (σύνολο εντολών Geometry στο περιβάλλον σχεδίασης Ansys) του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και χάριν δικής μας διευκόλυνσης, η σχεδίαση ξεκίνησε με τα γεωμετρικά στοιχεία κοντά στην έξοδο της ροής και προχώρησε προς αυτά στην είσοδό της. Οι αναφορές, όπου υπάρχουν, για τις θέσεις των στοιχείων (επάνω, κάτω κτλ) που αποτελούν κάθε κομμάτι, γίνονται σε σχέση με τον τρόπο που απεικονίζονται στο περιβάλλον εργασίας για καλύτερη κατανόησή τους, όπως δείχνεται και από το τριαξονικό σύστημα συντεταγμένων του συστήματος σχεδίασης (περιβάλλον ANSYS ICEM).

Ακολουθεί η μεθοδολογία ανακατασκευής στο περιβάλλον αυτό με βάση τις παραμέτρους και τις μακροεντολές που χρησιμοποιήσαμε, έχοντας υπόψη τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Με βάση αυτά είναι δυνατή τόσο η συστηματική επανάληψη της διεργασίας ανακατασκευής, τόσο και η τροποποίηση οποιαδήποτε στοιχείων της συσκευής (που τυχόν ζητηθεί σε μελλοντική εργασία).

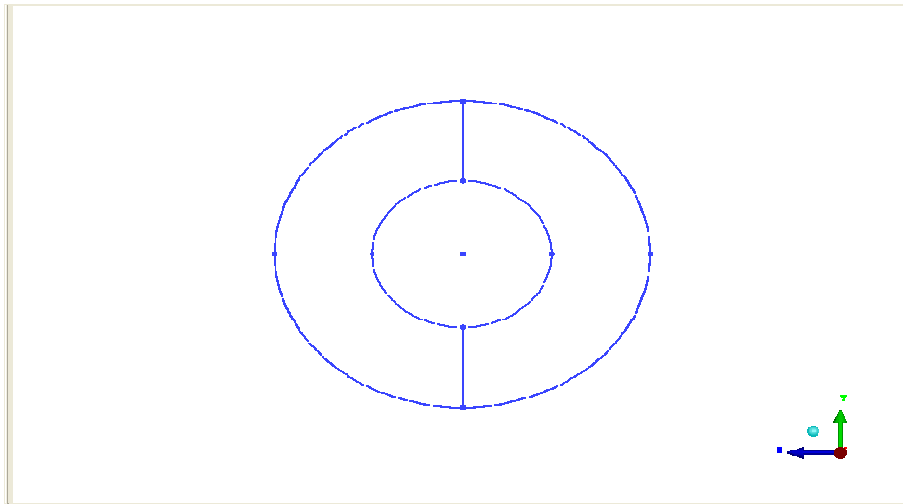
### 5.1 Κυκλικός Δίσκος στη βάση (έξοδο ροής)



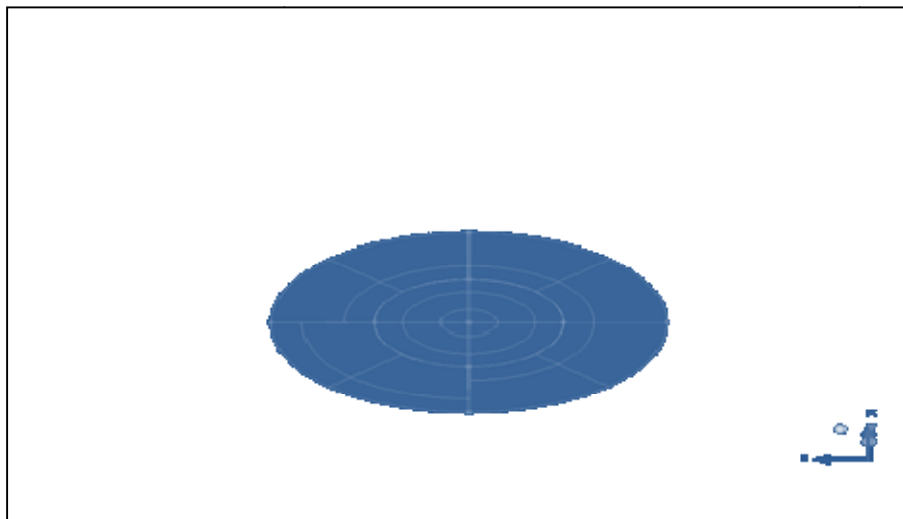
Σχήμα 3

Με βάση το Σχήμα 3, ορίστηκε ως σημείο το κέντρο των ομόκεντρων κύκλων, ακτινών 5.25 και 11.0mm αντίστοιχα, με χρήση της εντολής *geometry* → *explicit location* → *create 1 point*, όπου και δίνονται οι συντεταγμένες του σημείου. Ομοίως και για τις συντεταγμένες των σημείων των περιφερειών τους. Με την εντολή *create/modify curve* → *circle or arc from center and 2 points on plane* ορίζονται οι κύκλοι προς σχεδίαση, επιλέγοντας τα κέντρα και αντίστοιχα σημεία που έχουν οριστεί από την τις περιφέρειές τους. Ενώνονται τα κατάλληλα σημεία των κύκλων με επιλογή τους από την εντολή *create/modify curves* → *from points*, (Σχήμα 3.1) ώστε να γίνει εφικτός ο ορισμός της επιφάνειας του κάτω κυκλικού δίσκου (Σχήμα 3.2).



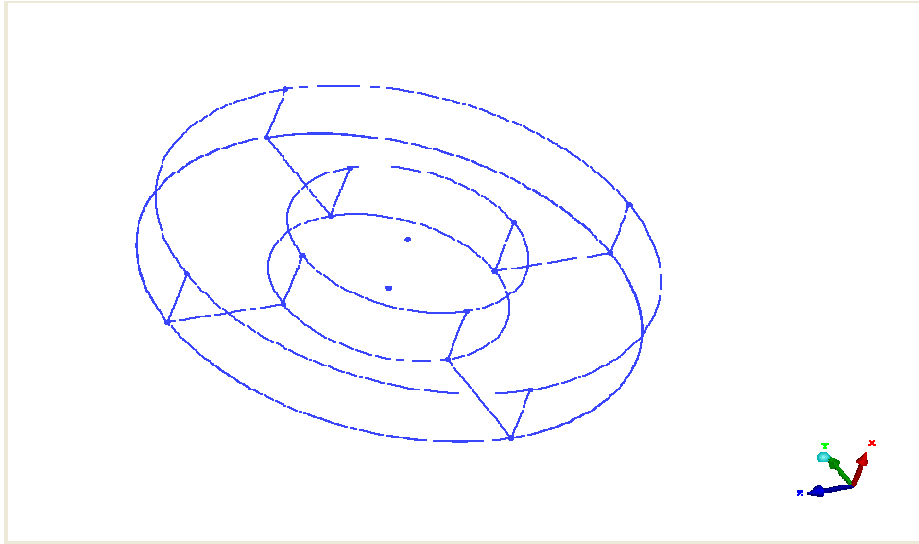


Σχήμα 3.1



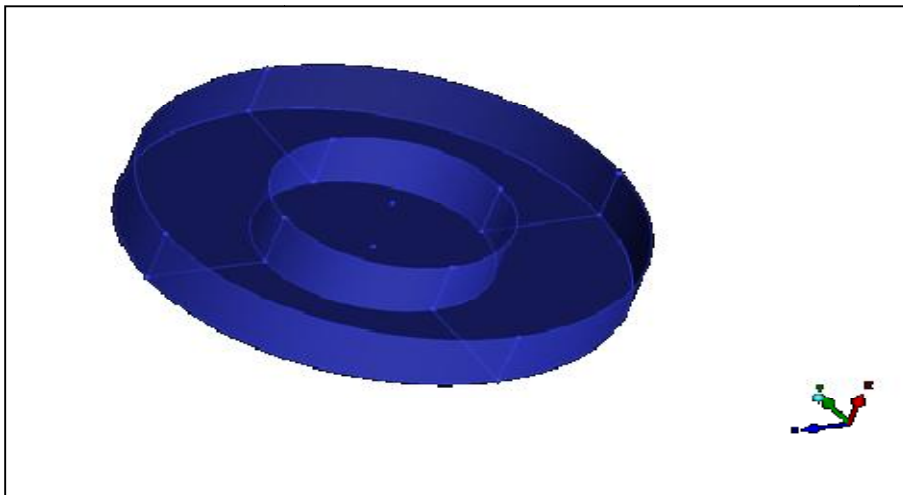
Σχήμα 3.2

Ακολουθεί η ίδια διαδικασία του επάνω μέρος του κομματιού με την προσθήκη της εντολής ορισμού σημείων με βάση ήδη κατασκευασμένα σημεία και με δεδομένη την απόσταση μεταξύ αρχικού και τελικού σημείου σε κάθε άξονα (create point → base point and delta) (Σχήμα 3.3 ).



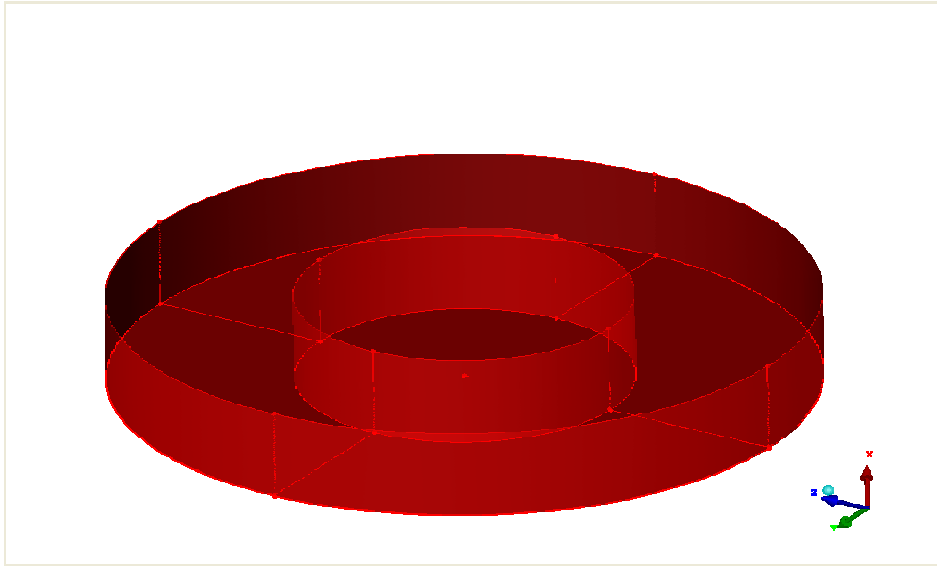
Σχήμα 3.3

Οι επιφάνειες ορίζονται με επιλογή καμπύλων με την εντολή create/modify surface →simple surface, from curves (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4

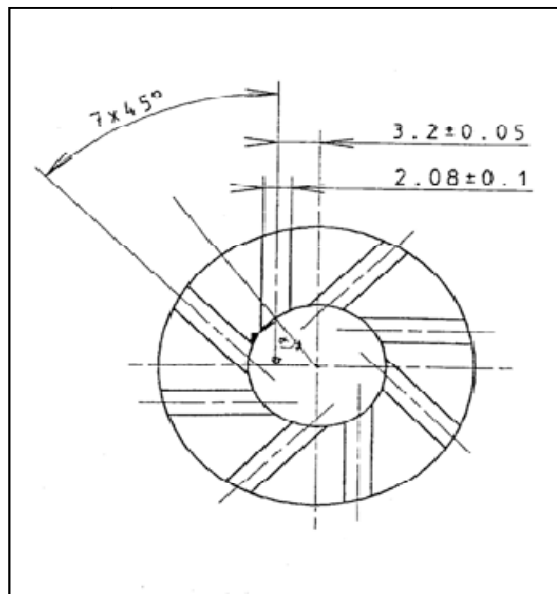
Για να δοθεί όνομα και χρώμα ώστε να είναι ευδιάκριτο το κάθε μέρος του μοντέλου υπό κατασκευή γίνεται χρήση της επιλογής create part (name:NOZZLES2SOLID), add to part, επιλέγοντας το κομμάτι που κατασκευάστηκε και change color, χρωματίζοντάς το κόκκινο (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5

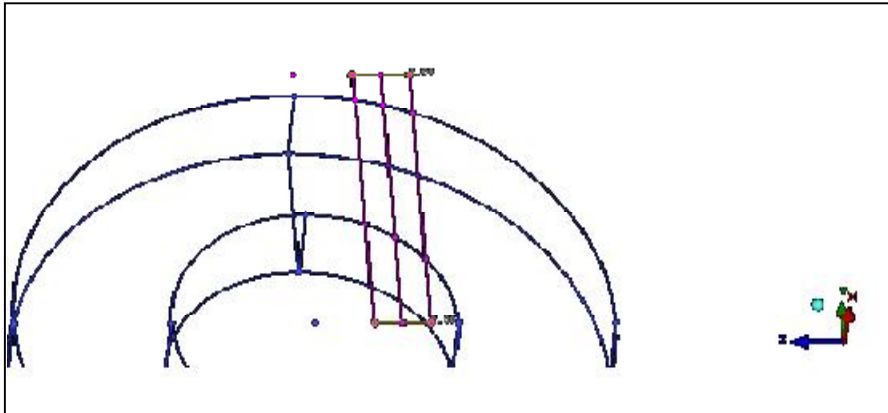
### 5.2 Οκτάπολο Σώμα Διάχυσης

Το δεύτερο και τρίτο κομμάτι αποτελείται από το τμήμα των 8 οπών διάχυσης και τα αντίστοιχα 8 συμπαγή μέρη του (σχήμα 6) τοποθετημένα υπό γωνία  $45^\circ$ .



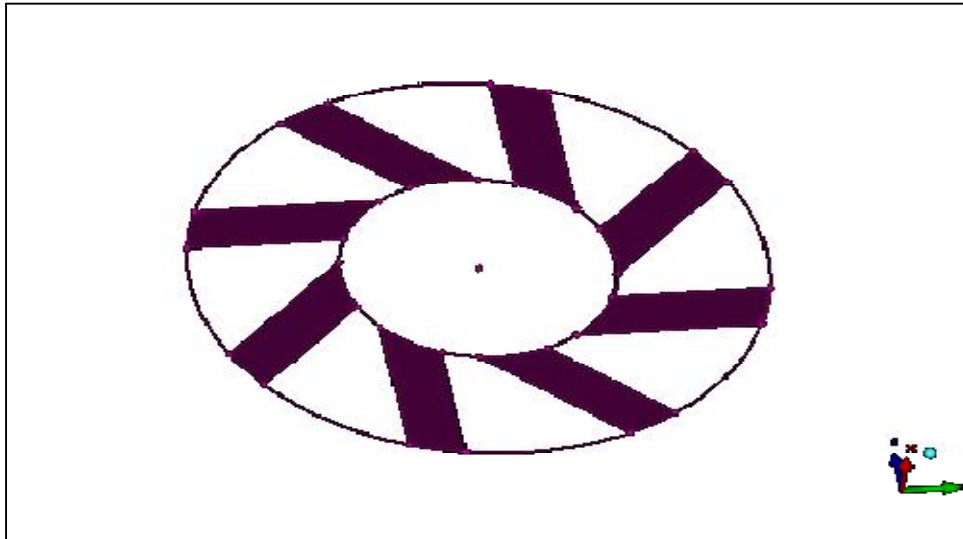
Σχήμα 4

Ονομάζεται το τμήμα των οπών, NOZZLES1HOLE, και προστίθενται τα στοιχεία του άνω εσωτερικού και εξωτερικού κύκλου από το κομμάτι NOZZLES2SOLID. Ορίζονται βοηθητικά σημεία πάνω στη διάμετρο του κύκλου (με  $y=0$ ) απόστασης από το κέντρο  $DZ= -3.2$  ,  $-5.28$  ,  $-2.16$ . Χρειάζονται βοηθητικές γραμμές που να τέμνουν τους κύκλους κάθετα, όπως απαιτείται από το σχέδιο. Χρησιμοποιώντας την εντολή base point and delta ορίζονται σημεία με απόσταση από τα υπάρχοντα  $DY= 12$  για να είναι ευδιάκριτα σε σχέση με την περίμετρο του κύκλου. Ενώνοντας τα σημεία αυτά σχηματίζεται η κάτω πλευρά της πρώτης οπής εκ των οκτώ ( Σχήμα 4.1).



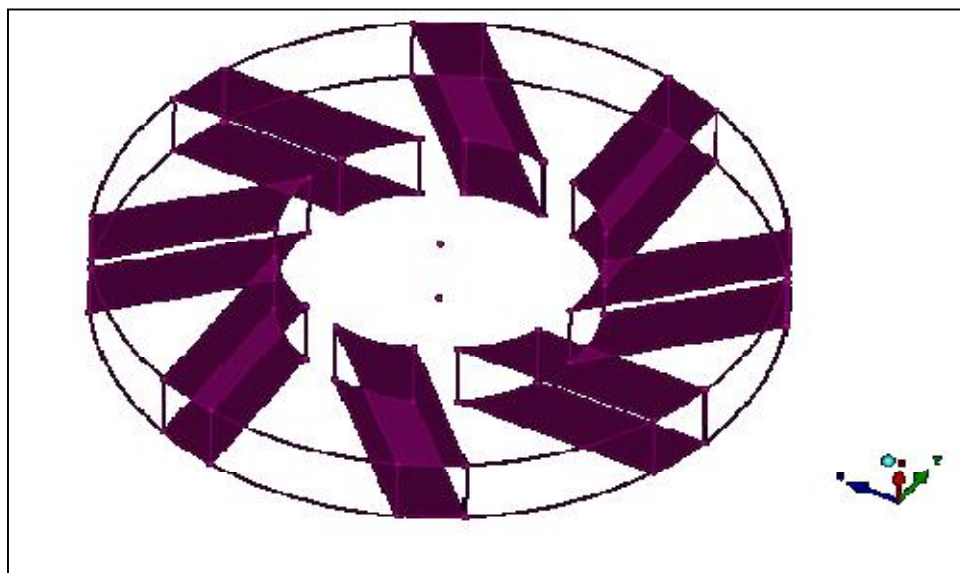
Σχήμα 4.1

Με την εντολή segment curves by points χωρίζονται οι καμπύλες (ευθύγραμμα τμήματα σε αυτήν την περίπτωση) σε μικρότερες, ώστε να μπορεί να διαγραφεί ότι δεν είναι απαραίτητο και να οριστούν οι επιφάνειες. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή delete any entity ή με τις εντολές delete curves, delete points. Με επιλογή καμπυλών γίνεται η οριοθέτηση των επιφανειών. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εντολή transform geometry → rotate , αντίγραφα 7, γωνία  $45^\circ$ , x-axis, γίνεται αντιγραφή του κάτω τμήματος μίας οπής επτά φορές υπό γωνία  $45^\circ$  (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2

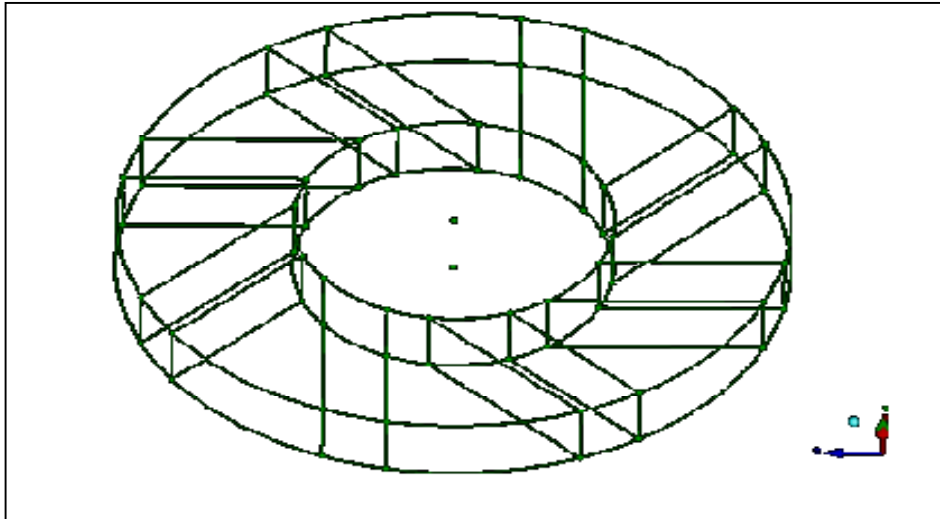
Το αντίστοιχο επάνω μέρος του κομματιού των οπών σχεδιάζεται με επιλογή όλων των ήδη υπάρχοντων στοιχείων του κάτω κομματιού, μέσω της εντολής `transform geometry → translate, x offset` (σχήμα 4.3).



(Σχήμα 4.3)

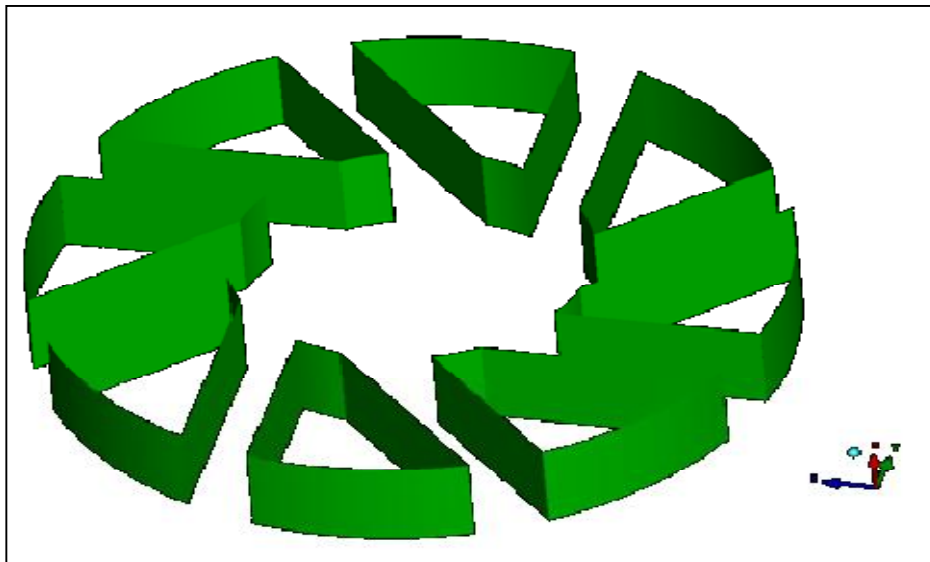
Αφού έχουν δημιουργηθεί οι επιφάνειες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία καμπυλών και σημείων για το σχεδιασμό των συμπαγών τμημάτων

και να ενταχθούν στο νέο σχεδιαστικό μέρος part: NOZZLES1SOLID (Σχήμα 4.4)



Σχήμα 4.4

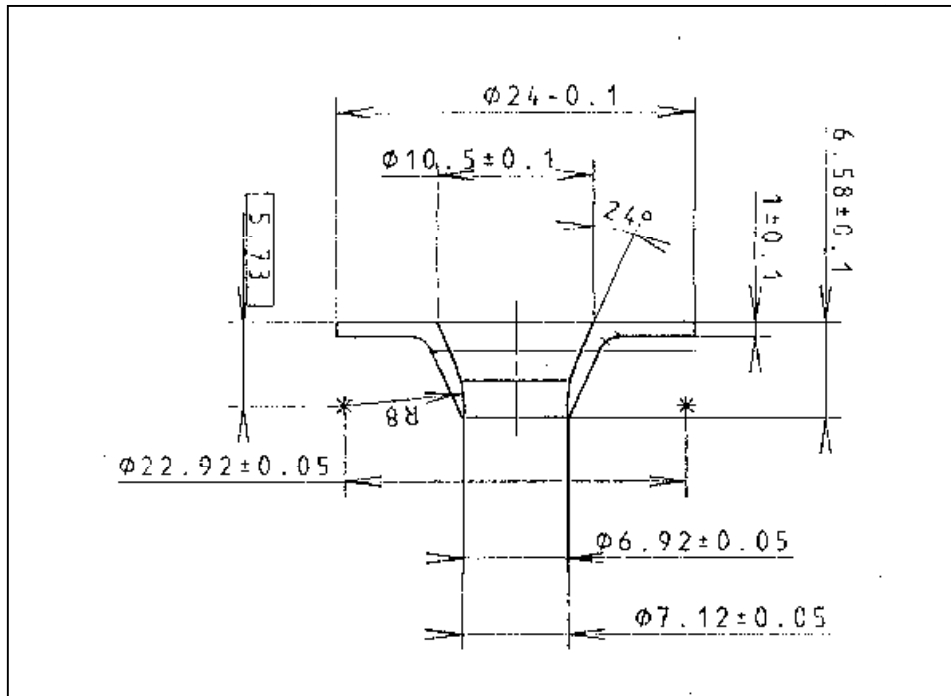
Ορίζονται οι επιφάνειες με την εντολή create surface → from curves επιλέγοντας τις καμπύλες (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5

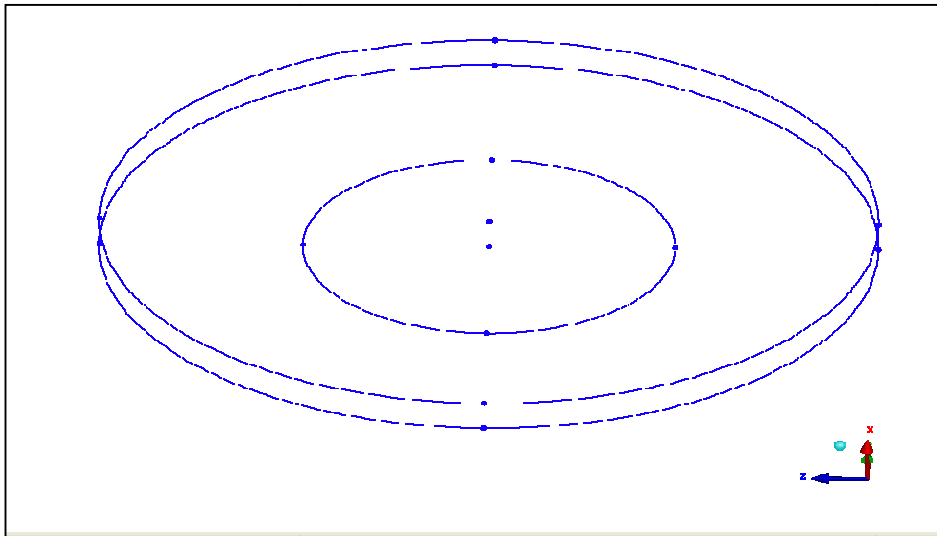
### 5.3 Στοιχείο Διαχωρισμού Αέρα άνω και κάτω Διαχυτών

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται το στοιχείο (καπέλο – hat) που διαχωρίζει τη ροή του αέρα στα άνω και κάτω σώματα των διαχυτών.



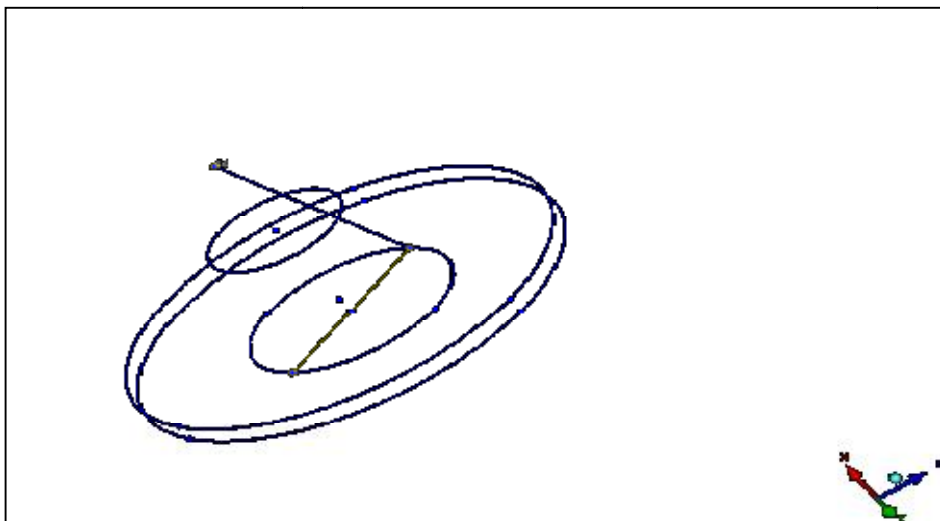
Σχήμα 5

Για την σχεδίασή του, εντάσσεται το σύνολο των καμπυλών της εξωτερικής και εσωτερικής άνω διαμέτρου των κύκλων του κομματιού των συμπαγών τμημάτων του οκτάοπου διαχυτή, στο νέο κομμάτι με ονομασία part: NOZZLES3HAT. Οι καμπύλες από προηγούμενη διαδικασία αποτελούν τμήματα του των ενιαίων κύκλων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Με την εντολή επεξεργασίας καμπυλών concatenate curves επανενώνονται οι χωρισμένες σε τόξα καμπύλες σε ενιαίες με ακρίβεια σύμπτωσης που καθορίζεται από το χειριστή του προγράμματος (tolerance:0.0001). Τοποθετούνται στους κύκλους τα σημεία του επιπέδου yz για  $(x,z)=(0,0)$ ,  $(x,z)=(0,0)$  και τα αντιδιαμετρικά τους. Γίνεται αντιγραφή του εξωτερικού κύκλου για offset x=1 (translate, 1 copy).



Σχήμα 5.1

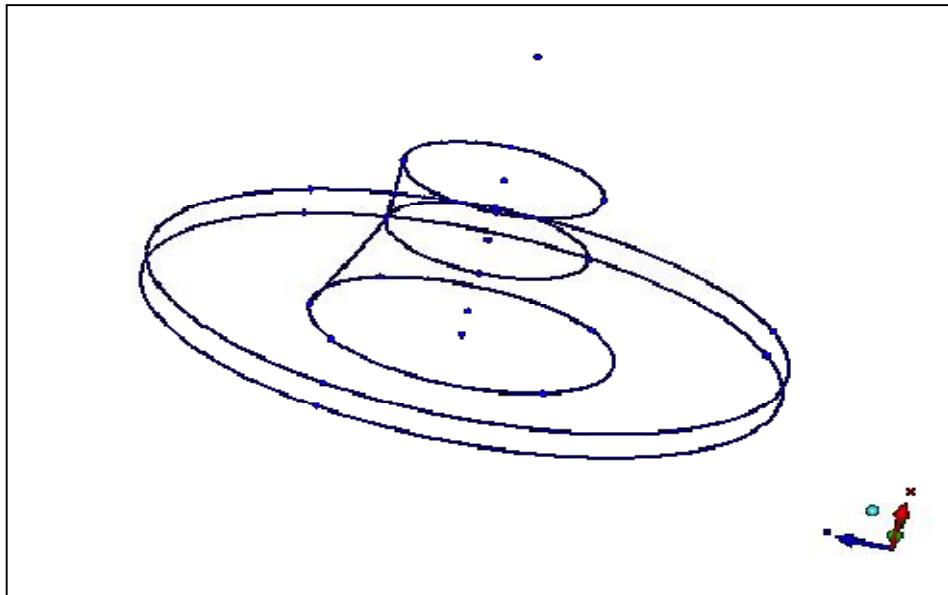
Για την κατασκευή του κώνου με κλίση  $24^\circ$  ακολουθείται η εξής διαδικασία. Από κέντρο κύκλου  $\Phi 10.5$  ορίζεται κέντρο κύκλου  $\Phi 6.92$  σε απόσταση 6.58 και τα σημεία της περιφέρειάς του και η καμπύλη του. Ορίζεται βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα από σημείο περιφέρειας του κάτω εσωτερικού κύκλου που το ενώνει με σημείο κατακόρυφης απόστασης από το κέντρο του (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2

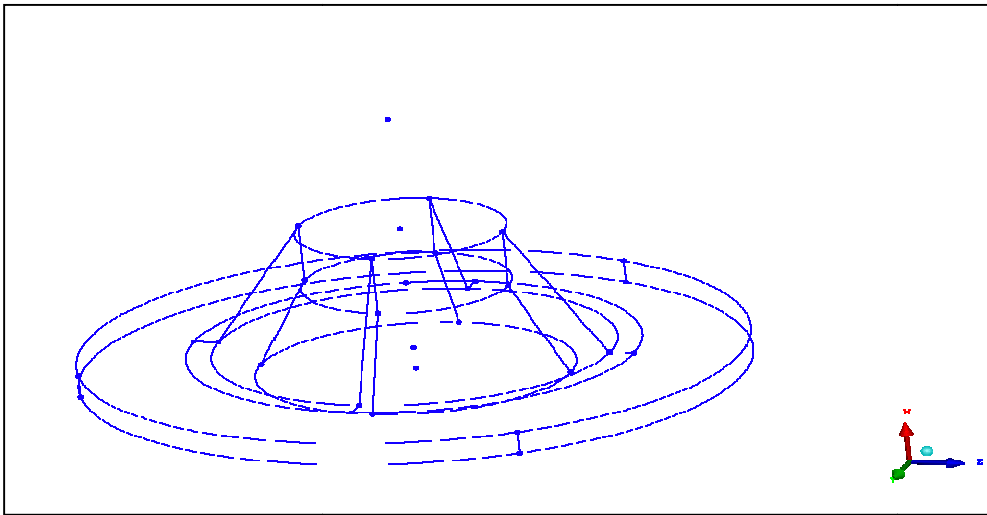


Σχεδιάζεται κάθετη προς τα κάτω βοηθητική γραμμή από το αντίστοιχο σημείο του άνω κύκλου με  $y=0$  και το σημείο τομής των βοηθητικών γραμμών (curve-curve intersection) που θα αποτελεί σημείο της περιφέρειας του μικρού κύκλου του κώνου προς κατασκευή. Γίνεται διαγραφή των περιττών στοιχείων (βοηθητικά σημεία και καμπύλες) και γίνεται αντιγραφή του κύκλου  $\Phi 6.92$  σε απόσταση ίση μεταξύ των αντίστοιχων σημείων (Σχήμα 5.3).

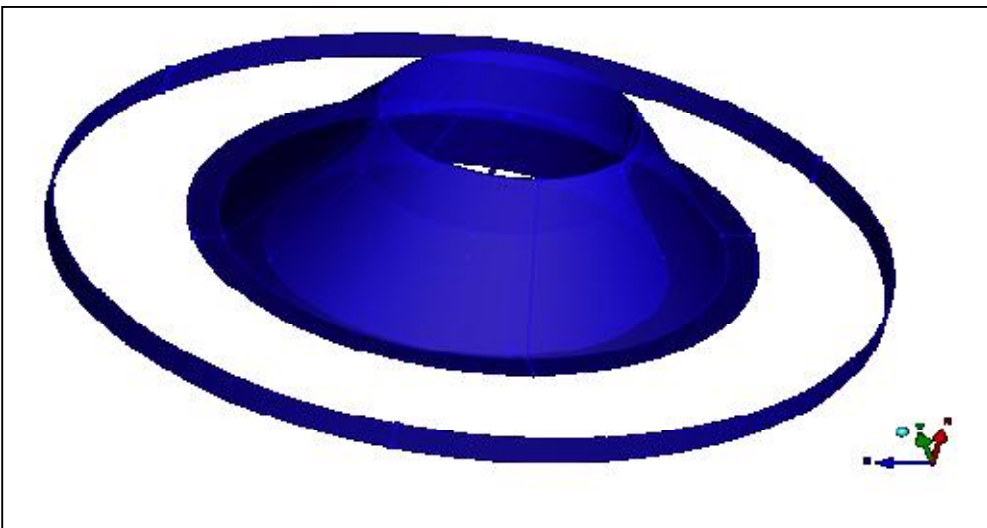


Σχήμα 5.3

Σχηματίζονται δύο ομόκεντροι κύκλοι διαμέτρων  $\Phi 13.26$  και  $\Phi 14.9$  αντίστοιχα με κέντρο που απέχει από τον κατώτερο κύκλο  $Dx=1$  και ενώνονται τα κατάλληλα σημεία για τη δημιουργία του εξωτερικού κώνου ώστε να οριστούν οι επιφάνειες (Σχήμα 5.4 , Σχήμα 5.5)



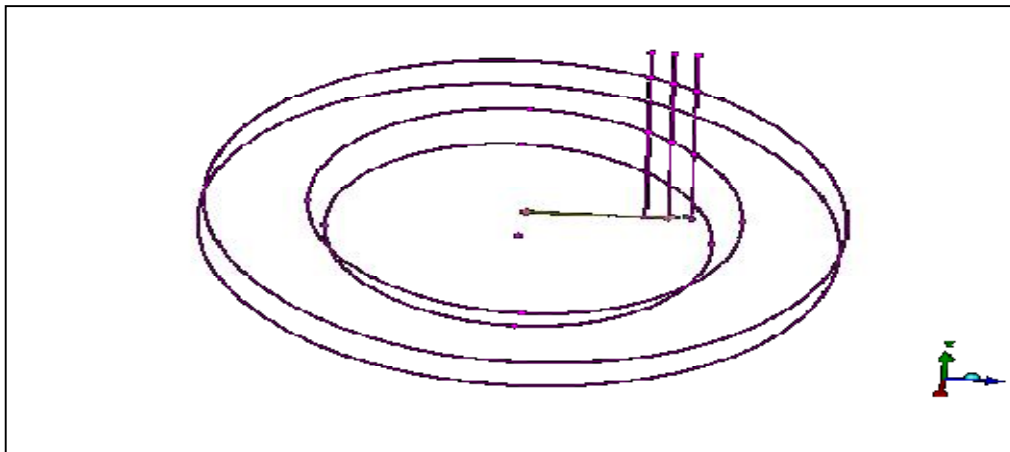
Σχήμα 5.4



Σχήμα 5.5

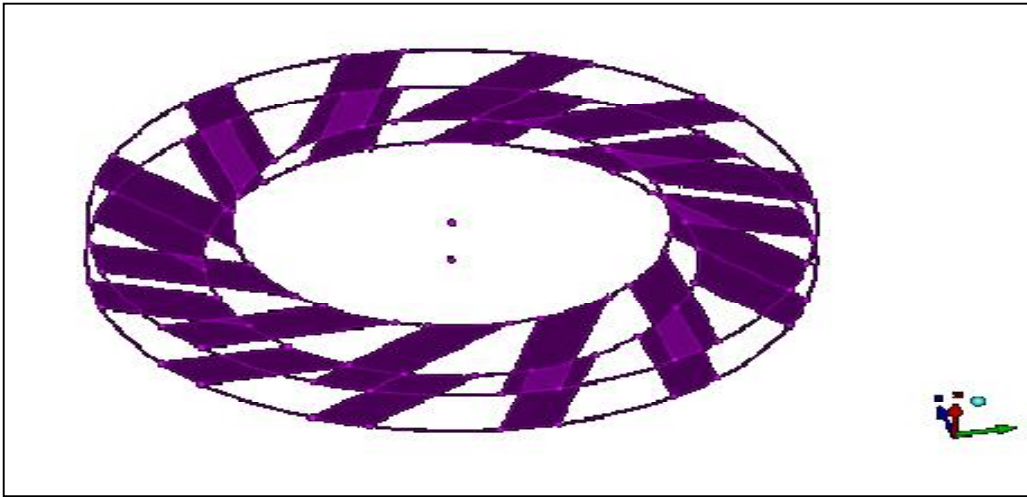


Αντιγράφονται σε απόσταση 2.2 οι καμπύλες και τα σημεία που απαρτίζουν τους κύκλους Φ22 και Φ13.26. Σύμφωνα με τις διαστάσεις του σχήματος δημιουργούνται βοηθητικά σημεία και καμπύλες με την εντολή επιλογής σημείου και απόστασής από το προς κατασκευή σημείο ανά άξονες (base point and delta και curve-curve intersection) (Σχήμα 6.2).



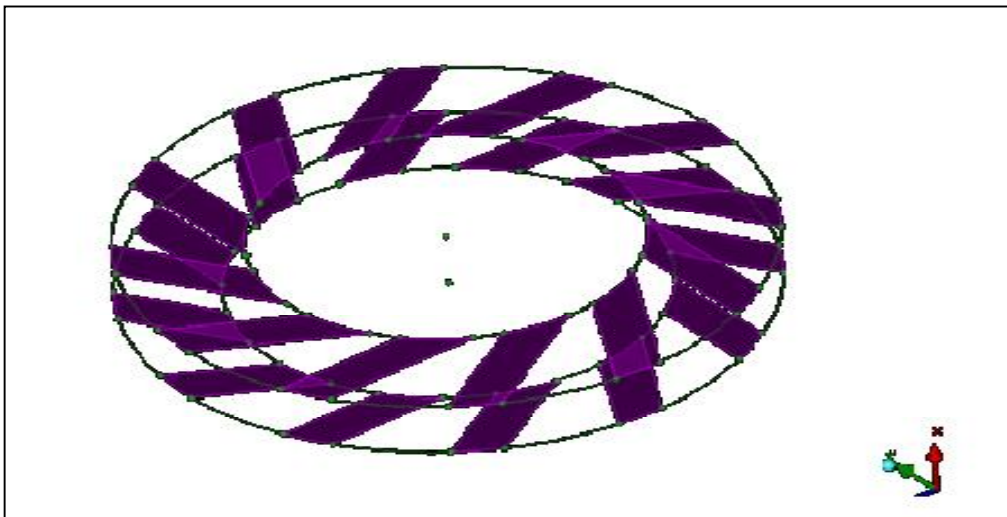
Σχήμα 6.2

Ομοίως γίνονται και οι εργασίες για τον παράλληλο δακτύλιο. Αφού διαγραφούν τα μη απαραίτητα βοηθητικά στοιχεία, επιλέγουμε διαδοχικά την άνω και κάτω πλευρά της μίας οπής που δημιουργήθηκε και τις περιστρέφουμε σε γωνία  $30^\circ$  με την εντολή `transform geometry → rotate, copies 11, angle 30, x-axis`. Με επιλογή κατάλληλων καμπυλών ορίζονται και οι επιφάνειες (Σχήμα 6.3).



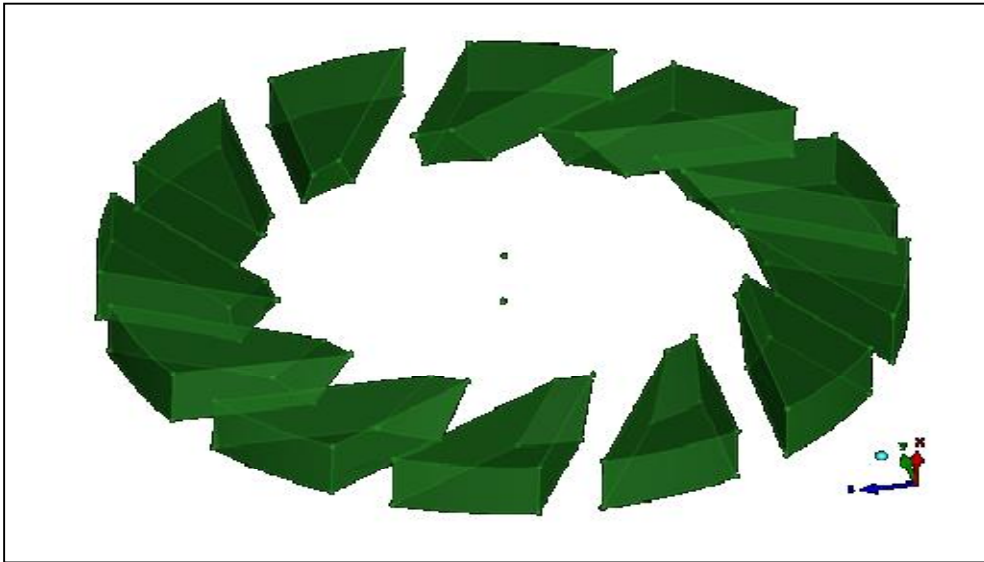
Σχήμα 6.3

Επιλέγοντας τις εξωτερικές και εσωτερικές καμπύλες και τα σημεία τους, γίνεται ενσωμάτωση στο νέο κομμάτι NOZZLES5SOLID (Σχήμα 6.4)



Σχήμα 6.4

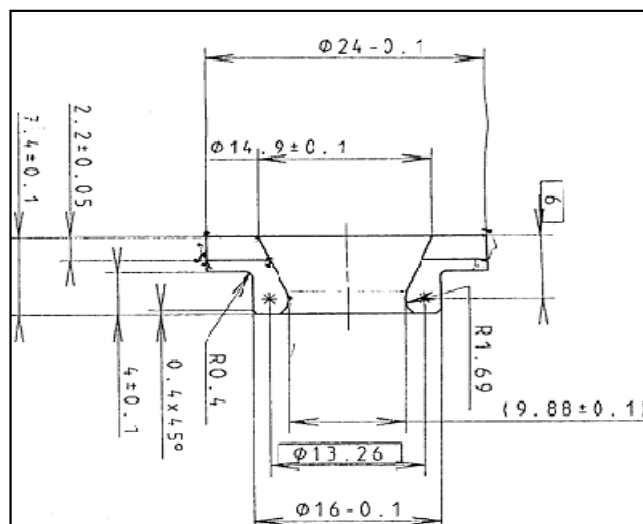
Με την εντολή δημιουργίας καμπυλών από σημεία, φέρονται τα ευθύγραμμα τμήματα που ορίζουν τις συμπαγείς επιφάνειες του διαχυτή 12 οπών. Επιλέγοντας τις καμπύλες ορισμού επιφάνειας create surface → from curves, γίνεται ο ορισμός τους (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5

### 5.5 Τμήμα Εισαγωγής και Διαμοιρασμού

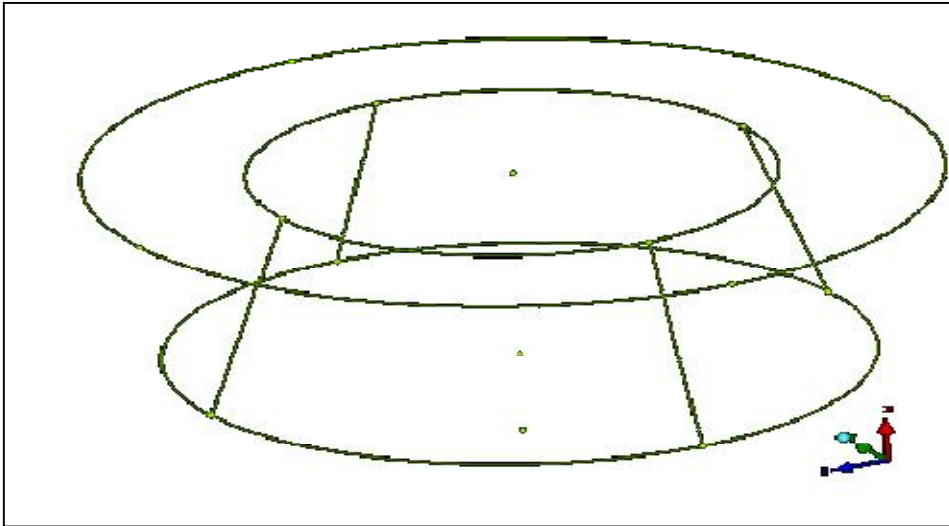
Το έβδομο κομμάτι αποτελείται από το τμήμα εισαγωγής και διαμοιρασμού του αέρα στους διαχυτές (Σχήμα 7).



Σχήμα 7

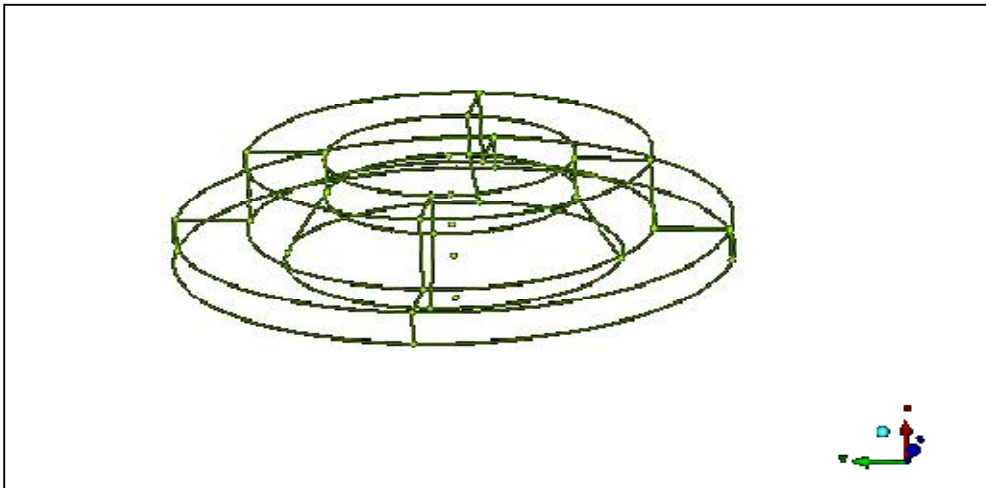
Με χρησιμοποίηση της ίδιας τεχνικής οικειοποίησης σχεδιαστικών στοιχείων από το προηγούμενο κομμάτι, σχεδιάζεται το κάτω μέρος του κομματιού και δημιουργούνται τα κατάλληλα σημεία και καμπύλες

σύμφωνα με τις διαστάσεις με τις εντολές create point, create curve.(Σχήμα 7.1)



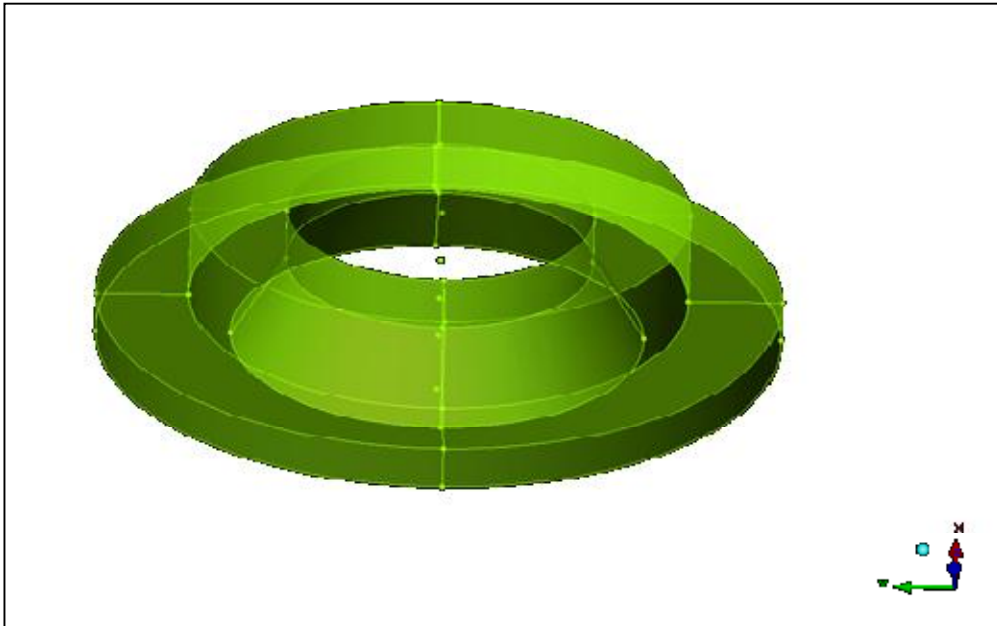
Σχήμα 7.1

Με την προσθήκη των κατάλληλων καμπυλών ολοκληρώνεται η σχεδίαση του κομματιού και οριοθετούνται οι επιφάνειες προς ορισμό (Σχήμα 7.2)



Οι επιφάνειες ορίζονται με την εντολή create surface, from lines και απεικονίζονται στο σχήμα 7.3

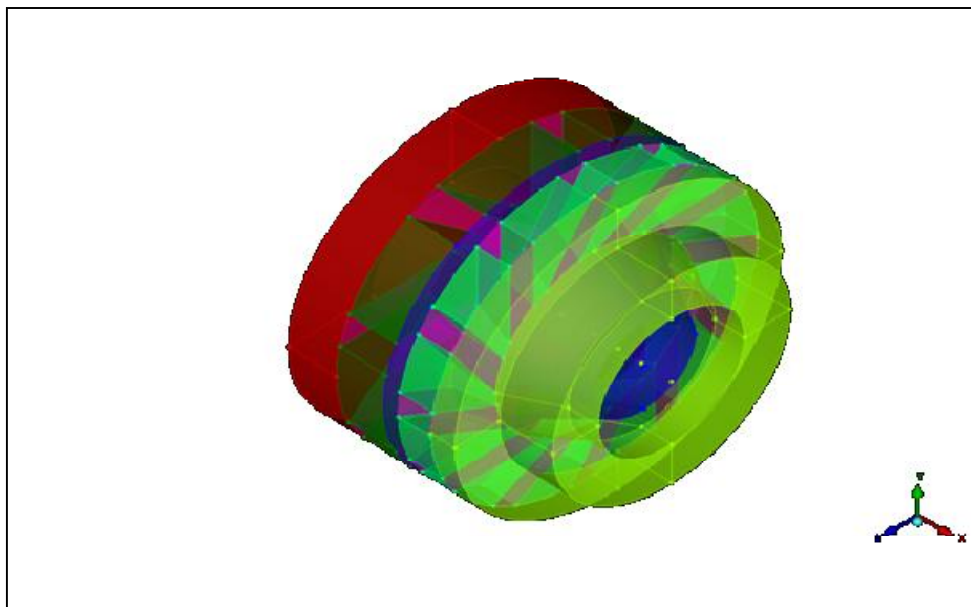




Σχήμα 7.3

### 5.6 Τελική Μορφή Μοντέλου

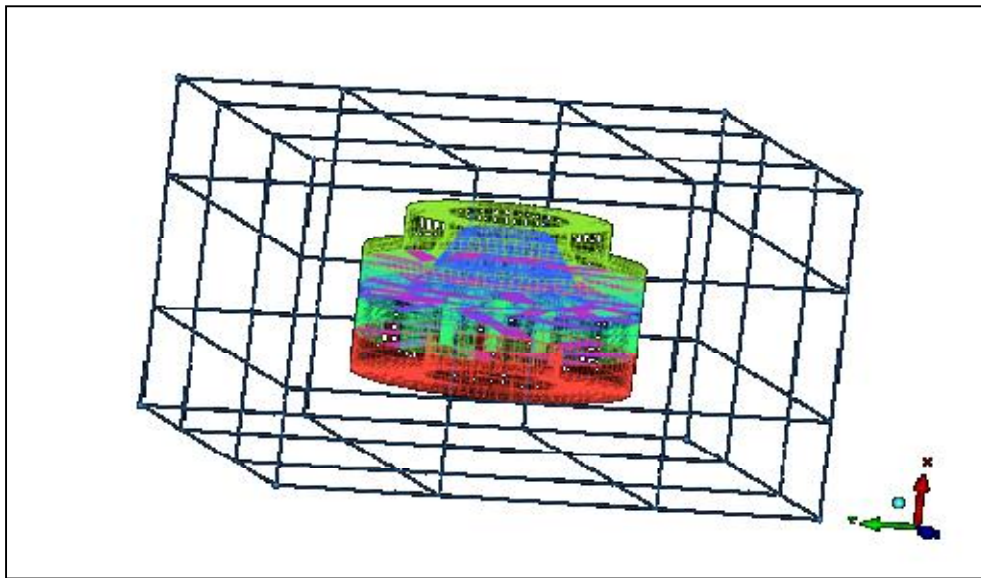
Η τελική μορφή του μοντέλου, με τις επιφάνειες των επιμέρους τμημάτων του έτσι όπως διαμορφώθηκε είναι η εξής εικονιζόμενη στο σχήμα 8.



Σχήμα 8

### 5.7 Ορισμός Όγκου Ελέγχου

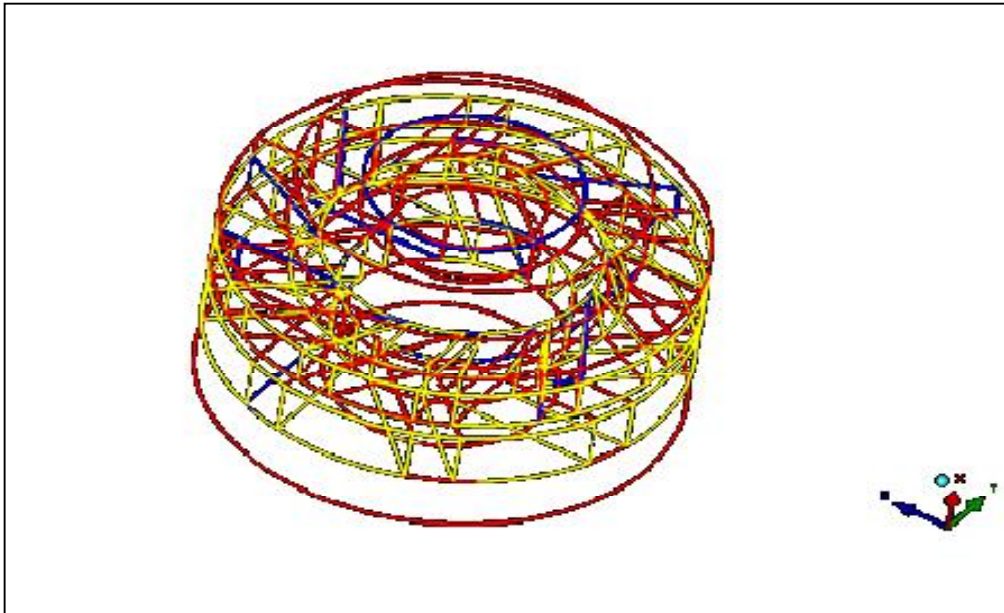
Στη συνέχεια θα πρέπει να οριστεί ένας χώρος που θα περικλείει την τοπολογία του μοντέλου (όγκος ελέγχου). Χρησιμοποιώντας την εντολή `create standard geometry` → `box` από το μενού `create surface`, επιλέγονται όλες οι επιφάνειες σύμφωνα με τα όρια της σχεδιασμένης οντότητας, με κλίμακα 2 ανά άξονα (X,Y,Z) ώστε να ξεχωρίζουν από τον όγκο ελέγχου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται το κομμάτι GEOM. (Σχήμα 9)



Σχήμα 9

### 5.8 Έλεγχος και Διακριτοποίηση

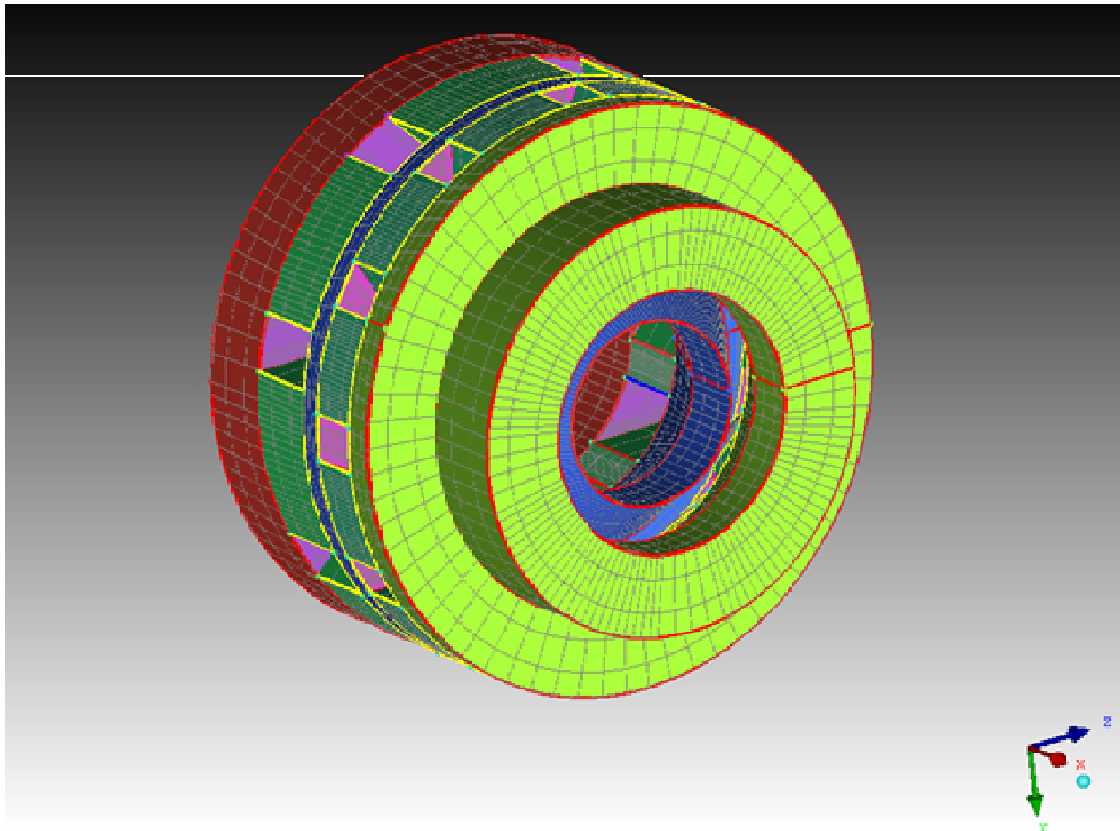
Αφού ολοκληρώθηκε η σχεδίαση του μοντέλου, σειρά έχει ο έλεγχος του για την προετοιμασία του `meshing` δηλαδή για την διακριτοποίησή του σε πολύ μικρά κομμάτια ενός πλέγματος βάσει των οποίων θα μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα όσον αφορά την εξομοίωση συνθηκών. Σημαντικό ρόλο γι' αυτόν το σκοπό παίζει η εντολή `geometry repair` και η ακρίβεια – ανοχή μεταξύ των σχεδιαστικών στοιχείων που δίνεται στο πρόγραμμα. Η ελάχιστη σχεδιαστική ανοχή μεταξύ των στοιχείων δίνεται σχεδιαστικά ως 0.01. Εισάγοντας στο πρόγραμμα ανοχή (tolerance)  $1 \times 10^{-6}$  το πρόγραμμα μετά από επεξεργασία εμφανίζει με χρωματισμένες γραμμές τα προβληματικά σημεία (σχήμα 10).



Σχήμα 10

Οι κίτρινες γραμμές αφορούν στις μονές καμπύλες που εφάπτονται σε μία μόνο επιφάνεια. Οι κόκκινες σε καμπύλες που εφάπτονται σε δύο και οι μπλε σε τρεις ή και περισσότερες επιφάνειες. Σε περίπτωση που εμφανιστούν πράσινες γραμμές, πρόκειται για καμπύλες που δεν εφάπτονται σε καμία επιφάνεια – ελεύθερες. Σε περίπτωση που η ακρίβεια υπολογισμού ξεπεράσει το ελάχιστο όριο που έχει τεθεί, θα πρέπει να επανεξεταστεί η σχεδίαση του μοντέλου για τυχόν σφάλματα.

Η ακρίβεια που προσδιορίστηκε ως η βέλτιστη που ικανοποιεί τις επιθυμητές συνθήκες είναι για  $\text{tolerance} = 0.0004$ . Και όπως φαίνεται από την απεικόνιση του σχήματος 11 εμφανίζονται μόνο κόκκινες και κίτρινες γραμμές όπως ήταν αναμενόμενο.



Σχήμα 11

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η διαδικασία σχεδίασης που παρουσιάστηκε αφορά στη γεωμετρία (σύνολο εντολών Geometry στο περιβάλλον σχεδίασης Ansys) του μοντέλου διαχύτη αέρα σε θάλαμο ανάμειξης (και καύσης). Στη συγκεκριμένη περίπτωση και χάριν δικής μας διευκόλυνσης, η σχεδίαση ξεκίνησε με τα γεωμετρικά στοιχεία κοντά στην έξοδο της ροής και προχώρησε προς αυτά στην είσοδό της. Οι αναφορές που δόθηκαν για τις θέσεις των στοιχείων (επάνω, κάτω κτλ) που αποτελούσαν κάθε κομμάτι, έγιναν σε σχέση με τον τρόπο που απεικονίζονται στο προχωρημένο περιβάλλον σχεδίασης του ANSYS ICEM.

Η μεθοδολογία ανακατασκευής στο περιβάλλον αυτό έγινε με βάση τις παραμέτρους και τις μακροεντολές που αναφέραμε, έχοντας υπόψη τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Με βάση αυτά είναι πλέον δυνατή τόσο η συστηματική επανάληψη της διεργασίας ανακατασκευής, τόσο και η τροποποίηση οποιαδήποτε στοιχείων της συσκευής που τυχόν ζητηθεί σε μελλοντική εργασία.

Με την εκπόνηση της εργασίας αυτής και την πραγμάτωση της λεπτομερούς υπολογιστικής ανακατασκευής της γεωμετρίας του μοντέλου, έγιναν οι απαραίτητοι έλεγχοι και εισήχθησαν οι κατάλληλες γεωμετρικές παράμετροι που εξασφαλίζουν τη σωστή επιφανειακή διακριτοποίηση και την περαιτέρω χωρική δικτύωση του για την ακριβή εξομοίωση των συνθηκών λειτουργίας του με μεθόδους CFD. Χωρίς την παρούσα μελέτη θα ήταν αδύνατη η ακριβής αναπαράσταση των συνοριακών συνθηκών ροής μέσα από το σύστημα των διαχυτών και προς το σύστημα του θαλάμου RQL.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η χρήση των υπολογιστικών συστημάτων διευκολύνει την επίλυση σημαντικών προβλημάτων και μειώνει τον χρόνο και το κόστος κατασκευής των υπό μελέτη μοντέλων. Αυτή η διαπίστωση είναι που επαληθεύεται και μέσω της εργασίας αυτής, καθώς η κατασκευή ενός υπό κλίμακα πραγματικού μοντέλου, σε αντίθεση με την υπολογιστική του εκδοχή, θα ενείχε σημαντικά μεγαλύτερο κόστος τόσο σε χρόνο όσο και σε χρηματική αξία αλλά και σε επίπεδο ακρίβειας στην κατασκευή του.

## Βιβλιογραφία

Ρευστομηχανική Ά τόμος, Ν.Δ. Νανούση, εκδόσεις Τ.Ε.Ι. Πάτρας

Transport phenomena, W. J. Beek | K. M. K. Mutzall | J.W. van Heuven, εκδόσεις Wiley

Reports:

- i) Large Engines Combustor Demonstration, First Advanced Cooling Mixing Concept Isothermal Mixing Tests, by I.D. Kalogirou and D.D. Papailiou
- ii) CFD predictions for cement kilns including flame modeling, heat transfer and clinker chemistry

Διαδικτυακός ιστότοπος:

<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/handbook/3.2.1.3.pdf>