

ΚΥΡΙΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Υπολογιστική Μελέτη του Πεδίου  
Ροής Εντός Δικέλυφης Όψης  
Κτηρίου

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Τομέας: Ρευστών

Επιβλέπων: Μπούρης Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2021

**KYRIOS ANDREAS**

# Numerical Study of the Flow Field in a Double Skin Building Facade

**Section: Fluid mechanics**

**Supervisor: Bouris Dimitrios, Assistant Professor NTUA**



**SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Athens 2021**

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Κυρίος Ανδρέας

## Ευχαριστίες

Η διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν το τελευταίο στάδιο των φοιτητικών μου χρόνων. Οι γνώσεις οι οποίες απέκτησα κατά την διάρκεια ήταν πολύτιμες και η διαδικασία εκπόνησής της αποτέλεσε το ιδανικό κλείσιμο των σπουδών μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Δημήτριο Μπούρη, Αναπληρωτή καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π, ο οποίος επέβλεπε την διπλωματική μου εργασία και για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησής της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη της καθ' όλη την πορεία μου από τα παιδικά μου χρόνια μέχρι τώρα. Οι εμπειρίες μου στα φοιτητικά μου χρόνια δεν θα ήταν ίδιες χωρίς τους αδερφικούς μου φίλους με τους οποίους έζησα αξέχαστες στιγμές και στέκονταν πάντα δίπλα μου σε κάθε δυσκολία. Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματική εργασία σημάνει και την ολοκλήρωση των σπουδών μου στην Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με τις αναμνήσεις που απέκτησα όλα αυτά τα χρόνια να παραμένουν βαθιά χαραγμένα στο μυαλό μου.

## Περίληψη

Η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί μείζων ζήτημα για την ανθρωπότητα και η εύρεση νέων μεθόδων για την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων δύναται να προσφέρει λύσεις στην περιβαλλοντική ρύπανση. Η χρήση γυάλινων δικέλυφων όψεων αποτελεί μια τέτοιου είδους καινοτομία, η οποία χρησιμοποιείται τόσο στην μοντέρνα αισθητική των κτηρίων όσο και στην συμβολή της στην μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων των κτηρίων. Η μελέτη της επίδρασης των δικέλυφων όψεων στα κτήρια είναι ένα καινούριο σχετικά ζήτημα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων που έχουν προέλθει από πειραματικές μελέτες με αυτών που εξάγονται από επίλυση με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Η εργασία αποτελεί μία παραμετρική μελέτη του προβλήματος με βασική μεταβλητή η οποία διαφοροποιεί τις προς εξέταση περιπτώσεις μεταξύ τους να είναι το πλάτος του διακένου ανάμεσα στην εξωτερική τοιχοποιία του κτηρίου και της γυάλινης όψης, ενώ το ύψος και το μήκος του κτηρίου παραμένουν σταθερά. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση κώδικα έρχονται σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα και με βάση την σύγκριση αυτή εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα. Η μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση των στροβίλων που δημιουργούνται εντός του κλωβού και κυρίως στις γωνίες της υπό μελέτη γεωμετρίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον στροβιλισμό της ροής στην γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ του εξωτερικού κελύφους του κτηρίου και του δαπέδου. Στην περιοχή αυτή αναπτύσσεται ένας οριζόντιος διαμήκης στρόβιλος, του οποίου η διάμετρος αυξάνει με την αύξηση του πλάτους του κλωβού. Ταυτόχρονα, η μεταβολή του πλάτους είναι αντιστρόφως ανάλογη της πτώσης της μέσης αδιάστατης πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο από το διάκενο.

Η χρήση γυάλινων δικέλυφων όψεων ανήκει σε έναν τομέας που έχει πολλά περιθώρια ανάπτυξης και μπορούν να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα με βάση τα οποία θα μπορεί να αξιολογηθεί.

## Abstract

Environmental protection is a major issue for humanity and finding new ways to save energy can offer solutions to environmental pollution. The use of double-sided glass facades is an innovation which is used both for the modern aesthetics of buildings and in its contribution to reducing the energy requirements of buildings. The study of the effect of double-sided facades on buildings is a relatively new issue.

The present dissertation aims to identify the results obtained from experimental studies with those extracted from calculations by computational fluid mechanics methods. The present work offers a parametric study of the problem with a basic variable which differentiates the cases to be examined from each other to be the width of the gap between the exterior masonry of the building and the glass face, while the height and length of the building remain constant. The results obtained from the code solution are compared with the experimental ones and, based on this comparison, corresponding conclusions are drawn. The study focuses on the analysis of turbines created inside the cage and mainly at the corners of the investigated geometry. Particular emphasis is placed on the vortex of the flow at the angle formed between the outer shell of the building and the floor. A horizontal longitudinal turbine develops in this area, the diameter of which increases with the width of the cage. At the same time, the change in width is inversely proportional to the drop in mean dimensionless pressure at the inlet and the outlet of the gap.

The use of double-sided glass facades is a section that has a lot of room for development and many conclusions can be drawn based on which it can be evaluated.

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
1 Εισαγωγή .....	9
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	9
1.2 Μέρη από τα οποία αποτελείται μια γυάλινη δικέλυφη όψη. ....	10
1.2.1 Κατηγοριοποίηση δικέλυφων όψεων .....	10
1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δικέλυφων όψεων.....	13
1.3.1 Πλεονεκτήματα.....	14
1.3.2 Μειονεκτήματα .....	14
1.4 Φυσικός αερισμός κτηρίων .....	15
1.5 Φωτοβολταϊκά.....	15
1.5.1 Ενεργειακή απόδοση PV-DSF/PVB-DSF.....	17
1.5.2 Επίδραση του μηχανισμού εξαερισμού .....	19
1.6 Σκοπός της εργασίας .....	20
1.7 Οριοθέτηση.....	20
1.8 Δομή της εργασίας. ....	20
2 Μαθηματικό Μοντέλο.....	22
2.1 Εισαγωγή στην μηχανική των ρευστών.....	22
2.1.1 Βασικές ιδιότητες ρευστών .....	22
2.1.2 Κατηγορίες ροών .....	23
2.1.3 Οριακά στρώματα.....	23
2.1.4 Εισαγωγή στην τύρβη .....	24
2.2 Εξισώσεις Navier-Stokes.....	25
2.2.1 Reynolds Averaged Navier-Stokes.....	26
2.2.2 Η υπόθεση Boussinesq (1877).....	27
2.3 Μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων .....	27
3 Υπολογιστική επίλυση προβλήματος .....	29
3.1 Διαδικασία επίλυσης .....	29
3.2 Περιγραφή της μεθόδου επίλυσης .....	30
3.2.1 Ολοκλήρωση των εξισώσεων .....	31
3.2.2 Ανάντι παραγωγή .....	33
3.2.3 Διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης.....	34
3.2.4 Εξίσωση πίεσης.....	34
3.2.5 Όρια υπολογιστικού χώρου .....	36
3.2.6 Συναρτήσεις Τοίχου (Wallfunctions) .....	36
3.2.7 Οριακές συνθήκες .....	37
3.2.8 Υποχαλάρωση.....	38
3.3 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας.....	38
3.4 Υπολογιστικό Πρόγραμμα .....	39
4 Ανεξαρτησία πλέγματος .....	41
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά γεωμετρίας .....	41
4.2 Ανεξαρτησία πλέγματος .....	43

4.2.1	Υπολογισμός αδιάστατης πίεσης .....	45
4.2.2	Κατανομές βασικών μεγεθών .....	46
4.2.2.4	Κατανομές τυρβώδους κινητικής ενέργειας .....	48
4.3	Υπόλοιπα υπολογιστικών εξισώσεων .....	50
5	Αποτελέσματα .....	51
5.1	Γενικά .....	51
5.1.1	Περιγραφή του πειράματος .....	51
5.1.2	Γεωμετρία .....	51
5.2	Αρχικές συνθήκες .....	53
5.3	Υπολογιστικά αποτελέσματα .....	57
5.3.1	Γεωμετρία 1d .....	57
5.3.2	Γεωμετρία 2d .....	66
5.3.3	Γεωμετρία 4d .....	77
5.3.4	Γεωμετρία 7d .....	83
6	Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	92
6.1	Γενικά .....	92
6.2	Οριζόντιος στρόβιλος .....	93
6.3	Πτώση πίεσης .....	98
6.4	Ροή αέρα .....	99
6.5	Διαφοροποίηση στροβίλου στο διακένου εισόδου .....	100
6.6	Κλίση της ροής .....	103
6.6.1	Γεωμετρία 1d .....	104
6.6.2	Γεωμετρία 2d .....	105
6.6.3	Γεωμετρία 4d .....	106
6.6.4	Γεωμετρία 7d .....	106
6.7	Σύγκριση διαμέτρων κατακόρυφων στροβίλων .....	112
7	Συμπεράσματα-Σχόλια .....	115
7.1	Συμπεράσματα .....	115
7.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	116
8	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	117
9	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	121
10	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	122
11	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	123



## 1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή των γυάλινων δικέλυφων όψεων και αναλύεται η επίδραση των φωτοβολταϊκών πάνελ όταν αυτά προστίθενται στην κατασκευή.

### 1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού τα τελευταία χρόνια στον πλανήτη σε συνδυασμό με την τεχνολογική ανάπτυξη έχουν δημιουργήσει την ανάγκη για κάλυψη ολοένα και περισσότερων ενεργειακών απαιτήσεων. Ο άνθρωπος αναζητά λύσεις σε αυτό το πρόβλημα με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ερευνά ταυτόχρονα νέες καινοτόμες ιδέες με σκοπό την βέλτιστη και πλήρη αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων. Στην σύγχρονη εποχή, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην μελέτη νέων πρωτοπόρων τεχνολογιών που έχουν εφαρμογές στον σχεδιασμό κτηρίων. Οι τεχνολογίες αυτές αποσκοπούν στην εκμετάλλευση μορφών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, με στόχο την αξιοποίηση της θερμότητας και του ανέμου για τη κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων των κτηρίων. Μία καινοτομία, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ο σχεδιασμός κτηρίων με δικέλυφη όψη (1). Η ιδέα της εφαρμογής γυάλινων δικέλυφων όψεων προτάθηκε στα μέσα του 19ου αιώνα από τον Jean-Baptiste Jobard όταν ο διευθυντής του μουσείου βιομηχανίας στις Βρυξέλλες πρότεινε μία ιδέα εγκατάστασης συστημάτων μηχανικού εξαερισμού κτηρίων πολλαπλών όψεων. Βασικός στόχος ήταν η αξιοποίηση της θερμότητας για θέρμανση την χειμερινή περίοδο και για ψύξη την καλοκαιρινή. Η καινοτομία, παρόλα αυτά, ειδικά στην περίοδο αυτή, ήταν δύσκολο να εφαρμοσθεί. Προχωρώντας στις αρχές του 20ου αιώνα παρά την αντιμετώπιση τεχνικών δυσκολιών οι οποίες αφορούσαν στον αριθμό των παραθύρων από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές του παρελθόντος, υπήρχε το πρόβλημα της έλλειψης επαρκούς τεχνολογίας για την πλήρη μελέτη της κατασκευής. Φτάνοντας στην σύγχρονη εποχή, πολλά από τα προβλήματα που είχαν προκύψει στο παρελθόν αντιμετωπίστηκαν και ο σχεδιασμός κτηρίων με δικέλυφες όψεις έχει πλέον ιδιαίτερη απήχηση. Στο σύγγραμμα του Βέλγικου Ινστιτούτου Κτηριακών Εφαρμογών (Belgian Building Research Institute BBR) το 2002 (2) ορίζεται ως δικέλυφη όψη κτηρίου η παρακάτω πρόταση.

«Η πρόσοψη που καλύπτει έναν ή περισσότερους ορόφους κατασκευασμένη με πολλαπλές γυάλινες κοιλότητες. Σε αυτό το είδος πρόσοψης, η κοιλότητα του αέρα που βρίσκεται ανάμεσα στα τοιχώματα είναι φυσικά ή μηχανικά αεριζόμενη. Η μέθοδος εξαερισμού του κλωβού στον οποίο βρίσκεται ο αέρας μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το χρόνο. Οι συσκευές και τα συστήματα που είναι ενσωματωμένα για τη βελτίωση του εσωτερικού κλίματος μπορεί να χρησιμοποιούν τόσο μηχανική υποστήριξη όσο και πλήρη εξάρτηση από εξωτερικές πηγές ενέργειας. Τον περισσότερο καιρό τα συστήματα αυτά λειτουργούν με ημιαυτόματο τρόπο μέσω συστημάτων ελέγχου».

Η ανάπτυξη των δικέλυφων όψεων έχει οδηγήσει στην αυτόνομη κάλυψη αναγκών των κτηρίων στα οποία χρησιμοποιείται και συμβάλλει σε τομείς οι οποίοι δημιουργούν ένα καλύτερο περιβάλλον εργασίας. Η ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής που έχει επέλθει τα τελευταία χρόνια συνάδει με την ιδέα της εγκατάστασης μίας γυάλινης δικέλυφης όψης, η οποία

προσδίδει στο κτήριο μία μοντέρνα αισθητική και διαφέρει με αυτή των προηγούμενων χρόνων. Ταυτόχρονα, προσδίδει στο κτήριο μόνωση, καθώς μειώνεται η όχληση των εργαζομένων από εξωτερικούς θορύβους και επιπλέον παρέχει προστασία από δυνατούς ανέμους. Ενισχύεται, επίσης, ο φυσικός εξαερισμός μέσω της εισόδου του αέρα στον κλωβό. Η χρήση της, κατόπιν, βοηθάει στην κάλυψη αναγκών δροσισμού κατά την περίοδο του καλοκαιριού και θέρμανσης τον χειμώνα, καθώς και στην ενίσχυση του φυσικού φωτισμού με φυσικό τρόπο, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ενεργειακές καταναλώσεις και οι απαιτήσεις του κτηρίου. Συμπερασματικά, η προστασία του περιβάλλοντος και η ανάπτυξη σχετικών εφαρμογών καθίσταται απαραίτητος τομέας μέριμνας στην σημερινή κοινωνία, καθώς έχει παρατηρηθεί έντονη ρύπανση του περιβάλλοντος και οι γυάλινες δικέλυφες όψεις αποτελούν μία από τις εφαρμογές αυτές.

## **1.2 Μέρη από τα οποία αποτελείται μια γυάλινη δικέλυφη όψη.**

Η γυάλινη δικέλυφη όψη ενός κτηρίου απαρτίζεται από το εσωτερικό κέλυφος του κτηρίου και από το εξωτερικό κέλυφος, το οποίο είναι μια γυάλινη όψη, όπως παραθέτουν οι Χρυσομαλλίδου κ.ά. (3). Το πλάτος του διακένου ανάμεσά τους, κλωβός, κυμαίνεται μεταξύ 20cm και μπορεί να ξεπεράσει και τα 2m. Στη συνέχεια, τόσο στο ανώτερο, όσο και στο κατώτερο ύψος του κλωβού, υπάρχουν ανοίγματα, τα οποία επιτρέπουν την ροή αέρα. Στην εσωτερική κοιλότητα μπορεί να υπάρχει είτε φυσικός αερισμός είτε να γίνεται χρήση μηχανημάτων υποστήριξης για την ρύθμιση της παροχής αέρα. Τοποθετούνται, επίσης, παράθυρα με τα οποία ο χρήστης/εργαζόμενος μπορεί να έχει άμεση πρόσβαση στον φυσικό αερισμό και εγκαθίσταται, σε κάποιες περιπτώσεις, ένα αυτόματο μηχάνημα σκίασης, το οποίο βρίσκεται εντός του κλωβού και συνήθως στο πίσω μέρος της γυάλινης όψης, σε απόσταση ίση με το 1/3 του πλάτους του διακένου. Τα ανοίγματα του εσωτερικού κελύφους αποτελούνται κατά κανόνα από διπλούς υαλοπίνακες.

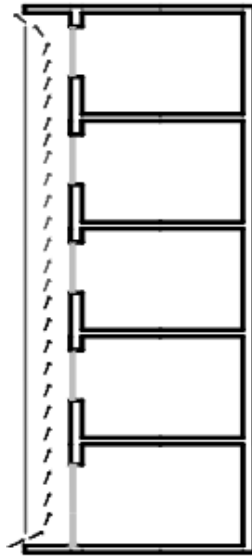
### **1.2.1 Κατηγοριοποίηση δικέλυφων όψεων**

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη γυάλινων δικέλυφων όψεων και μπορούν να ενταχθούν σε διάφορες κατηγορίες. Κάποιες από τις βασικές κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται οι δικέλυφες όψεις, οι οποίες προτάθηκαν από το Βέλγικο Ινστιτούτο Κτηριακών Εφαρμογών (Belgian Building Research Institute BBR) (2) και καταγράφονται και σε επιστημονικές αναφορές (3), (4), (5), παρουσιάζονται παρακάτω:

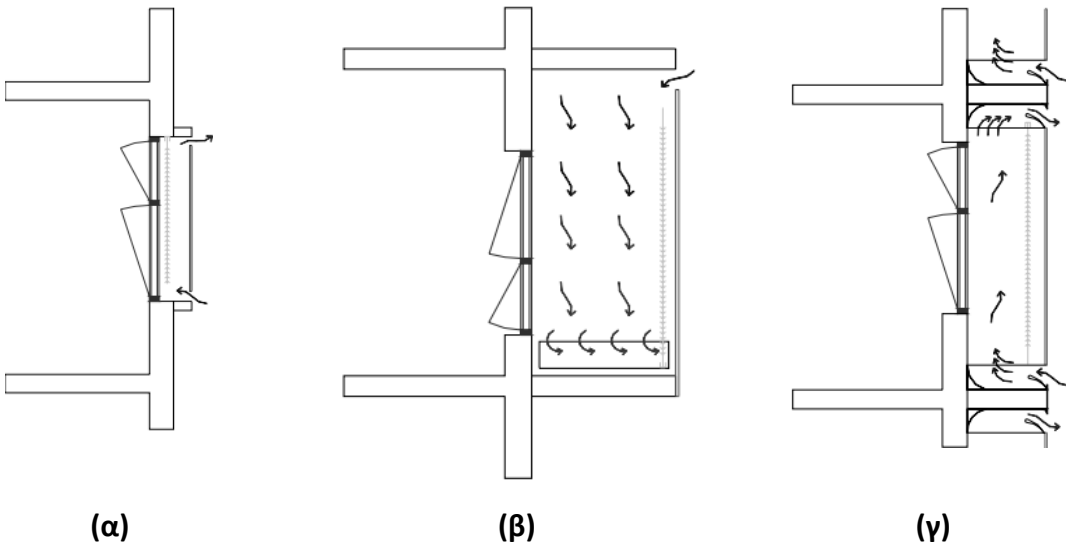
1. Με βάση τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά
  - Έκταση της όψης σε όλο το ύψος του κτηρίου (Εικ. 1)
  - Τμήματα μεταξύ των ορόφων
    - i. Κιβωτοειδούς παραθύρου (Εικ. 2α)
    - ii. Κιβωτοειδούς αγωγού (Εικ. 2β)
    - iii. Διαδρόμου (Εικ. 2γ)
  
2. Με βάση τον μηχανισμό αερισμού

- Φυσικού αερισμού
  - Μηχανικού αερισμού
3. Με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο εξαερισμός
- Εξωτερικής ανακυκλοφορίας (Εικ. 3α)
  - Εσωτερικής ανακυκλοφορίας (Εικ. 3β)
  - Εξωτερικού αερισμού(Εικ. 4α)
  - Εσωτερικού αερισμού (Εικ. 4β)
  - Αποθήκευσης αέρα (Εικ. 5)

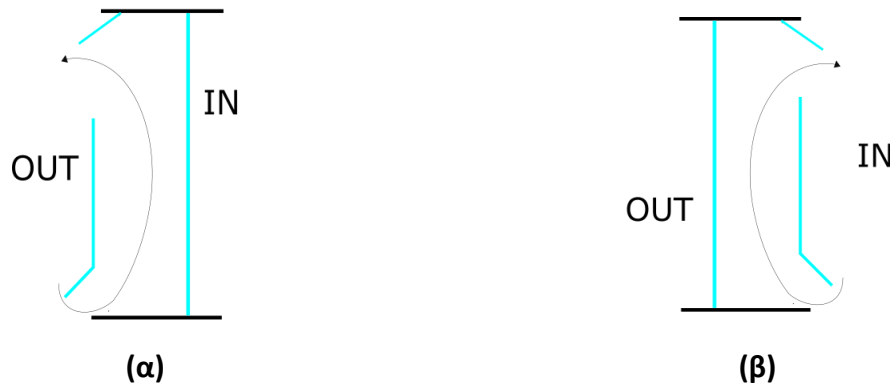
Στην πρώτη περίπτωση κατηγοριοποίησης (με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά), αναφέρθηκαν δύο βασικές κατηγορίες εκ των οποίων η μία (τμημάτων μεταξύ των ορόφων) υποδιαιρέθηκε σε τρεις υποκατηγορίες. Η δικέλυφη όψη η οποία εκτείνεται καθ' όλο το ύψος του κτηρίου δεν διαχωρίζεται σε μικρότερα μέρη και ο αέρας ρέει από την είσοδο σε αυτή έως την έξοδο χωρίς να παρεμβάλλεται κάτι (Εικ. 1). Ωστόσο, μπορεί να γίνει υποδιαίρεση της όψης σε διάφορα τμήματα ανά μέρη καθ' ύψος της κατασκευής. Η δικέλυφη όψη τύπου κιβωτοειδούς παραθύρου αποτελείται από μεμονωμένα τμήματα/κουτιά από γυάλινες πλάκες, τα οποία είναι συνήθως προσαρτημένα στα παράθυρα του κτηρίου. Τα εξωτερικά γυάλινα τοιχώματα επιτρέπουν την ροή αέρα στην κατακόρυφη κατεύθυνση και συμβάλουν στον αερισμό του χώρου εντός της δικέλυφης όψης καθώς και του χώρου εντός του κτηρίου. Τα εσωτερικά γυάλινα πλαίσια μπορούν να βρίσκονται είτε σε θέση ανάκλισης είτε να ανοίγουν. Οι όψεις τύπου κιβωτοειδούς αγωγού είναι παρεμφερείς με αυτές του τύπου παραθύρου. Συνδέονται κατακόρυφα με το ύψος του κτηρίου και αποτελούνται από ορθογώνια παράθυρα και κατακόρυφους αγωγούς εξαερισμού. Στην τελευταία περίπτωση, ο αέρας εισέρχεται από την βάση του παραθύρου και καθοδηγείται μέσω του αγωγού στην έξοδο, η οποία βρίσκεται στο άνω τμήμα. Το ύψος τους στη γενική περίπτωση είναι αντίστοιχο με το ύψος ορόφου. Την τελευταία υποκατηγορία αποτελούν οι όψεις τύπου διαδρόμου. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται ένας διάδρομος ο οποίος είτε εκτείνεται σε όλο το μήκος του κτηρίου είτε στον οποίο παρεμβάλλονται ενδιάμεσα κατακόρυφα τμήματα για την βελτίωση της ακουστικής, της παροχής πυροπροστασίας και του αερισμού και συνήθως έχει το ύψος του ορόφου. Οι θυρίδες εξόδου τοποθετούνται εναλλασσόμενα μεταξύ των ορόφων για την αποφυγή μεταφοράς αέρα από τα κατώτερα διαζώματα στα ανώτερα.



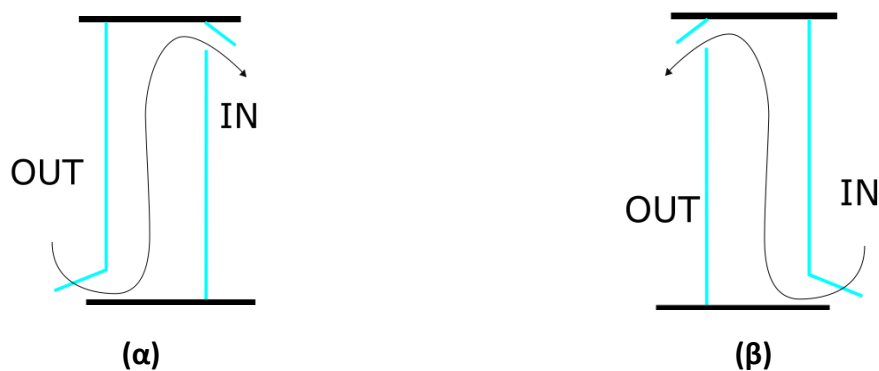
Εικ. 1: Δικέλυφη όψη σε όλο το ύψος του κτηρίου (3)



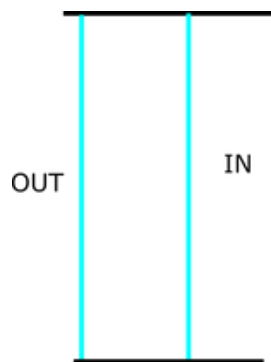
Εικ. 2: Δικέλυφη όψη σε υποτημήματα του κτηρίου: (α) Κιβωτοειδούς παραθύρου, (β) Κιβωτοειδούς αγωγού, (γ) Διαδρόμου (3)



Εικ. 3: (α) Εξωτερικής ανακυκλοφορίας, (β) Εσωτερικής ανακυκλοφορίας



Εικ. 4: (α) Εξωτερικού αερισμού, (β) Εσωτερικού αερισμού



Εικ. 5: Αποθήκευσης αέρα

### 1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δικέλυφων όψεων

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφέρθηκαν συνοπτικά κάποια από τα οφέλη που δύναται να επιφέρει η εγκατάσταση της δικέλυφης όψης. Στην παράγραφο αυτή, θα γίνει μία πιο εκτενής ανάλυσή τους. Παρόλα αυτά, η δικέλυφη όψη είναι μία κατασκευή η οποία βρίσκεται στο στάδιο ανάπτυξής της και αυτό συνεπάγεται ότι σε κάποιους τομείς μπορεί να

παρουσιάζει ατέλειες. Αξίζει, λοιπόν, να παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν για να γίνει μία αξιολόγηση της νέας αυτής πρότασης, δηλαδή, της εγκατάστασης γυάλινης δικέλυφης όψης. Τα παρακάτω στοιχεία αποτελούν αποτέλεσμα συγκριτικής μελέτης μεταξύ διαφόρων ειδικών επί του θέματος. Κάποια από τα παρακάτω συμπεράσματα εντάσσονται και στα πλεονεκτήματα και στα μειονεκτήματα καθώς οι επιστήμονες δεν έχουν αποφανθεί πλήρως για αυτά.

### 1.3.1 Πλεονεκτήματα

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που εντοπίστηκαν μετά από βιβλιογραφική επισκόπηση (4), (6), (7), παρατίθενται παρακάτω.

- Χαμηλότερο κόστος
- Ακουστική μόνωση
- Θερμική μόνωση
  - i. Χειμερινής περιόδου
  - ii. Καλοκαιρινής περιόδου
- Νυχτερινός αερισμός
- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Προστασία μηχανημάτων σκίασης και φωτισμού
- Μείωση πιέσεων από ανέμους
- Φυσικός αερισμός
- Πυροπροστασία
- Χαμηλές τιμές συντελεστών U-g

### 1.3.2 Μειονεκτήματα

Μερικά από τα μειονεκτήματα που εντοπίστηκαν μετά από βιβλιογραφική επισκόπηση (4), (6), (7) παρατίθενται παρακάτω.

- Υψηλότερο κόστος
- Πυροπροστασία
- Μείωση διαθέσιμου χώρου
- Κόστη συντήρησης
- Υπερθέρμανση
- Αύξηση βάρους κατασκευής
- Ακουστική μόνωση μεταξύ ορόφων

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα θα αναλυθούν περαιτέρω τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κατασκευής. Ξεκινώντας με το συνολικό κόστος το οποίο αναγράφεται και στις δύο κατηγορίες μπορεί να ερμηνευθεί με δύο τρόπους. Η προσθήκη στο κτήριο ενός παραπάνω κελύφους προφανώς αυξάνει το κόστος της κατασκευής και παράλληλα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και τα κόστη συντήρησης των εξαρτημάτων. Από την άλλη, η εγκατάστασή

της γυάλινης δικέλυφης όψης εξοικονομεί χρηματικούς πόρους σε σύγκριση με άλλες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας όπως τα ηλεκτροχημικά παράθυρα, τα οποία είναι ιδιαίτερα ακριβά. Όσον αφορά στην ακουστική μόνωση, παρά το γεγονός ότι η δικέλυφη όψη μειώνει την όχληση από τους εξωτερικούς θορύβους, υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης του ήχου μεταξύ των ορόφων του κτηρίου. Τέλος ο τομέας της πυροπροστασίας αποτελεί βασική μέριμνα για την ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού που βρίσκεται εντός της εγκατάστασης. Ορισμένοι ειδικοί αναφέρουν το γεγονός ότι σε περίπτωση πυρκαγιάς υπάρχει ο κίνδυνος μετάδοσης καπνού μεταξύ των ορόφων του κτηρίου μέσω της δικέλυφης όψης.

#### 1.4 Φυσικός αερισμός κτηρίων

Ο φυσικός αερισμός σε κτήρια μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη μίας γυάλινης δικέλυφης όψης και δύναται να δώσει λύσεις στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας με την περαιτέρω αξιοποίηση του αέρα για θέρμανση και ψύξη αλλά και για φυσικό εξαερισμό (8). Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα με τη χρήση της προσφέρεται αξιοποίηση της ροής του αέρα εντός του κλωβού που σχηματίζεται μεταξύ της εξωτερικής τοιχοποιίας και της γυάλινης όψης. Κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών προσφέρεται θερμική μόνωση στο κτήριο και ο αέρας εντός του κλωβού με την χρήση ή μη μηχανικής υποστήριξης αναρροφάται και συμπαρασέρνει μαζί του και την παραμένουσα θερμότητα που βρίσκεται εντός της κοιλότητας. Καθοριστικό παράγοντα για την αποδοτικότητα του φυσικού αερισμού με δικέλυφη όψη αποτελούν οι διαστάσεις της κατασκευής, των μηχανημάτων σκίασης και των παραθύρων. Το πλάτος και το ύψος της εσωτερικής κοιλότητας είναι βασικοί παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στο φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας, ιδίως όταν δεν γίνεται χρήση μηχανισμών εξαέρωσης. Την χειμερινή περίοδο η θερμική μόνωση επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης του γυάλινου κελύφους εξωτερικά του κτηρίου μειώνοντας, με αυτόν τον τρόπο, τις απώλειες. Κατά την περίοδο στην οποία θερμαίνεται η εγκατάσταση, η δικέλυφη όψη κρατά χαμηλές τις απώλειες θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον και η θερμοκρασία μεταξύ κτηρίου και υαλοπίνακα διατηρείται υψηλή. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο φυσικός εξαερισμός του κτηρίου κατά τη διάρκεια της νυκτός κατά την καλοκαιρινή περίοδο, σε περιοχές στις οποίες μέσες τυπικές θερμοκρασίες είναι περίπου 26° C. Τις πρωινές ώρες, στις οποίες η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από αυτή που επικρατεί την υπόλοιπη ημέρα, καθίσταται εφικτός ο εξαερισμός και δροσισμός των εσωτερικών χώρων μέσω της ροής αέρα εντός του κλωβού και μειώνονται, με αυτό τον τρόπο, τα κόστη για χρήση μηχανημάτων εξαέρωσης και παροχής ψύξης και κατ' επέκταση οι ενεργειακές καταναλώσεις της εγκατάστασης.

#### 1.5 Φωτοβολταϊκά

Η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη και αποσκοπεί στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων και την μειωμένη χρήση άλλων μεθόδων, οι οποίες πολλές φορές είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον. Μία νέα καινοτομία η οποία λαμβάνει χώρα είναι η προσθήκη τους σε κτήρια με γυάλινες δικέλυφες όψεις (9), (10). Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών πάνελ τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις δικέλυφες όψεις, ποικίλουν και διαχωρίζονται ανάλογα με το υλικό από το οποίο αποτελούνται. Βασικές κατηγορίες φωτοβολταϊκών πάνελ αποτελούν τα πάνελ



κρυσταλλικού πυριτίου(c-Si), άμορφου πυριτίου(α-Si), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si), καδμίου τελλορίου (CdTe), τα οργανικά πάνελ (OPV) και τα πάνελ με χρωστική ουσία στα ηλιακά κελιά(DSSC) (11). Οι δικέλυφες όψεις, οι οποίες συνδυάζονται με τα φωτοβολταϊκά πάνελ (PV-DSF), χρησιμοποιούν κυρίως τους τύπους κρυσταλλικού ή άμορφου πυριτίου. Οι πρώτες, δηλαδή οι κρυσταλλικού πυριτίου, παρέχουν σκίαση εντός του χώρου, παρόλα αυτά, η μορφή τους, όπως φαίνεται και στην Εικ. 6α, προκαλεί δυσκολία του εργαζομένου να έχει άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Ένας ακόμα τρόπος συνδυασμού της γυάλινης δικέλυφης όψης με τα ηλιακά πάνελ είναι η τοποθέτηση τους εντός του κλωβού (PVB-DSF), Εικ. 7.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



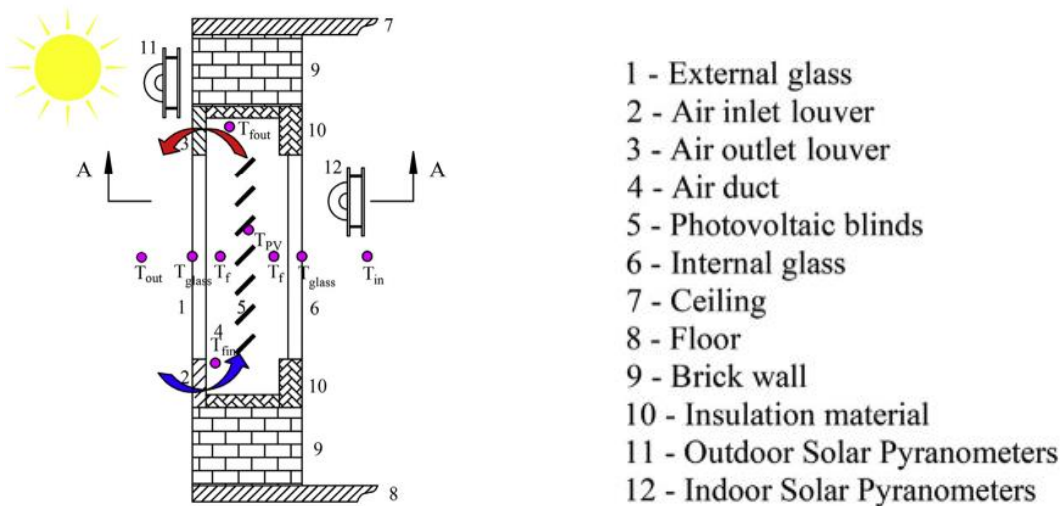
(ε)



(στ)

Εικ. 6 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ (11)





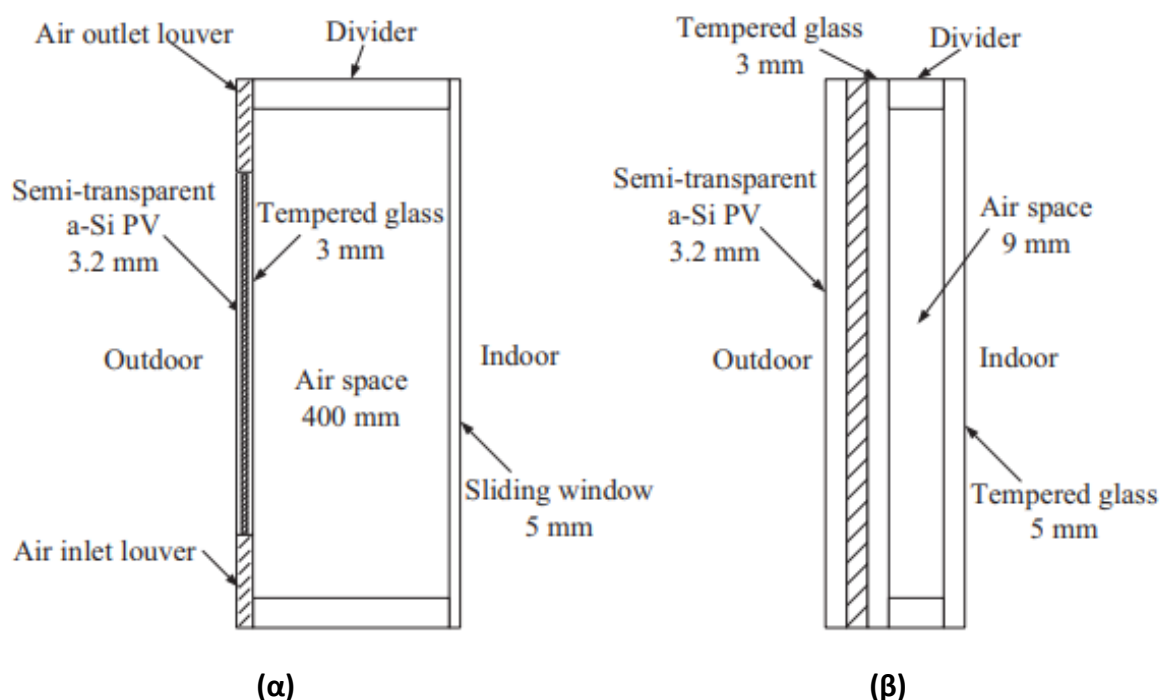
Εικ. 7: Δικέλυφη όψη με την χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ εντός του κλωβού, PVB-DSF (12)

### 1.5.1 Ενεργειακή απόδοση PV-DSF/PVB-DSF

Έχουν γίνει μελέτες οι οποίες συγκρίνουν την ενεργειακή απόδοση του συνδυασμού γυάλινης δικέλυφης όψης με ηλιακά πάνελ των οποίων το εκάστοτε πόρισμα βασίζεται στην σύγκριση του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (average solar heat gain coefficient SHGC) και της θερμικής διαπερατότητας (U-value). Κάνοντας μετρήσεις κάτω από τις ίδιες συνθήκες, υπολογίζεται, στο τέλος, η ηλεκτρική ισχύς η οποία παράχθηκε από την εγκατάσταση. Τα αποτελέσματα, τα οποία προκύπτουν από την σύγκριση απλών γυάλινων δικέλυφων όψεων με ή χωρίς συστήματα σκίασης με τις δικέλυφες όψεις στις οποίες τοποθετούνται φωτοβολταϊκά πάνελ εντός του κλωβού, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η μη χρήση μηχανισμών σκίασης έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους, καθώς καθιστά εφικτή την απορρόφηση μεγαλύτερων ποσοτήτων ηλιακής ενέργειας. Οι PVB-DSF αποτελούν την κατηγορία η οποία παρέχει την καλύτερη μόνωση, καθώς οι τιμές U και SHGC παραμένουν χαμηλές λόγω της μικρότερης θερμοκρασιακής διαφοράς. Η έρευνα που έγινε από τον Luo et al. (12) έδειξε πως ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους στις PV-DSF είναι 0.339 και είναι κατά 27.8% μικρότερος από αυτόν των δικέλυφων όψεων στις οποίες τοποθετούνται μηχανήματα σκίασης, όπου ισχύει  $SHGC=0.439$ , και κατά 38% χαμηλότερος από τις απλές γυάλινες δικέλυφες όψεις, όπου ισχύει  $SHGC=0.547$ . Οι τιμές του δείκτη θερμικής διαπερατότητας (U-value) προκύπτουν ίσες με  $3.56 \frac{W}{m^2K}$ ,  $4.99 \frac{W}{m^2K}$  και  $5.31 \frac{W}{m^2K}$  αντίστοιχα (11). Μία νέα μέθοδος για την μείωση των απωλειών θερμότητας είναι η προσθήκη μίας γυάλινης πλάκας εντός των δύο στρώσεων γυαλιού, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με πολλαπλά στρώματα. Η χρήση αυτής της καινοτομίας στις γυάλινες δικέλυφες όψεις ονομάζεται PV-IGU (insulating glass unit). Στην επόμενη εικόνα (Εικ. 8) παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των δικέλυφων όψεων στις οποίες οι εξωτερικές στρώσεις γυαλιού έχουν αντικατασταθεί με ηλιακά πάνελ (PV-DSF) και αυτών που χρησιμοποιούν πολλαπλές στρώσεις γυαλιού (PV-IGU). Στις δύο παρακάτω

περιπτώσεις το εξωτερικό πάνελ αποτελείται από άμορφο πυρίτιο. Τέλος, στην Εικ. 8β απεικονίζεται και η γυάλινη πλάκα που λειτουργεί σαν μονωτής.

Η θερμοπερατότητα, η οποία αναφέρθηκε παραπάνω, εκφράζεται ως ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσω ενός υλικού. Στο παγκόσμιο σύστημα μονάδων το μέγεθος αναφέρεται ως U-value (factor) και έχει μονάδες μέτρησης  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$  (13).



Εικ. 8: (α) PV-DSF, (β) PV-IGU (14)

Στην συνέχεια, γίνεται σύγκριση μεταξύ των γυάλινων δικέλυφων όψεων στις οποίες τα εξωτερικά ηλιακά πάνελ είναι τοποθετημένα στην γυάλινη επιφάνεια (PV-DSF) και αυτών στις οποίες τα φωτοβολταϊκά βρίσκονται εντός του κλωβού (PVB-DSF). Στις δικέλυφες όψεις στις οποίες τα φωτοβολταϊκά είναι εντός της κοιλότητας, αυτά δεν έρχονται σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να αποθηκεύουν μικρότερα ποσά ενέργειας και, κατ' επέκταση, να παράγεται λιγότερη ισχύς σε σχέση με τις δικέλυφες όψεις στις οποίες τα φωτοβολταϊκά βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια. Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας (U-value) είναι μεγαλύτερος στις PV-DSF από αυτόν στις PVB-DSF, ενώ, ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (SCGH) είναι μικρότερος. Η χαμηλότερη τιμή που παρατηρήθηκε στις PV-DSF, η οποία είναι SCGH=0.1, υποδεικνύει την υστέρησή τους σε θερμική απόδοση σε σχέση με τις PVB-DSF, στις οποίες ο συντελεστής ισούται με SCGH=0.205 (12), (15). Ο τιμές του δείκτη θερμικής διαπερατότητας είναι  $U=4.6 \frac{W}{m^2K}$  και  $U=2.247 \frac{W}{m^2K}$  αντίστοιχα. Τέλος, συγκρίνονται και οι δικέλυφες όψεις στις οποίες χρησιμοποιείται μία επιπρόσθετη γυάλινη πλάκα, PV-IGU, με τις όψεις στις οποίες τα φωτοβολταϊκά τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής, PV-DSF. Στην περίπτωση χρήσης

PV-IGU, ο συντελεστής SCGH είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν που μετρήθηκε για τις PV-DSF, δηλαδή λαμβάνει τιμές 0.238 και 0.152 αντίστοιχα, με αποτέλεσμα οι όψεις PV-IGU να έχουν καλύτερη θερμική απόδοση. Το αντίθετο συμβαίνει για τον συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, ο οποίος υπολογίζεται ίσος με  $2.281 \frac{W}{m^2K}$  και  $2.535 \frac{W}{m^2K}$  (11), αντίστοιχα, αποδίδοντας στις δικέλυφες όψεις με φωτοβολταϊκά στην εξωτερική επιφάνεια, PV-DSF το χαρακτηριστικό του καλύτερου μονωτή.

### 1.5.2 Επίδραση του μηχανισμού εξαερισμού

Στις δικέλυφες όψεις στις οποίες τοποθετούνται ηλιακά πάνελ στο εξωτερικού του κτηρίου (PV-DSF) σημαντικό παράγοντα στην απόδοσή τους αποτελεί και ο εξαερισμός. Ο εξαερισμός μπορεί να γίνεται είτε με μηχανικό τρόπο, π.χ. τοποθέτηση ανεμιστήρων, είτε με φυσικό τρόπο, δηλαδή χωρίς την ύπαρξη μηχανήματος το οποίο να προσδίδει ενέργεια στο αέρα που ρέει. Ο αέρας χαμηλότερης θερμοκρασίας που εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον συναλλάσσει θερμότητα με τις φωτοβολταϊκές μονάδες και συμπαρασύρει μαζί του την υπολειπόμενη θερμότητα που βρίσκεται εντός του κλωβού μειώνοντας κατ' επέκταση την θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών κυψελών που αποτελούν τις φωτοβολταϊκές μονάδες. Με αυτόν τον τρόπο, όχι μόνο μειώνεται το φορτίο ψύξης του κτηρίου, αλλά, αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών μονάδων. Στην συνέχεια, γίνεται σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων οι οποίες αφορούν στις δικέλυφες όψεις που φέρουν φωτοβολταϊκές μονάδες εντός της κοιλότητας (PVB-DSF) και στις δικέλυφες όψεις στις οποίες τα ηλιακά πάνελ είναι εκτός του κλωβού (PV-DSF). Οι μετρήσεις στις οποίες βασίστηκαν τα αποτελέσματα έγιναν και κατά την καλοκαιρινή και την χειμερινή περίοδο στην πρώτη περίπτωση, ενώ οι μετρήσεις για την δεύτερη περίπτωση λήφθηκαν κατά τους χειμερινούς μήνες. Ο τρόπος εξαερισμού αποτελεί σημαντικό παράγοντα του οποίου η επίδραση είναι εμφανέστερη στην θερμική απόδοση της εγκατάστασης σε σχέση με την επίδρασή του στην παραγωγή ισχύος. Για τις δύο κατηγορίες, για τους χειμερινούς μήνες, το αποτέλεσμα που εξάχθηκε είναι πως όταν δεν υπάρχει εξαερισμός του κλωβού, ο συντελεστής θερμικής απόδοσης για τις δικέλυφες όψεις οι οποίες φέρουν τα πάνελ εντός του κλωβού είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν για τις δικέλυφες όψεις στις οποίες τα πάνελ τοποθετούνται εκτός του κλωβού (11). Στην πρώτη περίπτωση ο συντελεστής μετρήθηκε ίσος με  $SCGH=0.328$  ενώ στην δεύτερη ίσος με  $SCGH=0.12$  (15), (11). Το αποτέλεσμα αυτό καθιστά τις PVB-DSF αποδοτικότερες κατά την διάρκεια του χειμώνα, καθώς μειώνονται οι θερμικές απώλειες μεταξύ των παραθύρων και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Για την καλοκαιρινή περίοδο ο καταλληλότερος τρόπος εξαερισμού είναι με την χρήση μηχανισμών απόδοσης ενέργειας, καθώς οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες. Σε περιόδους κατά τις οποίες οι ανάγκες για θέρμανση και εξαερισμό δεν είναι τόσο υψηλές μπορεί να γίνεται φυσικός εξαερισμός του κλωβού. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται τα κόστη συντήρησης των μηχανημάτων παραγωγής ενέργειας, των οποίων η χρήση υποδεικνύεται σε κάποιες περιπτώσεις, και ταυτόχρονα εξοικονομούνται ενεργειακοί πόροι.

## 1.6 Σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το πεδίο ροής σε κτήριο με προσαρτημένη δικέλυφη όψη. Η ανάλυση εστιάζει στην σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μετά από υπολογιστική επίλυση με αυτά που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη η οποία διεκπεραιώθηκε από τον Ευάγγελο Τσιαπάλα (16). Βασικός σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της μορφολογίας της ροής σε δικέλυφη όψη κτηρίου και η εμβάθυνση στους στροβίλους που αναπτύσσονται εντός του πεδίου. Η ανάλυση που έγινε είναι παραμετρική ως προς το πλάτος του διακένου του κλωβού. Μεταβολή στο πλάτος του κλωβού φέρει ως αποτέλεσμα την αλλαγή τόσο στη δομή της ροής όσο και σε βασικά χαρακτηριστικά των στροβίλων οι οποίοι αναπτύσσονται, καθώς και στην διαφορά της πίεσης εισόδου και εξόδου από το διάκενο. Η διαφορά πίεσης είναι σημαντική λειτουργική παράμετρος και είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίησή της.

## 1.7 Οριοθέτηση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι διαστάσεις που καθόρισαν την γεωμετρία είναι ανάλογες με αυτές της πειραματικής διάταξης. Το ύψος και το μήκος της γεωμετρίας διατηρούνται σταθερά για όλες τις περιπτώσεις και μόνη διάσταση η οποία αλλάζει είναι το πλάτος του κλωβού. Αναλύθηκαν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα και συγκρίθηκαν τόσο μεταξύ τους όσο και το καθένα με το αντίστοιχο πειραματικό μοντέλο. Η υπολογιστική επίλυση του προβλήματος καθιστά απαραίτητη την χρήση αγωγού εισόδου της ροής πριν αυτή εισέλθει στον κλωβό μεταξύ της γυάλινης όψης και του εξωτερικού τοιχώματος του κτηρίου. Ο αγωγός αυτός αποτελείται από στερεά πλαϊνά τοιχώματα. Στην πειραματική μελέτη τα στερεά τοιχώματα δεν υπήρχαν, ωστόσο, στην εν λόγω εργασία η χρήση τους επιδρά θετικά στην σύγκλιση των εξισώσεων. Οι υπολογιστικές μελέτες οι οποίες έχουν γίνει για τις γυάλινες δικέλυφες όψεις εστιάζουν κυρίως στην θερμική απόδοση της κατασκευής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία κύριο αντικείμενο μελέτης είναι η μορφολογία της ροής και η εξάρτησή της από το πλάτος του διακένου του κλωβού. Για τον λόγο αυτό, η θερμοκρασία διατηρήθηκε σταθερή για κάθε ξεχωριστή περίπτωση. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν μελετάται η ισχύς την οποία μπορεί να αποδώσει η ροή του αέρα, ούτε η αξιοποίηση της από κάποιον μηχανισμό.

## 1.8 Δομή της εργασίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μία εισαγωγή η οποία περιλαμβάνει μια γενική περιγραφή των γυάλινων δικέλυφων όψεων καθώς και την επίδραση των φωτοβολταϊκών πάνελ όταν αυτά προστίθενται στην κατασκευή. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται βασικές έννοιες της μηχανικής των ρευστών και αποτυπώνεται η μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές υπολογιστικές εξισώσεις, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος. Το τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας αποτελείται από την διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εύρεση του καταλληλότερου πλέγματος του υπολογιστικού χωρίου. Το πέμπτο κεφάλαιο ξεκινάει με την συνοπτική ανάλυση της πειραματικής μελέτης και προχωράει στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, τα οποία προέκυψαν για κάθε διαφορετική γεωμετρία που μελετήθηκε στην

παρούσα διπλωματική εργασία. Το έκτο κεφάλαιο αποσκοπεί στην συγκριτική μελέτη όλων των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Το τελευταίο κεφάλαιο αποτελείται από τα συνολικά συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και από προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Η μελέτη αυτή μπορεί να γίνει τόσο στα αποτελέσματα που επιφέρει η ανάλυση του πεδίου με την προσθήκη της θερμοκρασίας ως μία νέα μεταβλητή προς επίλυση όσο και στην αξιοποίηση της ισχύος για εξυπηρέτηση περαιτέρω ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης.

## 2 Μαθηματικό Μοντέλο

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της μηχανικής των ρευστών και αποτυπώνεται η μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος.

### 2.1 Εισαγωγή στην μηχανική των ρευστών.

Η μηχανική των ρευστών αποτελεί βασικό κλάδο της μηχανολογίας και η μελέτη της παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αξιοποιείται στην ανάλυση πολλών προβλημάτων της φυσικής. Όπως παρατίθεται στο σύγγραμμα Μηχανικής των Ρευστών του Σ. Τσαγγάρη (17), με τον όρο ρευστά αναφερόμαστε σε υγρά και αέρια σώματα τα οποία χαρακτηρίζονται από εύκολη μεταφορά των στοιχείων τους. Η μηχανική ρευστών αποτελεί έναν κλάδο ευρέως διαδεδομένο και με βάση αυτήν αναπτύχθηκαν οι διάφορες υποδιαίρεσεις της. Τέτοιοι κλάδοι είναι οι παρακάτω:

- Αεριοδυναμική: Στον τομέα αυτόν εξετάζονται ροές συμπιεστών ροών στις οποίες παρατηρούνται έντονα θερμικά φαινόμενα
- Αεροδυναμική: Εξετάζονται στερεά σώματα τα οποία κινούνται στον αέρα, τυπικά παραδείγματα αποτελούν οι κινήσεις των αεροπλάνων και των αυτοκινήτων.
- Μετεωρολογία:
- Εμβιομηχανική: Μελέτη βιολογικών ρευστών στον οργανισμό.
- Καύση: Μελέτη της συμπεριφοράς του ρευστού κατά τη διάρκεια διαδικασίας καύσης.
- Μαγνητοϋδροδυναμική: Κατά την οποία αλληλοεπιδρούν φορτισμένα ή μαγνητικά υγρά σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.
- Ρευστομηχανές: Ο τομέας αυτός επικεντρώνεται στην εναλλαγή ενέργειας, μάζας και ορμής των ρευστών με τα αντίστοιχα στερεά μέρη της μηχανής.
- Περιβαλλοντική ρευστομηχανική: Εξετάζονται ροές που σχετίζονται με το περιβάλλον.

#### 2.1.1 Βασικές ιδιότητες ρευστών

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι βασικές ιδιότητες οι οποίες διέπουν ένα ρευστό.

##### 2.1.1.1 Συμπιεστότητα

Με τον όρο συμπιεστό χαρακτηρίζεται ένα ρευστό στο οποίο η πυκνότητά του μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή της πίεσης. Τα ρευστά στα οποία η πυκνότητα παραμένει σταθερή ονομάζονται ασυμπιεστά και τέτοια είναι κυρίως τα υγρά. Ο χαρακτηρισμός αυτός για τα υγρά προέρχεται από την μεγάλη πυκνότητα των μορίων τους και, κατ' επέκταση, την μικρή απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα η μεταβολή του όγκου τους να θεωρείται αμελητέα ακόμα και για μεγάλες πιέσεις.



### 2.1.1.2 Συνεκτικότητα-ιξώδες

Με τον όρο συνεκτικότητα ορίζεται η ιδιότητα του ρευστού να αντισταθεί στην διάτμηση, δηλαδή, στην σχετική κίνηση μεταξύ δύο σωματιδίων που γειτνιάζουν. Τα ρευστά που συνδέονται με τον παρακάτω νόμο μεταξύ διατμητικής τάσης και κλίσης της ταχύτητας ονομάζονται νευτώνεια και αποτελούν μία μεγάλη κατηγορία των ρευστών στην οποία εμπεριέχονται το νερό και ο αέρας. Παρόλα αυτά, ρευστά όπως πολυμερή δεν βασίζουν την συμπεριφορά τους στην σχέση του Νεύτωνα. Σύμφωνα με τον Νεύτωνα, η διατμητική τάση για νευτώνεια ρευστά δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

Το μέγεθος  $\mu$  είναι η δυναμική συνεκτικότητα (ιξώδες) και στα ασυμπίεστα νευτώνεια ρευστά επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Στα συμπιεστά ρευστά υπεισέρχεται και η πίεση η οποία μπορεί να επηρεάσει την δυναμική συνεκτικότητα. Εκτός βέβαια από την δυναμική υπάρχει και η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού και τα δύο μεγέθη αυτά συνδέονται μεταξύ τους με βάση την πυκνότητα.

$$\rho = \frac{\mu}{\nu} \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

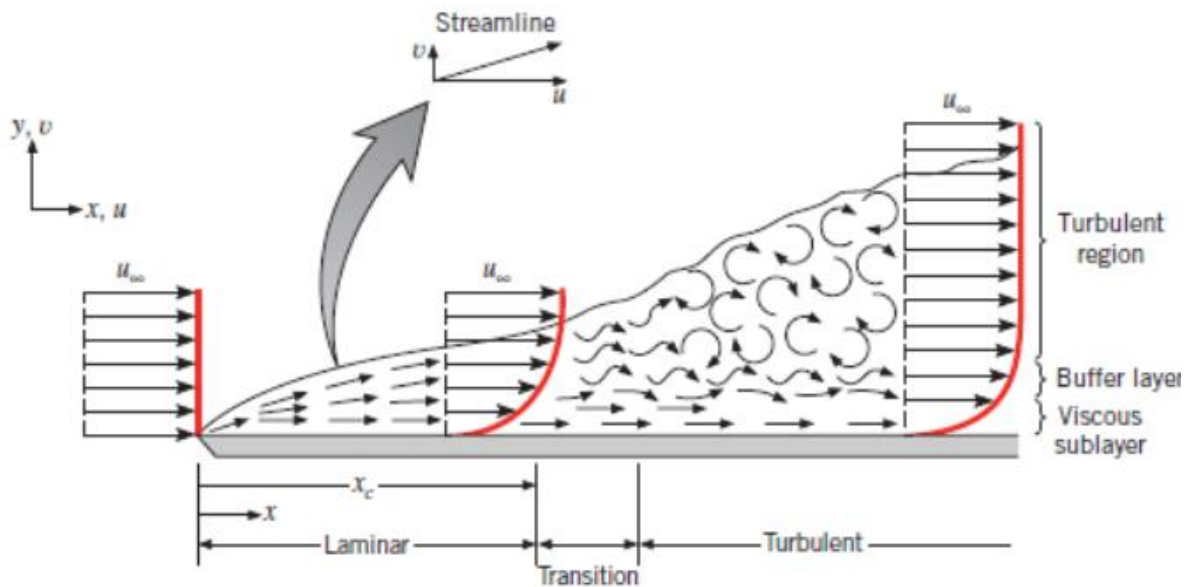
### 2.1.2 Κατηγορίες ροών

Στην μηχανική των ρευστών οι ροές διακρίνονται σε στρωτές και τυρβώδης. Βασική παράμετρος με την οποία μία ροή χαρακτηρίζεται στρωτή ή τυρβώδης είναι ο αδιάστατος αριθμός Reynolds, για τον οποίο θα γίνει περισσότερη ανάλυση σε επόμενα κεφάλαια. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως το πηλίκο των αδρανειακών δυνάμεων προς της δυνάμεις ιξώδους. Σε περίπτωση που ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από την τιμή 2300 η ροή χαρακτηρίζεται στρωτή (laminar flow) ενώ για αριθμό Reynolds μεγαλύτερο από 500000 η ροή είναι τυρβώδης (turbulent flow). Σε ροές στις οποίες ο αριθμός αυτός λαμβάνει τιμές μεταξύ των προαναφερθέντων ορίων, η ροή βρίσκεται σε μία φάση μετάβασης (transition) από στρωτή σε τυρβώδη.

### 2.1.3 Οριακά στρώματα

Κατά την ανάπτυξη ροής πάνω από ένα στερεό όριο εμφανίζεται η δημιουργία οριακού στρώματος (boundary layer). Το οριακό στρώμα αποτελεί μία λεπτή ζώνη η οποία σχηματίζεται στην διεπιφάνεια μεταξύ της ροής και του στερεού τοιχώματος. Η αιτία που το δημιουργεί είναι οι διατμητικές τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του ρευστού που έρχονται σε επαφή με το στερεό όριο. Κατά την δημιουργία οριακού στρώματος, το προφίλ ταχύτητας γίνεται παραβολικό, όπως φαίνεται και στην Εικ. 9. Λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης η ταχύτητα είναι μηδενική στο στερεό τοίχωμα και αυξάνεται καθ' ύψος, μέχρις ότου λάβει ξανά την τιμή της επ' άπειρον ταχύτητας  $U_\infty$ . Το οριακό στρώμα διαχωρίζεται στο στρωτό οριακό στρώμα και στο τυρβώδες. Η μετάβαση από στρωτό σε τυρβώδες εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Η αδιάστατη αυτή παράμετρος εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού, το κινηματικό ιξώδες και την απόσταση από την αρχή της πλάκας. Παρατηρούμε στην Εικ. 9 πως μετά την θέση  $x_{cr}$  η ροή μεταβαίνει από την στρωτή στην τυρβώδη περιοχή,

περνώντας πρώτα από μία μεταβατική κατάσταση. Γίνεται επίσης αντιληπτό πως στην τυρβώδη περιοχή το οριακό στρώμα έχει μεγαλύτερο πάχος και οι διατμητικές τάσεις οι οποίες σχηματίζονται στα στερεά τοιχώματα είναι μεγαλύτερες από αυτές στην στρωτή περιοχή.



Εικ. 9: Οριακό στρώμα γύρω από επίπεδη πλάκα άπειρου μήκους (18)

#### 2.1.4 Εισαγωγή στην τύρβη

Ο ορισμός της τύρβης δεν έχει αναπτυχθεί με σαφήνεια, αλλά προσεγγίζεται ανάλογα με την σκοπιά με την οποία αντιμετωπίζεται το πρόβλημα. Αντιμετωπίζοντας την τύρβη ως διαταραχή στο πεδίο ροής, ο πιο αντιπροσωπευτικός ορισμός είναι πως τύρβη είναι μια κατάσταση συνεχούς αστάθειας της ροής. Σύμφωνα με τον Bradshaw δόθηκε ένας πληρέστερος ορισμός κατά τον οποίο «Τύρβη είναι μια τρισδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη ροή στην οποία η έκταση των δινοσωλήνων προκαλεί διαταραχές ταχύτητας σε όλες τις συχνότητες μεταξύ ελάχιστης που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες και μέγιστης που καθορίζεται από την συνεκτικότητα του ρευστού». Οι τυρβώδεις ροές είναι μη μόνιμες και σε αυτές παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας στις τρεις κατευθύνσεις, δημιουργώντας χωρικές δομές, οι οποίες ονομάζονται μικροδίνες. Σημειώνεται επίσης ότι η τύρβη από την στιγμή που δημιουργείται δεν μειώνεται και δεν σταματά, είναι, δηλαδή, αυτοδιατηρούμενη. Χαρακτηριστικό της τύρβης αποτελεί ακόμα η ανάμειξη του τυρβώδους ρευστού με το μη τυρβώδες και με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η τυρβώδης περιοχή. Ένας τρόπος διαχωρισμού των ροών ανάμεσα σε στρωτές και τυρβώδης είναι η στροβιλότητα. Υψηλές τιμές του μέτρου της στροβιλότητας υποδηλώνουν την δημιουργία ενός τυρβώδους πεδίου ροής στο οποίο εμφανίζονται μικροδίνες, σε αντίθεση με τα στρωτά πεδία ροής στα οποία εμφανίζονται μεγάλες δίνες.



## 2.2 Εξισώσεις Navier-Stokes

Η ανάλυση του πεδίου ροής σε ρευστομηχανικά προβλήματα επιλύεται με την χρήση των εξισώσεων Reynolds για τυρβώδη πεδία ροής, οι οποίες προκύπτουν από την χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier-Stokes. Αναφερόμενοι σε ασυμπίεστα ρευστά και ταυτόχρονα ισοθερμοκρασιακά πεδία ροής οι εξισώσεις Navier-Stokes εκφράζουν την αρχή διατήρησης της ορμής στις τρεις κατευθύνσεις  $x_i$  με αντίστοιχες ταχύτητες  $u_i$ , όπου  $i=1,2,3$  υποδηλώνονται οι τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις ( $x_i=x, y, z$ ) και οι αντίστοιχες συνιστώσες των ταχυτήτων ( $u_i=u, v, w$ ). Οι εξισώσεις του παρόντος κεφαλαίου λήφθηκαν από τα συγγράμματα των Σ. Τσαγγάρη (17) και Γ. Μπεργελέ (19).

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Εξίσωση ορμής:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\sigma_{ij}}{x_j} + f_i \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

Ο όρος  $u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  αποτελεί όρο μεταφοράς στη διατήρηση της ορμής μάζας ρευστού, ο όρος  $f_i$  εκφράζει το πεδίο των εξωτερικών δυνάμεων και ο όρος  $\frac{1}{\rho} \frac{\sigma_{ij}}{x_j}$  τη συνεισφορά της διάχυσης.

Ο τανυστής δευτέρου βαθμού γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

Και ορίζεται ο τανυστής ρυθμού παραμόρφωσης (συμμετρικό μέρος):

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Εξίσωση 2.6}$$

Και ο τανυστής γωνιακής ταχύτητας (αντισυμμετρικό μέρος):

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Εξίσωση 2.7}$$

Το ρευστό του Stokes

- Είναι ομογενές
- Είναι ισότροπο
- Ο τανυστής  $\sigma_{ij}$  είναι συνάρτηση μόνο του ρυθμού παραμόρφωσης  $e_{ij}$  και όχι του ρυθμού περιστροφής  $\Omega_{ij}$
- Σε ακινησία  $e_{ij} = 0$

Οι διατμητικές τάσεις  $\sigma_{ij}$  συνδέονται με το ρυθμό παραμόρφωσης ( $e_{ij}$ ) με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left( \lambda + \frac{2}{3} \mu \right) \delta_{ij} \frac{\partial u_m}{\partial x_m}$$

Εξίσωση 2.8

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} + \left( \lambda + \frac{2}{3} \mu \right) \delta_{ij} \frac{\partial u_m}{\partial x_m}$$

Ο Stokes κατέληξε στο συμπέρασμα ότι δεύτερος συντελεστής συνεκτικότητας  $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ , οπότε οι διατμητικές τάσεις συνδέονται με το ρυθμό παραμόρφωσης με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} \quad \text{Εξίσωση 2.9}$$

Με βάση τα προαναφερθέντα η εξίσωση της ορμής μπορεί να μετασχηματιστεί.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + f_i \quad \text{Εξίσωση 2.10}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i$$

Συνεπώς, οι εξισώσεις των Navier-Stokes για ασυμπιεστο ρευστό λαμβάνουν την μορφή:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 & \text{Εξίσωση 2.11} \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i & i = 1,2,3 \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 2.12}$$

### 2.2.1 Reynolds Averaged Navier-Stokes

Το σύστημα των εξισώσεων αυτών δεν έχει καταφέρει να λυθεί αναλυτικά και απαιτείται η αριθμητική του επίλυση. Μέχρι σήμερα η επικρατέστερη λύση είναι αυτή που προτάθηκε από τον Osborne Reynolds, σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζονται οι χρονικά μέσες τιμές των μεγεθών ( $u, v, w, p$ ). Προκύπτουν δηλαδή τα μεγέθη:

$$u = \bar{u} + u', \quad \bar{u}' = 0$$

$$v = \bar{v} + v', \quad \bar{v}' = 0$$

$$w = \bar{w} + w', \quad \bar{w}' = 0$$

$$p = \bar{p} + p', \quad \bar{p}' = 0$$

Όπου τα μεγέθη  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$  αποτελούν τις μέσες χρονικά τιμές και τα μεγέθη  $u', v', w', p'$  τις διακυμάνσεις-διαταραχές.

Η μέση χρονικά τιμή ορίζεται ως:

$$\bar{u}_1 = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} u_i dt$$

Κατά αυτό τον τρόπο παράγονται οι εξισώσεις γνωστές και ως RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) και οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής παίρνουν την μορφή:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + \bar{f}_i \end{array} \right. \quad i = 1, 2, 3$$

Εξίσωση 2.13

Εξίσωση 2.14

Στις παραπάνω εξισώσεις παρατηρούνται οι όροι  $-\overline{u'_i u'_j}$ , οι οποίοι είναι γνωστοί ως τάσεις Reynolds.

### 2.2.2 Η υπόθεση Boussinesq (1877)

Το 1877 έγινε προσπάθεια από τον Boussinesq να συσχετιστούν οι τάσεις Reynolds με τον τοπικό ρυθμό παραμόρφωσης του πεδίου χρησιμοποιώντας την τυρβώδη συνεκτικότητα  $\mu_t$ . Η μεταβλητή  $k$  είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια της ροής. Με βάση αυτά ορίζεται η παρακάτω εξίσωση στην οποία βασίζεται η υπόθεση Boussinesq.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k$$

Εξίσωση 2.15

Επόμενο βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός των μοντέλων τύρβης τα οποία χρησιμοποιούνται. Η επίλυση των εξισώσεων βασίζεται σε χρονικά αμετάβλητα τυρβώδη πεδία ροής, τα οποία διαρρέονται από ασυμπίεστα ρευστά.

## 2.3 Μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων

Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα με τα οποία προσομοιώνεται η τύρβη στα πεδία ροής είναι τα παρακάτω:

- k-epsilon model
- k-omega model
- RNG
- K-omega SST (Shear Stress Transfer)

Εκτός των μοντέλων αυτών έχει ξεκινήσει έρευνα για νέα μοντέλα τύρβης τα οποία θα χρησιμοποιηθούν μελλοντικά. Ένα εκ των οποίων δεν βασίζεται στην υπόθεση Boussinesq και ένα άλλο, το μοντέλο των μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation: LES). Τέλος, με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας ερευνάται η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes χωρίς να γίνονται παραδοχές μοντέλων τύρβης (Direct Numerical Simulation: DNS). Παρόλα αυτά, τα πλέον χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι τα μοντέλα τύρβης των δύο εξισώσεων που προαναφέρθηκαν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μοντελοποίηση της τύρβης γίνεται με βάση το k-epsilon model, το οποίο είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο. Η βάση στην οποία στηρίζεται το συγκεκριμένο μοντέλο είναι η κατανομή της κλίμακας μήκους της τύρβης.

Η κατασκευή των εξισώσεων για το μοντέλο k-epsilon παρέχεται μέσω του βιβλίου του Γ.Μπεργελέ (19) όπως έγινε και στην ανάλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και των RANS. Η τυρβώδης συνεκτικότητα δίνεται από τον τύπο:

$$\mu_t = \rho k^{3/2} \quad \text{Εξίσωση 2.16}$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j} \quad \text{Εξίσωση 2.17}$$

$$\varepsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l} \quad \text{Εξίσωση 2.18}$$

Εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (k \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad \text{Εξίσωση 2.19}$$

Εξίσωση για την καταστροφή της τύρβης:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\varepsilon \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_1 \frac{k}{\varepsilon} \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Εξίσωση 2.20}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται οι σταθερές  $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  για τις οποίες ισχύουν τα παρακάτω δεδομένα:

- $C_1 = 1.44$
- $C_2 = 1.92$
- $\sigma_k = 0.9$
- $\sigma_\varepsilon = 1.3$

Οι εξισώσεις οι οποίες τελικά επιλύονται είναι οι εξισώσεις της συνέχειας, της αρχής διατήρησης της ορμής, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της καταστροφής της τύρβης και τέλος, της μεταφοράς της ενθαλπίας, η οποία μπορεί να αναχθεί στην θερμοκρασία στην περίπτωση όπου ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας,  $C_p$ , παραμένει σταθερός. Οι εξισώσεις εκφράζονται για τις καρτεσιανές συντεταγμένες σε χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία ροής. Σε όλες τις εξισώσεις εμφανίζονται όροι διάχυσης και συναγωγής και γίνεται και προσθήκη του όρου πηγής,  $S_\phi$ .

### 3 Υπολογιστική επίλυση προβλήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος επίλυσης των εξισώσεων με την χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (computational fluid dynamics-CFD).

#### 3.1 Διαδικασία επίλυσης

Οι εξισώσεις που αναγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο επιλύονται με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και ο υπολογιστικός κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Ο κώδικας αναπτύχθηκε από τον Καθηγητή Μηχανολόγων Μηχανικών Δρ. Δημήτριο Μπούρη (20) και δύναται να επιλύσει προβλήματα ρευστομηχανικής τόσο σε στρωτές όσο και τυρβώδης ροές. Ταυτόχρονα, καθιστά εφικτή την λύση και του πεδίου της θερμότητας. Η μέθοδος η οποία ακολουθείται είναι η SIMPLE και για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος TDMA με την μέθοδο εναλλαγής κατεύθυνσης. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα. Αυτές είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes, οι οποίες επιλύθηκαν ως προς Reynolds (RANS), σε συνδυασμό με την υπόθεση Boussinesq για ασυμπίεστα ρευστά και ισοθερμκρασιακό πεδίο ροής. Το μοντέλο τύρβης το οποίο χρησιμοποιείται είναι το k-epsilon. Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε επίσης και ο όρος πηγής,  $S_\Phi$ , για τον οποίο οι εξισώσεις γράφονται στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) = S_\varphi \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

Οι τιμές τις οποίες μπορεί να πάρει ο όρος πηγής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 1: Τιμές του όρου πηγής (20)**

$\Phi$	$S_\Phi$
1	0
u	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right)$
v	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right)$
w	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right)$
T	0
k	$G - \rho\varepsilon$
$\varepsilon$	$\frac{C_1\varepsilon G - C_2\rho\varepsilon^2}{k}$

Στον παραπάνω πίνακα αναγράφονται οι παρακάτω μεταβλητές:

$$G = \mu \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$\Gamma_{\Phi} = \frac{\mu}{\sigma_{\Phi}}$$

Εξίσωση 3.2

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Εξίσωση 3.3

$$\mu = \mu_t + \mu_l$$

Εξίσωση 3.4

Όπου:

- $\mu$ : η ενεργός συνεκτικότητα
- $\mu_t$ : η τυρβώδης συνεκτικότητα
- $\mu_l$ : η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού
- $C_1 = 1.44$
- $C_2 = 1.92$
- $C_{\mu} = 0.09$
- $\sigma_k = 0.9$
- $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$
- $\sigma_{(u,v)} = 1$

Το πρόβλημα το οποίο τίθεται προς αντιμετώπιση διέπεται από έναν μη γραμμικό χαρακτήρα καθώς οι εξισώσεις αλληλεξαρτώνται μεταξύ τους. Στην συνέχεια παρατηρούμε ότι η κλίση πίεσης  $\frac{\partial P}{\partial x_i}$ ,  $i=1,2,3$  ανάλογα με την κατεύθυνση, εμπεριέχεται στους όρους πηγής ενώ οι αντίστοιχες μεταβλητές  $(u,v,w)$  συνδέονται και μέσω της εξίσωσης της συνέχειας στην οποία ο όρος της πίεσης δεν εμφανίζεται. Το τελικό αποτέλεσμα που επιθυμούμε, δηλαδή η σύγκλιση των εξισώσεων, απαιτεί την συνεχή διόρθωση των αλληλεξαρτούμενων μεταβλητών.

### 3.2 Περιγραφή της μεθόδου επίλυσης

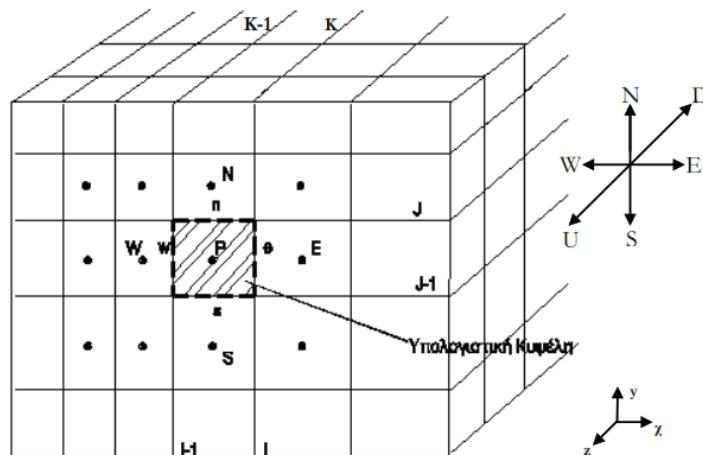
Η επίλυση θα γίνει με χρήση πεπερασμένων διαφορών ως προς τις εξαρτημένες μεταβλητές  $u_i$ ,  $i=1,2,3$  για την εκάστοτε συνιστώσα της ταχύτητας  $u,v,w$  αντίστοιχα, την πίεση  $P$ , την

τυρβώδη κινητική ενέργεια  $k$  και την καταστροφής της τύρβης  $\epsilon$ . Συνδυάζοντας στην συνέχεια τις εξισώσεις αρχής διατήρησης της ορμής και την εξίσωση της συνέχειας προκύπτει μία εξίσωση η οποία θα προσδιορίζει την πίεση. Αρχικά λαμβάνεται το πεδίο πίεσης αυθαίρετο και κατ' αυτό τον τρόπο επιλύονται οι εξισώσεις της ορμής. Παρόλα αυτά τα μεγέθη που προκύπτουν από τις εξισώσεις αυτές, δηλαδή οι συνιστώσες της ταχύτητας δεν ικανοποιούν την εξίσωση διατήρησης της μάζας (συνέχειας). Για τον λόγω αυτόν όπως προαναφέρθηκε απαιτείται η διόρθωση τους, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της διόρθωσης της πίεσης ώστε να ικανοποιείται η αρχή διατήρησης της μάζας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την πλήρη ικανοποίηση όλων των εξισώσεων διατήρησης της ορμής αλλά και συνέχειας. Ως προς τον τρόπο αποθήκευσης των μεταβλητών αναφέρεται ότι όλες οι μεταβλητές αποθηκεύονται στο κέντρο των κελιών του υπολογιστικού χωρίου, ομόθετο (collocated) πλέγμα. Το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται με τον τριδιαγώνιο αλγόριθμο επίλυσης (TDMA).

### 3.2.1 Ολοκλήρωση των εξισώσεων

Η ολοκλήρωση των εξισώσεων γίνεται με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Για την κάθε μεταβλητή  $\Phi$  ολοκληρώνονται οι εξισώσεις με τον όρο πηγής πάνω στον όγκο αναφοράς και προκύπτουν οι εκφράσεις τους μέσω πεπερασμένων διαφορών το αποτέλεσμα των οποίων εκφράζεται με βάση τα γειτονικά κελιά του πλέγματος. Στην συνέχεια οι όροι μεταφοράς και διάχυσης μετατρέπονται σε επιφανειακά ολοκληρώματα πάνω στις επιφάνειες τις οποίες ορίζει ο όγκος αναφοράς, όπως παρατηρείται στην Εικ. 10, και ο όρος πηγής γραμμικοποιείται σύμφωνα με τον Πίνακα 2. Η εξίσωση γίνεται κατ' αυτόν τον τρόπο:

$$\begin{aligned}
 & \left( \rho u \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_e A_e - \left( \rho u \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_w A_w + \left( \rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_n A_n \\
 & - \left( \rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_s A_s + \left( \rho w \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_d A_d \\
 & - \left( \rho w \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_u A_u = (S_P \Phi_p + S_U) V_{ολ}
 \end{aligned}
 \tag{Εξίσωση 3.5}$$



**Εικ. 10: Όγκος αναφοράς (20)**

Οι όροι  $S_U$  αναφέρονται στην προηγούμενη χρονική στιγμή ( $n-1$ ) και οι μεταβλητές που τις εκφράζουν αποθηκεύονται στην προηγούμενη χρονική στιγμή δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα πεπλεγμένο αριθμητικό σχήμα πρώτης τάξης ως προς το χρόνο, το οποίο οδηγεί σε σταθερότητα για μεγάλα χρονικά βήματα.

Οι κατευθύνσεις αναφοράς:

- N: Βόρεια-North
- S: Νότια-South
- E: Ανατολική-East
- W: Δυτική-West
- U: Ανάντι-Upwind
- D: Κατάντι-Downwind

**Πίνακας 2: Γραμμικοποιημένοι όροι πηγής (20)**

$\Phi$	$S_P^\Phi$	$S_U^\Phi$
1	0	$-\frac{\partial \rho}{\partial t}$
u	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho u)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right)$
v	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho v)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right)$
w	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho w)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right)$



T	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho T)^{n-1}}{\delta t} + G$
k	$-\frac{\rho}{\delta t} + C_\mu \frac{k\rho^2}{\mu_t}$	$\frac{(\rho k)^{n-1}}{\delta t} + G$
$\varepsilon$	$-\frac{\rho}{\delta t} + C_2 \frac{\varepsilon\rho}{\kappa}$	$\frac{(\rho\varepsilon)^{n-1}}{\delta t} + C_1 C_\mu \frac{\rho k}{\mu_t} G$

Στους προαναφερθέντες όρους πηγής προστίθεται και ο όρος  $S_+$ , ρόλος του οποίου είναι η σταθεροποίηση και εν τέλει η σύγκλιση των εξισώσεων. Ο όρος αυτός εκφράζεται ως το γινόμενο της υπολειπόμενης μάζας σε ένα κελί του υπολογιστικού πλέγματος με την διαφορά της νέας και της παλιάς τιμής της υπολογιζόμενης μεταβλητής. Ο όρος αυτός δεν επιδρά στο τελικό αποτέλεσμα και ο τύπος που τον ορίζει είναι:

$$S_+ = |\dot{m}_{net}| (\Phi^{PREV}_P - \Phi_P) \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

### 3.2.2 Ανάντι παραγωγή

Η χρήση της ανάντι διαφόρισης των εξισώσεων με το υβριδικό σχήμα υπολογισμού αποτελεί την πλέον καταλληλότερη από άποψη κατανάλωσης υπολογιστικών πόρων μέθοδο και ταυτόχρονα οι διαφορικές εξισώσεις αποκτούν μεγαλύτερη ευστάθεια. Η ανάλυση του υβριδικού σχήματος γίνεται με τη χρήση της ανατολικής επιφάνειας ( $A_e$ ) ως αναφορά. Σύμφωνα με την εξίσωση Εξίσωση 3.5 για την εν λόγω επιφάνεια έχουμε:

$$\left( \rho u \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_e A_e = \rho u_e \Phi_e A_e - \Gamma_{\Phi,e} \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta x_e} A_e \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

Στο δεύτερο μέλος της ισότητας ο πρώτος όρος αναφέρεται στην μεταφορά (συναγωγή) και ο δεύτερος στην διάχυση. Ορίζεται επίσης ο αριθμός Peclet ως το πηλίκο του ρυθμού μεταφοράς με το ρυθμό διάχυσης. Κατά την ανάντι παραγωγή χρησιμοποιείται και ο συντελεστής βαρύτητας  $f$  ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία του πλέγματος.

$$Pe_e = \left( \frac{\rho u \Delta x}{\Gamma_\Phi} \right)_e \quad \text{Εξίσωση 3.8}$$

$$f = \frac{\delta x_{Pe}}{\delta x_{PE}} \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

Η ανάντι παραγωγή είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα προαναφερθέντα μεγέθη και ισχύει ότι:

$$\begin{cases} \Phi_e = \Phi_P, & Pe_e > 2 \\ \Phi_e = \Phi_E, & Pe_e < 2 \\ \Phi_e = f\Phi_E + (1-f)\Phi_P, & -2 \leq Pe_e \leq 2 \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 3.10}$$

Επισημαίνεται ακόμα ότι για  $-2 \leq Pe_e \leq 2$  οι όροι διάχυσης μπορούν να αμεληθούν.

### 3.2.3 Διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης

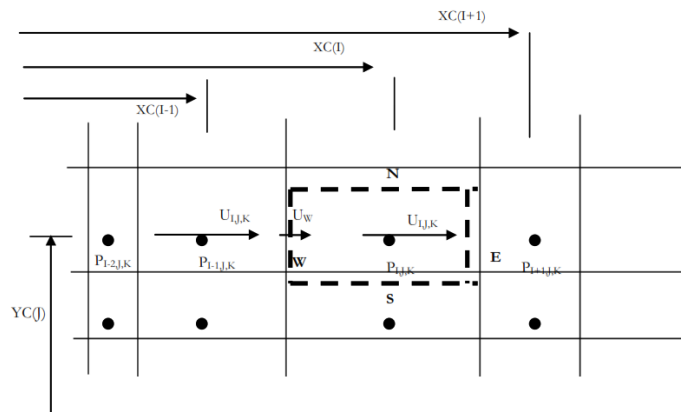
Με βάση όσα προαναφέρθηκαν η διαφορική εξίσωση διακριτοποιείται και κάθε μεταβλητή  $\Phi$  συνδέεται με τα σημεία των έξι επιφανειών με τις οποίες γειτνιάζει (N,S,E,W,U,D) και λαμβάνει την μορφή:

$$(\alpha_P^\Phi - S_P^\Phi)\Phi_P = \alpha_N^\Phi \Phi_N + \alpha_S^\Phi \Phi_S + \alpha_E^\Phi \Phi_E + \alpha_W^\Phi \Phi_W + \alpha_U^\Phi \Phi_U + \alpha_D^\Phi \Phi_D + S_U^\Phi \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

$$\alpha_P^\Phi = \alpha_N^\Phi + \alpha_S^\Phi + \alpha_E^\Phi + \alpha_W^\Phi + \alpha_U^\Phi + \alpha_D^\Phi \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

### 3.2.4 Εξίσωση πίεσης

Με τη χρήση ομόθετου πλέγματος όλες οι μεταβλητές αποθηκεύονται στο ίδιο σημείο του πλέγματος (Εικ. 11). Σύμφωνα με τις Εξίσωση 3.13, Εξίσωση 3.14, Εξίσωση 3.15 μπορεί να εκφρασθεί ο όρος της κλίσης πίεσης ο οποίος εμφανίζεται στις εξισώσεις διατήρησης της ορμής με την παρακάτω μορφή.



Εικ. 11: Ορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλέγματος και θέσεις μεταβλητών στη βασική υπολογιστική κυψέλη (20)

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{I,J,K} = \frac{P(I+1, J, K) - P(I-1, J, K)}{XC(I+1) - XC(I-1)} \quad \text{Εξίσωση 3.13}$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_{I,J,K} = \frac{P(I, J+1, K) - P(I, J-1, K)}{YC(I+1) - YC(I-1)} \quad \text{Εξίσωση 3.14}$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_{I,J,K} = \frac{P(I, J, K+1) - P(I, J, K-1)}{ZC(I+1) - ZC(I-1)} \quad \text{Εξίσωση 3.15}$$

Η διακριτοποίηση της κλίσης πίεσης με αυτό τον τρόπο προκαλεί ανακριβείς υπολογισμούς καθώς η πληροφορία δεν μεταφέρεται πλήρως. Για να αποφευχθεί αυτό κατασκευάζεται μία εξίσωση διόρθωσης της πίεσης. Αρχικά θεωρείται γνωστό το πεδίο πίεσης  $P^*$  από το οποίο προκύπτουν οι αντίστοιχες ταχύτητες από την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης της ορμής οι οποίες επιλύονται πρώτες. Παρόλα αυτά η υπόθεση αυτή δεν οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα καθώς δεν θα ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης της μάζας και θα

προκύπτουν μη μηδενικά υπόλοιπα. Για τον λόγω αυτό ακολουθείται στο τέλος κάθε υπολογισμού ταχυτήτων (επίλυση εξισώσεων ορμής) μία διόρθωση για το αρχικό πεδίο πίεσης (επίλυση εξίσωσης συνέχειας). Με την διαδικασία αυτή υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές της πίεσης και των ταχυτήτων. Στις παρακάτω εξισώσεις τα μεγέθη με (\*) αποτελούν τις αρχικές τιμές και τα μεγέθη με (') τις διορθώσεις.

$$P(I, J, K) = P^*(I, J, K) + P'(I, J, K) \quad \text{Εξίσωση 3.16}$$

$$u(I, J, K) = u^*(I, J, K) - \frac{V\sigma}{a_p^v(I, J, K) - S_p^v(I, J, K)} \frac{\partial P'}{\partial x} \Big|_{(I, J, K)} \quad \text{Εξίσωση 3.17}$$

$$v(I, J, K) = v^*(I, J, K) - \frac{V\sigma}{a_p^v(I, J, K) - S_p^v(I, J, K)} \frac{\partial P'}{\partial y} \Big|_{(I, J, K)} \quad \text{Εξίσωση 3.18}$$

$$w(I, J, K) = w^*(I, J, K) - \frac{V\sigma}{a_p^w(I, J, K) - S_p^w(I, J, K)} \frac{\partial P'}{\partial z} \Big|_{(I, J, K)} \quad \text{Εξίσωση 3.19}$$

$$DU = \frac{V\sigma}{a_p^v(I, J, K) - S_p^v(I, J, K)} \quad \text{Εξίσωση 3.20}$$

$$DV = \frac{V\sigma}{a_p^v(I, J, K) - S_p^v(I, J, K)} \quad \text{Εξίσωση 3.21}$$

$$DZ = \frac{V\sigma}{a_p^w(I, J, K) - S_p^w(I, J, K)} \quad \text{Εξίσωση 3.22}$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση της συνέχεις στον όγκο μίας υπολογιστικής κυψέλης προκύπτει ότι:

$$(\rho u \delta z)_w + (\rho v \delta z)_s + (\rho w \delta y)_d - (\rho u \delta z)_e - (\rho v \delta z)_n - (\rho w \delta y)_u = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.23}$$

Και τελικά η εξίσωση υπολογισμού διόρθωσης της πίεσης γίνεται:

$$\begin{aligned} & -\rho u_e^* \delta z + \rho u_w^* \delta z + \rho v_s^* \delta z - \rho v_n^* \delta z + \rho w_d^* \delta x \delta y - \rho w_u^* \delta x \delta y \\ & + \rho DU_e \delta y \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_e - \rho DU_w \delta y \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_w - \rho DV_s \delta x \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_s \\ & + \rho DV_n \delta x \delta z \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_n \\ & - \rho DW_d \delta y \delta x \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_d + \rho DW_u \delta y \delta x \left( \frac{\partial P'}{\partial x} \right)_u = 0 \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 3.24}$$

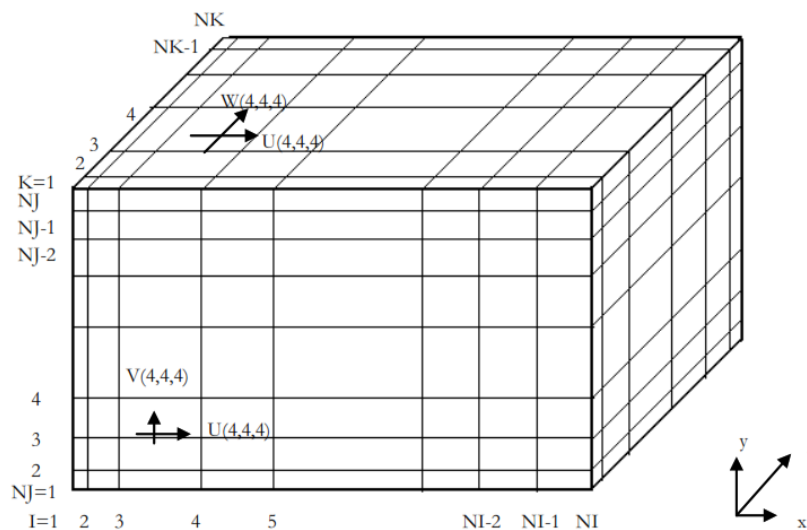
Στην παραπάνω εξίσωση οι όροι στους οποίους δεν εμπεριέχεται η κλίση της πίεσης αναφέρονται στην υπολειπόμενη μάζα και όταν το άθροισμά τους μηδενίσει τότε επιτυγχάνεται και η επίλυση των πεδίων. Τέλος οι παράγωγοι της διόρθωσης της πίεσης υπολογίζονται στο αντίστοιχο όριο (N,S,E,W,U,D) και οι υπόλοιποι συντελεστές DU,DV,DW

καθώς και για την πυκνότητα γίνονται γραμμικές παρεμβολές σε περίπτωση ανομοιόμορφου πλέγματος.

$$\left. \frac{\partial P'}{\partial x} \right|_e = \frac{P(I+1, J, K) - P(I-1, J, K)}{XC(I+1) - XC(I-1)} \quad \text{Εξίσωση 3.25}$$

### 3.2.5 Όρια υπολογιστικού χώρου

Παρατηρώντας το υπολογιστικό χωρίο παρατηρούμε ότι στα όριά του υπάρχουν κάποιες ιδιαιτερότητες. Εφόσον οι μεταβλητές αποθηκεύονται στα μέσα των πλεγματικών κυψελών, ο αριθμός των μεταβλητών σε μία πλεγματική κατεύθυνση θα είναι κατά ένα μεγαλύτερος από τον αριθμό των πλεγματικών γραμμών που τέμνουν κάθετα την κατεύθυνση αυτή. Με αυτόν τον τρόπο οι οριακές τιμές των μεταβλητών σε αποθήκευση ακριβώς πάνω στις οριακές γραμμές. Έτσι η μεταβλητή  $U(NI-1, J, K)$  θα αποθηκεύεται μεταξύ τελευταίας ( $NI-1$ ) και προτελευταίας ( $NI-2$ ) πλεγματικής γραμμής ενώ η  $U(NI, J, K)$  θα αποθηκεύεται ακριβώς πάνω στην τελευταία γραμμή ( $NI-1$ ).



Εικ. 12: Αρίθμηση πλεγματικών γραμμών (20)

### 3.2.6 Συναρτήσεις Τοίχου (Wallfunctions)

Στα τυρβώδη πεδία λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους που απαιτείται για τον καθορισμό των μεγεθών κοντά στο τοίχωμα γίνεται μία συσχέτιση των συνιστωσών της ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και του ρυθμού καταστροφής της τύρβης με την απόσταση του εκάστοτε σημείου, το οποίο βρίσκεται κοντά σε στερεό όριο, με το τοίχωμα. Εισάγονται με αυτό τον τρόπο δύο περιοχές, η μία κοντά στο στερεό όριο η οποία είναι γραμμική και μια λίγο πιο μακριά η οποία ακολουθεί λογαριθμικό χαρακτήρα. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται οι κλίσεις των μεγεθών και κατ' επέκταση οι όροι διάχυσης κοντά στα στερεά όρια του υπολογιστικού χωρίου. Εισάγεται το μέγεθος  $y^+$  το οποίο ορίζεται ως η αδιάστατη κάθετη απόσταση του σημείου P του πλέγματος του πλέον γειτονικού στο στερεό

όριο. Επίσης εισέρχονται στις εξισώσεις η σταθερά του Von Karman  $\kappa=0.4187$  και ο συντελεστής τραχύτητας τοιχώματος  $E$  ο οποίος για λεία τοιχώματα λαμβάνει την τιμή  $E=9.793$ .

$$y^+ = \left( \frac{C_\mu^{1/4} \sqrt{k}}{\nu} \right)_P \delta y_P \quad \text{Εξίσωση 3.26}$$

Για το βόρειο σύνορο στο οποίο η συνιστώσα της ταχύτητας  $u$  είναι παράλληλη ισχύει για την διατμητική τάση πάνω στο τοίχωμα:

$$\begin{cases} \tau_w = \mu_{1,P} \frac{u_P}{\delta y_P}, & y^+ < 11.63 \\ \tau_w = \left[ \frac{\rho \kappa C_\mu^{1/4} \sqrt{k}}{\ln(Ey^+)} \right]_P u_P, & y^+ > 11.63 \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 3.27}$$

Και για το δυτικό σύνορο στο οποίο η ταχύτητα  $v$  είναι παράλληλη θα δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{cases} \tau_w = \mu_{1,P} \frac{v_P}{\delta y_P}, & y^+ < 11.63 \\ \tau_w = \left[ \frac{\rho \kappa C_\mu^{1/4} \sqrt{k}}{\ln(Ey^+)} \right]_P v_P, & y^+ > 11.63 \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 3.28}$$

Για τους όρους πηγής για τους οποίους έχει γίνει γραμμικοποίηση καθώς και του όρου  $G$  γίνεται χρήση συναρτήσεων τοίχου με τη μορφή:

$$\begin{cases} S_P^u = S_P^u - \frac{\tau_w}{u_P} \delta x_n, \text{ με τον δείκτη } n \text{ αναφερόμαστε στο βόρειο όριο} \\ \alpha_N = 0 \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 3.29}$$

Τέλος για τους όρους πηγής στους οποίους εμπεριέχεται ο ρυθμός καταστροφή της τύρβης ( $\epsilon$ ) γίνεται χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$\int_V \rho \epsilon DV = \begin{cases} \left( \rho \kappa C_\mu^{3/4} k^{3/2} \frac{y^+}{\delta y} \right)_P \text{ Vol}, & y^+ < 11.63 \\ \left( \rho \kappa C_\mu^{3/4} \frac{\ln(Ey^+)}{\kappa \delta y} \right)_P \text{ Vol}, & y^+ > 11.63 \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 3.30}$$

Ο ρυθμός καταστροφής της τύρβης δίνεται από τον τύπο:

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa y_P} \quad \text{Εξίσωση 3.31}$$

### 3.2.7 Οριακές συνθήκες

Στην είσοδο εφαρμόζονται συνθήκες Dirichlet και στην έξοδο συνθήκες Neumann για όλες τις μεταβλητές. Οι  $U$  και  $V$  συνιστώσες της ταχύτητας μπορεί να τίθεται και μηδέν στην έξοδο, εφόσον το όριο είναι τέτοιο που να επιτρέπει την θεώρηση πλήρως ανεπτυγμένης ροής. Η  $W$  συνιστώσα της ταχύτητας στην έξοδο υφίσταται κάποιον ισολογισμό μάζας ως προς την είσοδο και διορθώνεται αναλόγως σε κάθε επανάληψη με την προσθήκη ενός

υπολογιζόμενου όρου στις αμέσως προηγούμενες της εξόδου τιμές, έτσι οι  $W(NI,J,K)$  προκύπτουν από τις  $W(NI-1,J,K)$  αφού προστεθεί μία ποσότητα που θα προκύψει από την διατήρηση-ισολογισμό μάζας. Στον άξονα συμμετρίας θεωρείται Neumann συνθήκη εκτός των ταχυτήτων που είναι κάθετες στο όριο οι οποίες θεωρούνται μηδενικές. Για τις συνιστώσες  $U,W$  κοντά σε στερεά τοιχώματα εφαρμόζονται συνθήκες τοίχου, ενώ στο βόρειο όριο η πίεση, η τυρβώδης κινητική ενέργεια  $k$  και η  $V$  συνιστώσα ακολουθούν συνθήκες Neumann. Όσον αφορά δυτικά και ανατολικά τοιχώματα για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και για την  $U$  συνιστώσα εφαρμόζονται ξανά συνθήκες Neumann και για τις παράλληλες συνιστώσες ( $V,W$ ) γίνεται χρήση συνθηκών τοίχου. Για την επιφάνεια μεταξύ ρευστού στερεού δεν απαιτείται προσθήκη καθώς επιβάλλεται αυτόματα με τον ορισμό στερεών τοιχωμάτων όπου επιλύεται και η εξίσωση θερμοκρασίας. Τέλος η πίεση επιλύεται με Neumann συνθήκες παντού εκτός της εισόδου όπου θεωρείται μηδενική (πίεση αναφοράς). Υπενθυμίζεται ότι η μεθοδολογία λύνει σχετικές πιέσεις και επομένως θα μπορούσε να τεθεί οποιαδήποτε τιμή για την πίεση στην είσοδο χωρίς να έχει επίπτωση στη λύση καθώς η κλίση της πίεσης δεν θα αλλάξει.

### 3.2.8 Υποχαλάρωση

Με την διαδικασία της υποχαλάρωσης των εξισώσεων επιτυγχάνεται η χρήση ενός ποσοστού της μεταβλητής που υπολογίσθηκε στην προηγούμενη επανάληψη ως "αρχική συνθήκη" για την νέα επανάληψη. Ο συντελεστής υποχαλάρωσης,  $\omega$ , λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$  και η επίδρασή της τείνει στην αργή σύγκλιση των εξισώσεων για μικρές τιμές του  $\omega$  ή και στην απόκλιση της λύσης για αρκετά μεγάλες τιμές του (κοντά στην μονάδα). Με την χρήση της μεθόδου αυτής η νέα τιμή της εκάστοτε μεταβλητής είναι το άθροισμα της προηγούμενης τιμής επί τον όρο  $(1-\omega)$  και της νέας υπολογισθείσας πριν εφαρμοστεί η υποχαλάρωση επί τον συντελεστή  $\omega$ . Υποχαλάρωση εφαρμόζεται σε κάθε επανάληψη. Παρουσιάζεται και στην συνέχεια η εξίσωση που περιεγράφηκε προηγουμένως στην οποία τα μεγέθη με εκθέτες new και old αναφέρονται στην εκάστοτε χρονική στιγμή και τα το μέγεθος με (') στην νέα τιμή πριν γίνει υποχαλάρωση.

$$\Phi_p^{\text{new}} = \omega \Phi_p' + (1 - \omega) \Phi_p^{\text{old}} \quad \text{Εξίσωση 3.32}$$

## 3.3 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας

Στα προηγούμενα βήματα παρουσιάστηκε η διαδικασία επίλυσης ρευστομηχανικών προβλημάτων με την χρήση του κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε από τον Καθηγητή Δημήτριο Μπούρη και για την επίλυση του εν λόγω ζητήματος, προσομοίωση ροής σε δικέλυφη όψη κτηρίου, έγινε χρήση του και παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα θα αναφερθούν στην επόμενη ενότητα. Με βάση τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται τα βήματα επίλυσης.

1. Αρχικά γίνεται μια υπόθεση όλων των μεγεθών ( $u,v,w,k,\varepsilon,T$ ) που αφορούν το πεδίο ροής και το πεδίο της πίεσης θεωρείται και αυτό δεδομένο.
2. Οι εξισώσεις τις οποίες επιλύει αρχικά ο κώδικας είναι αυτές της αρχής της διατήρησης της ορμής.
3. Επιλύεται η εξίσωση Εξίσωση 3.24 για να βρεθεί η νέα τιμή της ώστε να ικανοποιείται η αρχή διατήρησης της μάζας

4. Οι συνιστώσες της ταχύτητας και το πεδίο πίεσης τις νέες διορθωμένες τιμές
5. Λύνονται οι υπόλοιπες εξισώσεις για τα υπόλοιπα μεγέθη, τυρβώδης κινητική ενέργεια, ρυθμός καταστροφής της τύρβης, θερμοκρασίας
6. Οι τιμές που υπολογίζονται θεωρούνται οι νέες αρχικές για το επόμενο χρονικό βήμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως την σύγκλιση.
7. Σε περίπτωση που το πεδίο ροής είναι μη μόνιμο η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε χρονικό βήμα.

### 3.4 Υπολογιστικό Πρόγραμμα

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά στην διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για να μοντελοποιηθεί η διάταξη και η ροή. Ο κώδικας είναι ιδιαίτερα εύχρηστος και ο χρήστης μπορεί με σχετική ευκολία να τον επεξεργασθεί για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος που τίθεται να αντιμετωπίσει. Τα αρχεία τα οποία καλείται να επεξεργασθεί είναι το DBASEGRID ,το DCAFCA3D και το αρχείο INPROFILES (XY/ZY). Το πρώτο χρησιμοποιείται για καθορισμό των οριακών συνθηκών αλλά και των βασικών διαστάσεων του πλέγματος του υπολογιστικού χωρίου. Στο δεύτερο αρχείο καθορίζονται βασικά μεγέθη του ρευστού όπως πυκνότητα δυναμικό ιξώδες κ.α καθώς και των αντίστοιχων στερεών τοιχωμάτων σε περίπτωση που υπάρχουν μέσα στο υπολογιστικό χωρίο. Ταυτόχρονα ορίζονται τα χρονικά βήματα και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων , ο συντελεστής υποχαλάρωσης της εκάστοτε μεταβλητής και τα κριτήρια σύγκλισης του κώδικα. Τέλος στο αρχείο INPROFILES (XY/ZY) ορίζονται οι αρχικές συνθήκες των συνιστωσών της ταχύτητας (u,v,w) της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) και του ρυθμού καταστροφής της τύρβης (ε). Στο αρχείο DBASEGRID ο χρήστης θέτει αρχικά τις οριακές συνθήκες IBOUND (N,S,E,W,U,D) οι οποίες αντιστοιχούν στα όρια ( NJ,J,NI,I,K,NK). Οι τιμές που δίνονται στα IBOUND μπορεί να είναι 0,1,2,3 για είσοδο, για στερεό τοίχωμα, για άξονα συμμετρίας και για έξοδο αντίστοιχα. Στην συνέχεια ορίζει τις βασικές διαστάσεις του χωρίου στην κάθε κατεύθυνση. Στην παρούσα εργασία έγινε μια παραμετρική μελέτη όσον αφορά στη δικέλυφη όψη ενός κτηρίου. Οι κύριες διαστάσεις που μας αφορούν είναι στους X,Z άξονες καθώς και το διάκενο που υπάρχει ανάμεσα στα δύο στερεά τοιχώματα και ο άξονας Y αποτελεί τον άξονα συμμετρίας.. Η διαδικασία ξεκινάει με τον καθορισμό των διαστάσεων του υπολογιστικού χωρίου. Αρχικά δίνονται για κάθε περίπτωση οι βασικές διαστάσεις ΧΤΟΤ, ΥΤΟΤ,ΖΤΟΤ οι οποίες αποτελούν τα όρια του υπολογιστικού χώρου. Στην συνέχεια ορίζουμε τις περιοχές στις οποίες διακριτοποιείται ο κάθε άξονας ξεχωριστά. Οι περιοχές αυτές ορίζονται από την επιλογή NBLREGIONS και επιλέγεται το κατάλληλο πλήθος για τον κάθε άξονα. Η επιλογή αυτή γίνεται με βάση το πόσο πυκνό η αραιό θα είναι το πλέγμα. Στην παρούσα περίπτωση θέλουμε πυκνό πλέγμα στον X και στον Z άξονα και αραιό στον Y. Για την κάθε μία υπο-περιοχή δίνουμε τα άκρα της με την χρήση των μεταβλητών IW1, IW2(το I αφορά των X άξονα ,J τον Y, K τον Z) καθώς και την πραγματική της διάσταση με βάση τις μεταβλητές X1,X2(για τον X άξονα). Αυτό γίνεται μέχρις ότου φτάσουμε στο ΧΤΟΤ, ΥΤΟΤ,ΖΤΟΤ. Επίσης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως θέλουμε κάποιες υπο-περιοχές να έχουν πιο πυκνό πλέγμα, τέτοιες περιοχές είναι ανάμεσα στα δύο στερεά τοιχώματα στα οποία υπάρχει η κίνηση του ρευστού κατά τον κατακόρυφο άξονα Z και επίσης εκεί που υπάρχουν αλλαγές στην κατεύθυνση της ροής ( γωνίες , είσοδος-έξοδος από το διάκενο) . Η πυκνωση αυτή γίνεται με την επιλογή IEXPSYM στην οποία δίνεται η επιλογή

1 και με βάση την επιλογή EXPX γίνεται η ανάλογη πύκνωση. Για πυκνό πλέγμα στην μεταβλητή EXPX το οποίο είναι ένας συντελεστής γεωμετρικής προόδου δίνεται μία τιμή της τάξης του 1.001 το οποίο σημαίνει ότι τα δύο κελία είναι σχεδόν ίσα μεταξύ τους. Αντίστοιχα όταν θέλουμε μια περιοχή να έχει αραιό πλέγμα χρησιμοποιούμε την τιμή 1.05 η 1.07 στην μεταβλητή EXPX. Αραιό πλέγμα χρησιμοποιείται σε περιοχές που η ροή έχει αναπτυχθεί και δεν αναμένονται έντονες μεταβολές των μεγεθών. Αφού γίνει η διαδικασία αυτή ορίζει τα όρια των στερεών τοιχωμάτων που βρίσκονται εντός του χωρίου. Στην συνέχεια μεταβαίνει στο αρχείο DCAFCA3D στο οποίο ορίζει τα μεγέθη που προαναφέρθηκαν και τέλος στο αρχείο INPROFILES (XY/ZY) γίνεται κατασκευή του προφίλ της ροής. Στην περίπτωση της ροής σε δικέλυφη όψη κτηρίου το προφίλ που δόθηκε είναι ομοιόμορφο και τα χαρακτηριστικά του θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.



## 4 Ανεξαρτησία πλέγματος

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η εύρεση του βέλτιστου πλέγματος με βάση το οποίο δεν παρατηρείται έντονη μεταβολή των αποτελεσμάτων καθώς και επίσης γίνεται χρήση και των ελάχιστων υπολογιστικών πόρων.

### 4.1 Γενικά χαρακτηριστικά γεωμετρίας

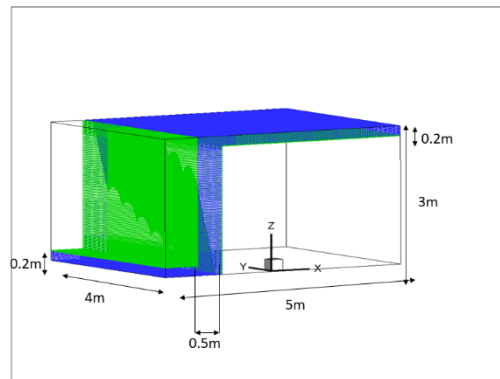
Κατά την διαδικασία αυτή θα συγκρίνονται για διάφορα πλέγμα κατατομές του μέτρου της ταχύτητας (Velocity Magnitude) και της στροβιλότητας (Vorticity Magnitude), της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k$ ) και της πίεσης ( $P$ ) στην θέση  $Y=Y_{max}/2$ , η οποία αποτελεί και τον άξονα συμμετρίας της γεωμετρίας καθώς επίσης και η διαφορά της μέσης πίεσης ανάμεσα στο διάκενο εισόδου και εξόδου της ροής. Κάποια από τα προαναφερθέντα μεγέθη δεν είναι απευθείας υπολογισμένα από τον κώδικα επίλυσης και θα υπολογιστούν μέσω του `tec plot`. Καθίσταται αναγκαίος ο υπολογισμός της μέσης πίεσης στις διατομές εισόδου και εξόδου. Αυτό γίνεται μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται στην συνέχεια.

Στην παρούσα γεωμετρία που μελετάμε οι διαστάσεις τις είναι οι εξής:

**Πίνακας 3: Βασικές διαστάσεις γεωμετρίας**

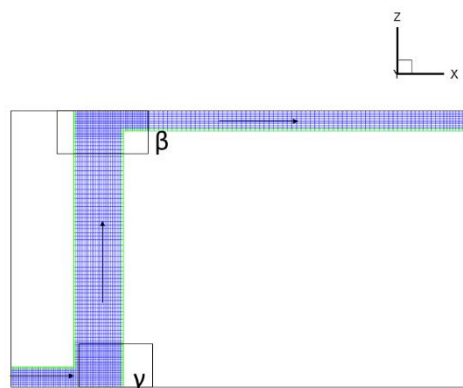
ΧΤΟΤ	5.0m
ΥΤΟΤ	4.0m
ΖΤΟΤ	3.0m
Διάκενο εισόδου (ύψος κάτω διακένου)	0.2
Ενδιάμεσο διάκενο (έκταση κατά τον Χ άξονα)	0.5m (εκτείνεται από την θέση $X=0.7m$ έως την θέση $X=1.2m$ )
Διάκενο εξόδου (ύψος άνω διακένου)	0.2m

Τα ύψη των διακένων και οι κύριες διαστάσεις παραμένουν αμετάβλητες καθώς κύριος σκοπός είναι η ανεξαρτησία του πλέγματος του υπολογιστικού χωρίου. Ο υπολογισμός αυτός θα γίνει μέσω του υπολογισμού της διαφοράς της μέσης πίεσης μεταξύ του διακένου εισόδου και εξόδου. Καταρχάς κατασκευάζονται μέσω του αρχείου DBASEGRID οι βασικές διαστάσεις και στην συνέχεια ακολουθεί η ανάλογη πύκνωση-αραίωση του πλέγματος. Στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 13) απεικονίζεται η γεωμετρία η οποία όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης πλεγματοποίησης του χωρίου. Το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί στα στερεά τοιχώματα και το μπλε στον αγωγό.

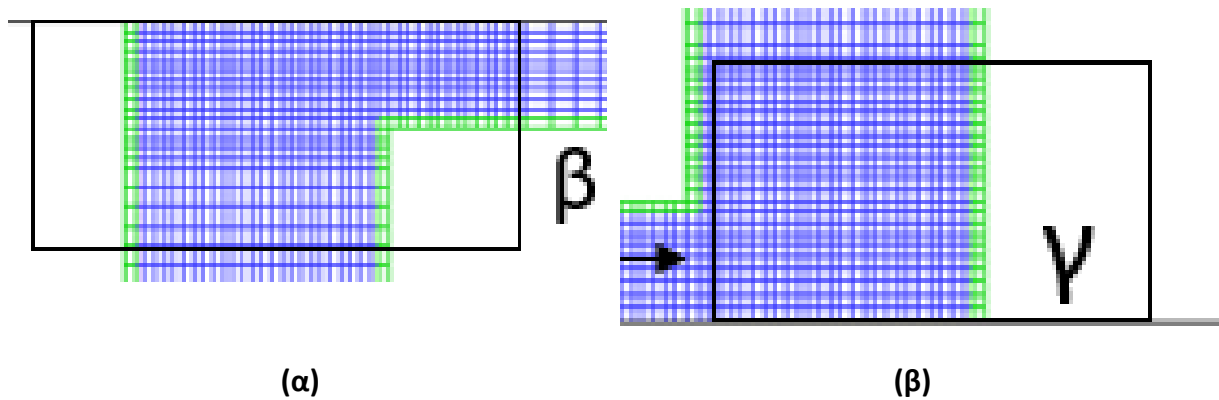


**Εικ. 13: Διαστάσεις υπολογιστικού μοντέλου**

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν σημεία του υπολογιστικού χωρίου στα οποία έχουν γίνει οι κατάλληλες πυκνώσεις και αραιώσεις. Οι παρακάτω εικόνες αναφέρονται στο πλέγμα διαστάσεων  $N_I=151$ ,  $N_J=122$ ,  $N_K=91$  το οποίο όπως θα αναφερθεί και παρακάτω είναι το πλέον αντιπροσωπευτικό για την επίλυση του προβλήματος μοντελοποίησης ροής αέρα σε δικέλυφη όψη κτηρίου. Στην **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** παρουσιάζεται το πλέγμα σε πλάγια όψη και επικεντρώνεται στα σημεία στα οποία σχηματίζονται οι γωνίες εισόδου και εξόδου από τον κλωβό. Στην Εικ. 15 παρουσιάζονται σε μεγέθυνση οι περιοχές εισόδου και εξόδου από τον κλωβό.



**Εικ. 14: Υπολογιστικό πλέγμα σε πλάγια όψη**



Εικ. 15: Υπολογιστικό πλέγμα σε πλάγια όψη, (α) στην γωνία εξόδου από το διάκενο, (β) στην γωνία εισόδου στο διάκενο

## 4.2 Ανεξαρτησία πλέγματος

Επόμενο βήμα για την επίτευξη της ανεξαρτησίας είναι η σύγκριση των κατανομών καθώς και η εύρεση και εν τέλη η σταθεροποίηση της διαφοράς της μέσης πίεσης μεταξύ του διακένου εισόδου και εξόδου της ροής. Η σταθεροποίηση της διαφοράς πίεσης αποτελεί βασικό κριτήριο για την επιλογή του τελικού πλέγματος. Η σταθεροποίηση αυτής της διαφοράς οδηγεί στην επιλογή του πλέγματος το οποίο με την χρήση των λιγότερων υπολογιστικών πόρων επιλύει το παρόν πρόβλημα. Η διαδικασία αυτή γίνεται με σκοπό τον προσδιορισμό της τιμής εκείνης στην οποία η διαφορά πίεσης εισόδου και εξόδου τείνει να λάβει μια σταθερή τιμή και να μην μεταβάλλεται σημαντικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Μέσω του tec plot για την κάθε περίπτωση κατασκευάζονται δύο υπο-περιοχές (sub-zones) με βάση την ζώνη στην οποία παρουσιάζεται το πεδίο ροής. Η κατασκευή των sub-zones είναι απαραίτητη καθώς σε κάθε μία από αυτές διατηρούνται τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής στις περιοχές αυτές από την επίλυση του κώδικα. Από την επιλογή Data→Extract→Sub-Zone καθορίζεται η κάθε υπο-περιοχή για την οποία θέλουμε να βρούμε την μέση πίεση. Στην συνέχεια στην επιλογή Sub-Zone καθορίζονται οι διαστάσεις της νέας ζώνης που θα δημιουργηθεί.

Για την πρώτη υπό-ζώνη η οποία βρίσκεται στην είσοδο της ροής δίνονται οι εξής τιμές:

Πίνακας 4: Διάταξη υπο-ζώνης εισόδου

	Start	End	Skip
I-Index	1	1	1
J-Index	1	Mx	1
K-Index	1	K-διακένου εισόδου	1

Για την δεύτερη υπό-ζώνη η οποία βρίσκεται στην έξοδο της ροής δίνονται οι εξής τιμές:

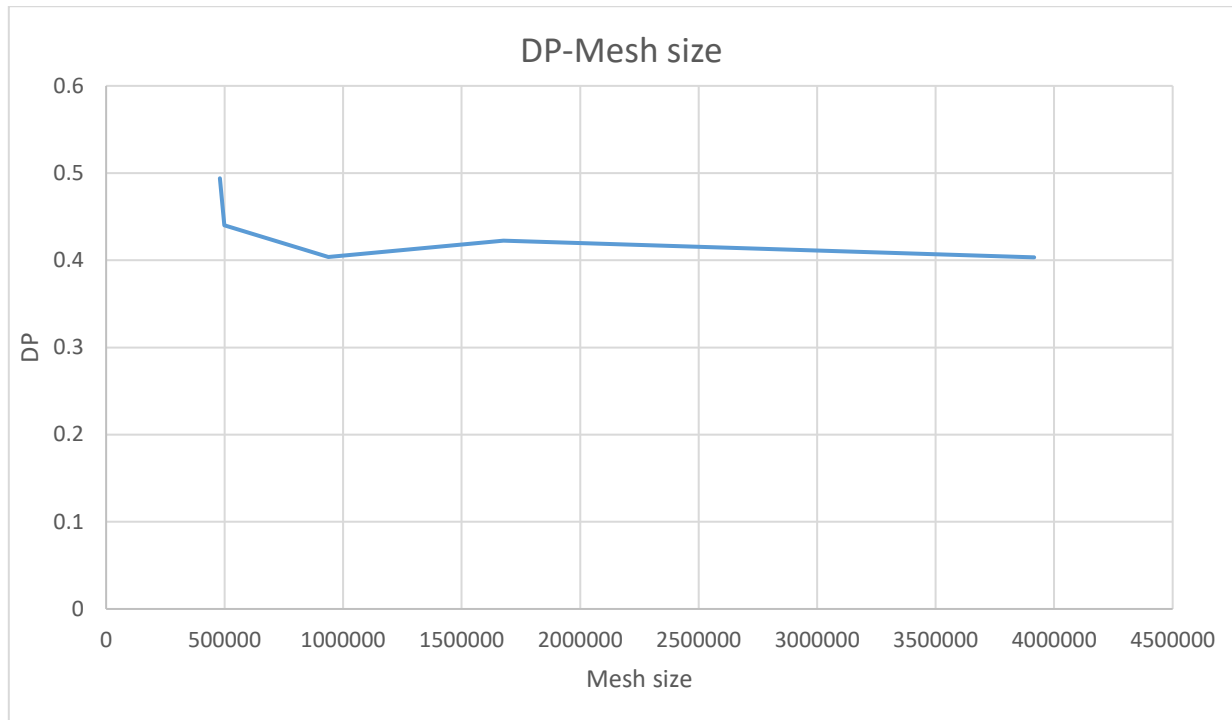
**Πίνακας 5: Διάταξη υπο-ζώνης εξόδου**

	Start	End	Skip
I-Index	NI-1	Mx	1
J-Index	1	Mx	1
K-Index	K-διακένου εξόδου	Mx	1

Στην συνέχεια αφού έχουμε δημιουργήσει αυτές τις δύο υπό-περιοχές από την επιλογή Analyze→Perform Integration μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση πίεση. Από την καρτέλα Perform Integration επιλέγουμε αρχικά τον τύπο της ολοκλήρωσης, Type of Integration, και τέλος την επιλογή Average. Στην συνέχεια από την επιλογή Averaged variable επιλέγουμε την πίεση, P, και στην συνέχεια από την καρτέλα Domain of integration από την επιλογή select επιλέγουμε την “ζώνη” για την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε την μέση πίεση και τέλος integrate. Αυτή η διαδικασία γίνεται δύο φορές για την κάθε γεωμετρία , μία για το διάκενο εισόδου και μία για το διάκενο εξόδου. Στόχος είναι η διαφορά πίεσης εισόδου και εξόδου να τείνει στο 0.4 και για τις τρεις τρεις τελευταίες πλεγματοποιήσεις η διαφορά αυτή είναι ικανοποιητική οπότε θα δοθεί έμφασή σε αυτές. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι διαστάσεις των πλεγμάτων για τις τρεις κατευθύνσεις και οι διαφορά πίεσης για κάθε μία από αυτές ( Πίνακας 6 ). Ταυτόχρονα στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η μεταβολή της πτώσης της μέση πίεσης συναρτήσει του μεγέθους του πλέγματος.

**Πίνακας 6: Διαστάσεις πλέγματος στις τρεις κατευθύνσεις και διαφορά πίεσης εισόδου εξόδου**

NI	NJ	NK	Mesh size	Pin	Pout	DP	Cells/meter
100	82	60	492000	0.1610	-0.333	0.4940	20
81	81	76	498636	0.1130	-0.332	0.4436	16/20/25
125	102	75	937500	0.0698	-0.334	0.4038	25
151	122	91	1676402	0.1079	-0.314	0.4219	30
201	161	121	3915681	-0.1870	-0.5903	0.4033	40



**Διάγραμμα 1: Πτώση πίεσης συναρτήσει του μεγέθους του πλέγματος**

Στην συνέχεια του κεφαλαίου για τον προσδιορισμό του πλέον καταλληλότερου πλέγματος δίνεται έμφαση στις τρεις τελευταίες περιπτώσεις. Η περίπτωση στην οποία το πλέγμα έχει διαστάσεις NI=125, NJ=102, NK=75 θα αναγράφεται ως περίπτωση αραιού πλέγματος, όταν έχει διαστάσεις NI=151, NJ=122, NK=91 θα αναφέρεται ως περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος και όταν έχει διαστάσεις NI=201, NJ=161, NK=121 θα αναφέρεται ως περίπτωση πυκνού πλέγματος.

#### 4.2.1 Υπολογισμός αδιάστατης πίεσης

Στην συνέχεια για πληρότητα των αποτελεσμάτων υπολογίστηκε στην θέση  $Y=Y_{max}/2$  και η αδιάστατη πίεση  $Cp = \frac{P-P_{pref}}{0.5\rho U^2}$  για τα τρία τελευταία πλέγματα.

Όπου:

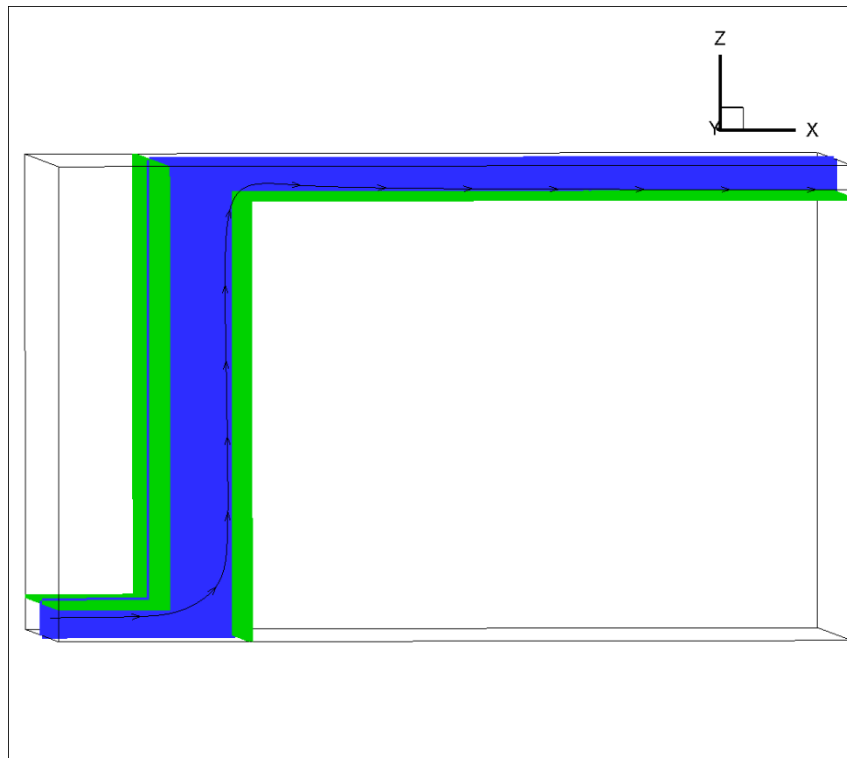
- P η πίεση στο κάθε σημείο
- P<sub>pref</sub> η μέση τιμή πίεσης στην είσοδο της ροής
- ρ η πυκνότητα
- U το μέτρο της ταχύτητας.

Για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού πρέπει να γίνουν κάποιοι υπολογισμοί μέσω του tec plot. Αυτό γίνεται από την καρτέλα Data→ Alter→ Specify Equations. Στην συνέχεια με κατάλληλο τρόπο γραφής εξισώσεων ορίζουμε τα τρία παρακάτω μεγέθη.

- $\{m\}=0.5*\{DEN\}*\sqrt{\{U\}^{**2}+V^{**2}+W^{**2}}$
- $\{a\}=\{\{P\}-Pref\}$

- $\{C_p\}=\{a\}/\{m\}$

Στην περίπτωση που επιλεγεί μόνο η κύρια ζώνη η οποία παρουσιάζει ολόκληρη την γεωμετρία αυτός ο υπολογισμός δεν μπορεί να γίνει καθώς το μέγεθος P-Pref είναι τάξης μεγέθους  $10^{-2}$  και στην συνέχεια καθώς αυτή η ζώνη εμπεριέχει και τα στερεά τοιχώματα και διαιρούμε με την πυκνότητα αυτό το νούμερο θα τείνει στο 0 και δεν θα μπορεί να υπολογισθεί. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα έγινε η εξής διαδικασία. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η γεωμετρία και ένα επίπεδο στην θέση  $Y=Y_{max}/2$  στο οποίο παρουσιάζονται όλες οι κατατομές που θα αναγερθούν στην συνέχεια.



Εικ. 16: Στερεά τοιχώματα και επίπεδο συμμετρίας της γεωμετρίας

Αφού γίνει αυτή η διαδικασία υπολογίζουμε το μέγεθος που μας ενδιαφέρει και απεικονίζουμε την κατατομή με το ανάλογο scaling. Παρατίθενται αρχικά οι κατατομές του μέτρου της ταχύτητας, της στροβιλότητας, της πίεσης, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην θέση  $Y=Y_{max}/2$  για τα τρία τελευταία πλέγματα οι οποίες θα ξεκινάνε από το αραιότερο και θα τείνουν στο πυκνότερο.

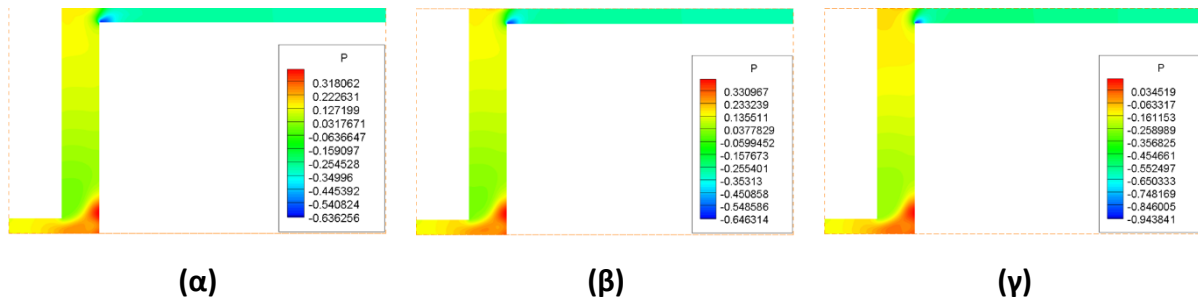
## 4.2.2 Κατανομές βασικών μεγεθών

Συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η απεικόνιση των κατανομών των βασικών μεγεθών του πεδίου.

### 4.2.2.1 Κατανομές πίεσης

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε με βάση τις παρακάτω εικόνες οι οποίες απεικονίζουν την κατανομή της πίεσης στην θέση  $Y=Y_{max}/2$  ότι για τα δύο πρώτα πλέγματα η μέγιστη και η

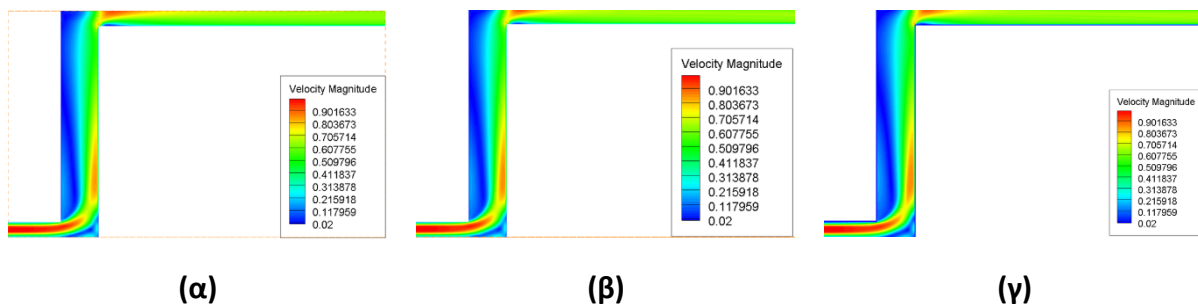
ελάχιστη τιμή που λαμβάνει η πίεση δεν διαφέρει και οι κατανομές παρουσιάζουν μια ικανοποιητική ομοιομορφία. Στην περίπτωση τώρα του πυκνότερου πλέγματος παρατηρούμε ότι τα όρια της πίεσης διαφέρουν σε σχέση με τα προηγούμενα, παρόλα αυτά η διαφορά αυτή είναι σταθερή καθ' όλη την κατατομή και είναι περίπου 0.29 αλλά και πάλι δεν εντοπίζεται κάποια εμφανής ανομοιομορφία με τις άλλες δύο.



Εικ. 17: Κατανομές πίεσης, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος

#### 4.2.2.2 Κατανομές μέτρου ταχύτητας

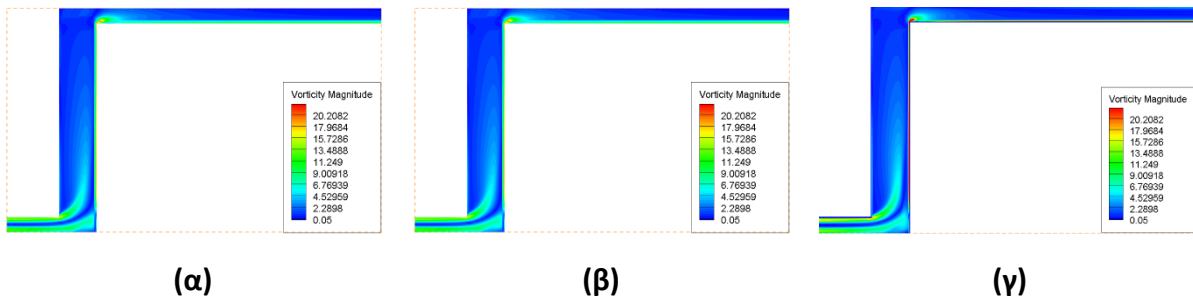
Στην συνέχεια, για την ίδια θέση, παρουσιάζονται οι κατανομές του μέτρου της ταχύτητας στις οποίες τόσο η μέγιστη όσο και η ελάχιστη τιμή δεν διαφέρουν για τις περιπτώσεις που εξετάζουμε. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι για το πυκνότερο πλέγμα, κοντά στα στερεά τοιχώματα, υπάρχει μία περιοχή στην οποία το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνει τιμές κοντά στο 0.02, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στις άλλες δύο. Οι κατανομές πάλι θα παρουσιαστούν από το αραιότερο προς το πυκνότερο πλέγμα.



Εικ. 18: Κατανομές μέτρου ταχύτητας, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος

#### 4.2.2.3 Κατανομές μέτρου στροβιλότητας

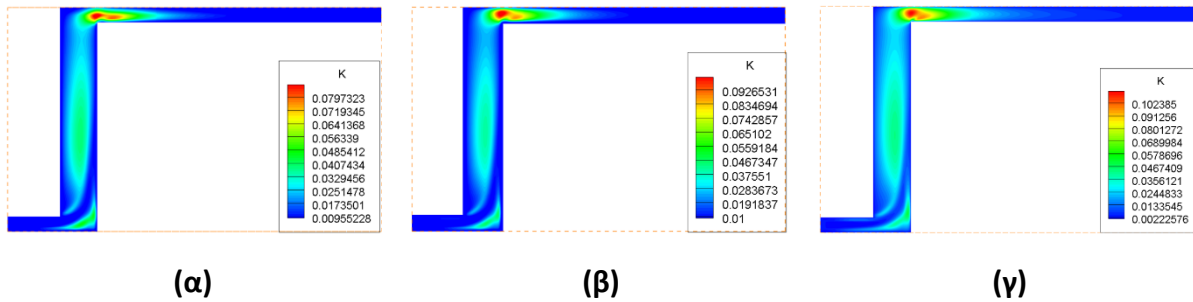
Επόμενο μέγεθος το οποίο απεικονίζεται είναι το μέτρο της στροβιλότητας. Στις δύο πρώτες κατανομές παρουσιάζεται μία μικρή διαφορά του μέτρου της στροβιλότητας στην είσοδο της ροής στο διάκενο εισόδου. Λόγω της διαφοράς που παρουσιάστηκε στο μέτρο της ταχύτητας για το πυκνότερο πλέγμα αναμένουμε και σε αυτή την περίπτωση να δούμε κάτι παρόμοιο στην τελευταία κατανομή. Οι κατανομές παρουσιάζονται πάλι από το αραιότερο προς το πυκνότερο πλέγμα.



Εικ. 19: Κατανομές μέτρου στροβιλότητας, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος

#### 4.2.2.4 Κατανομές τυρβώδους κινητικής ενέργειας

Για τις τρεις κατανομές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας παρατηρείται ομοιομορφία για τα δύο πυκνότερα πλέγματα ενώ για το αραιότερο υπάρχει μία περιοχή στο ενδιάμεσο κατακόρυφο διάκενο στο οποίο η τιμή του  $k$  λαμβάνει την τιμή 0.04 κάτι το οποίο δεν παρουσιάζεται έντονα στα πυκνότερα.



Εικ. 20: Κατανομές τυρβώδους κινητικής ενέργειας, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος

#### 4.2.2.5 Κατανομές αδιάστατης πίεσης

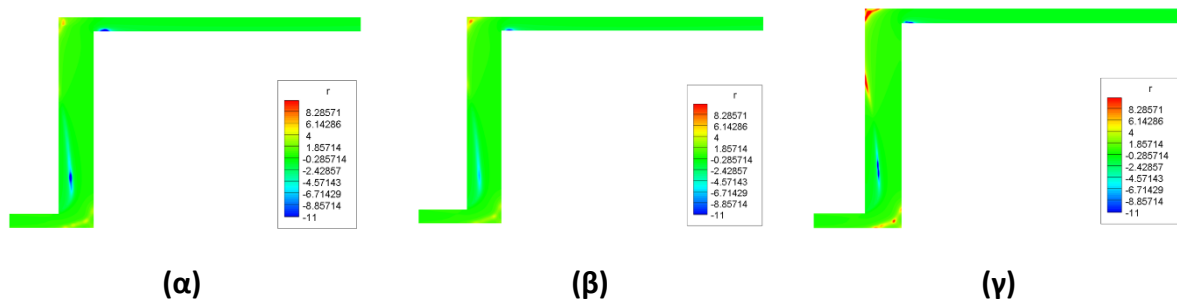
Στην συνέχεια, όσον αφορά στο μέγεθος  $C_p$  (αδιάστατη πίεση), παρουσιάζεται αρχικά συνοπτικός πίνακας, στον οποίο φαίνονται οι διαστάσεις NI, NJ, NK, καθώς και η μέση πίεση εισόδου σε κάθε πλέγμα.

Πίνακας 7: Διαστάσεις πλέγματος και πίεση αναφοράς

NI	NJ	NK	Pref
125	102	75	0.1007
151	122	91	0.1079
200	162	120	-0.1870



Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι κατανομές της αδιάστατης πίεσης για να εξαχθούν περεταίρω συμπεράσματα ως προς την ανεξαρτησία του πλέγματος. Στο πυκνότερο πλέγμα παρατηρούνται διαφορές σε κάποια σημεία στα οποία το Cr λαμβάνει την μέγιστή του τιμή. Αυτό πιθανόν συμβαίνει καθώς όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως πως στην περίπτωση αυτή η πίεση είναι κατά κύριο λόγο αρνητική, αλλά είναι μειωμένη κατά 0.29 σε σχέση με τα άλλα δύο πλέγματα στα αντίστοιχα σημεία, όπως προαναφέρθηκε. Παρατηρούμε ότι για τα πρώτα δύο πλέγματα οι κατανομές είναι σχεδόν ταυτόσημες και διαφέρουν μόνο σε ένα σημείο, στο οποίο στο πιο αραιό πλέγμα το συγκεκριμένο μέγεθος γίνεται ελάχιστο σε μία κάπως μεγαλύτερη περιοχή από ότι στο πυκνότερο. Οι κλίμακες και για τις τρεις περιπτώσεις έχουν  $\min=-11$ ,  $\max=10$  και 50 levels η κάθε μία.



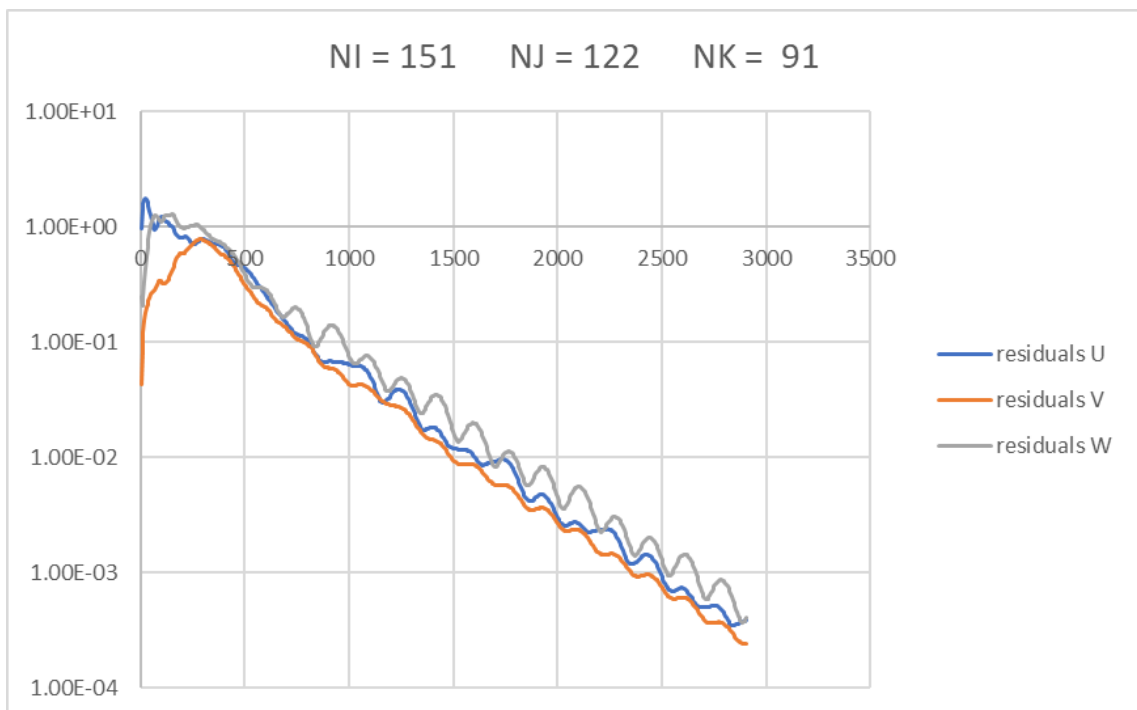
**Εικ. 21: Κατανομές αδιάστατης πίεσης, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος**

Με βάση τα προαναφερθέντα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το πιο αντιπροσωπευτικό πλέγμα για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι αυτό που έχει διαστάσεις  $N_I=151$ ,  $N_J=122$ ,  $N_K=91$  καθώς στο συγκεκριμένο πλέγμα δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές με τα αραιότερα και επιπλέον, προσεγγίζει καλύτερα το φαινόμενο. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι για επίλυση της ροής σε κοινό υπολογιστή ο χρόνος ολοκλήρωσης του κώδικα για το πυκνότερο από όλα τα πλέγματα ήταν 36 ώρες ενώ για τα προηγούμενα πλέγματα περίπου έξι ώρες, μία διαφορά που είναι αρκετά σημαντική.

Παρουσιάζεται τελικά το πλέγμα στο οποίο η λύση αποκτά μία ανεξαρτησία και θα χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση των υπόλοιπων γεωμετριών που θα μελετηθούν. Στο πλέγμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν 22 υπο-περιοχές για τον άξονα X, 8 υπο-περιοχές για τον άξονα Y και 22 για τον άξονα Z. Το πλέγμα είναι πυκνό κατά την είσοδο της ροής και κατά τον άξονα X στον οποίο αυτή αναπτύσσεται μέχρις ότου εξέλθει από το ενδιάμεσο διάκενο και ξεκινήσει να αναπτύσσεται στο άνω διάκενο. Καθώς η ροή έχει αναπτυχθεί στο άνω διάκενο και δεν αναμένονται έντονες μεταβολές στα χαρακτηριστικά της το πλέγμα αρχίζει να αραιώνει για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων. Κατά τον άξονα Z απαιτείται πυκνό πλέγμα στο κάτω μισό του άξονα καθώς εκεί θα παρουσιαστούν φαινόμενα στροβίλων και υπάρχουν έντονες μεταβολές των μεγεθών όπως απεικονίστηκαν και στις προηγούμενες εικόνες και ταυτόχρονα κοντά στην περιοχή του άνω διακένου. Τέλος για τον άξονα Y χρησιμοποιείται ομοιόμορφο πλέγμα καθώς αποτελεί και τον άξονα συμμετρίας της ροής.

### 4.3 Υπόλοιπα υπολογιστικών εξισώσεων

Καταρχάς πριν προχωρήσουμε είναι αναγκαίο να ελεγχθεί ο κώδικας ως προς την σύγκλιση των αποτελεσμάτων για την κάθε περίπτωση. Παρουσιάζεται, για αυτό τον λόγο, το παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 2) των residuals της ταχύτητας για την περίπτωση του πλέγματος που επιλέχθηκε. Στις υπόλοιπες υπολογιστικές αναλύσεις της ροής, η σύγκλιση των αποτελεσμάτων παρουσιάζει παρόμοια μορφή. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2, τα υπόλοιπα των εξισώσεων είναι της τάξης μεγέθους  $10^{-4}$  κάτι το οποίο είναι ικανοποιητικό. Παρατηρούμε στις προαναφερθείσες περιπτώσεις ότι η V συνιστώσα της ταχύτητας δεν παρουσιάζει ταλαντώσεις, κάτι το οποίο είναι εμφανές ότι γίνεται για τις άλλες δύο.



Διάγραμμα 2: Υπόλοιπα υπολογιστικών εξισώσεων σε λογαριθμική κλίμακα

## 5 Αποτελέσματα

### 5.1 Γενικά

Συνέχεια της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η σύγκριση αποτελεσμάτων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που παρέχονται από τον Ευάγγελο Τσιαπάλα (16). Η γεωμετρία η οποία αναλύθηκε μέσω κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής έχει διαστάσεις 2.5x1.25x2.5m. Η παράμετρος η οποία διαφέρει μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων είναι το πλάτος του διακένου το οποίο βρίσκεται μεταξύ της εξωτερικής τοιχοποιίας του κτηρίου και της δικέλυφης όψης. Για να μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να υπάρχει γεωμετρική και δυναμική ομοιότητα μεταξύ των δύο μοντέλων. Αρχικά καθίσταται αναγκαίο να γίνει προσαρμογή του υπολογιστικού πλέγματος, στο οποίο έχει γίνει περεταίρω ανάλυση ως προς την ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τις νέες διαστάσεις.

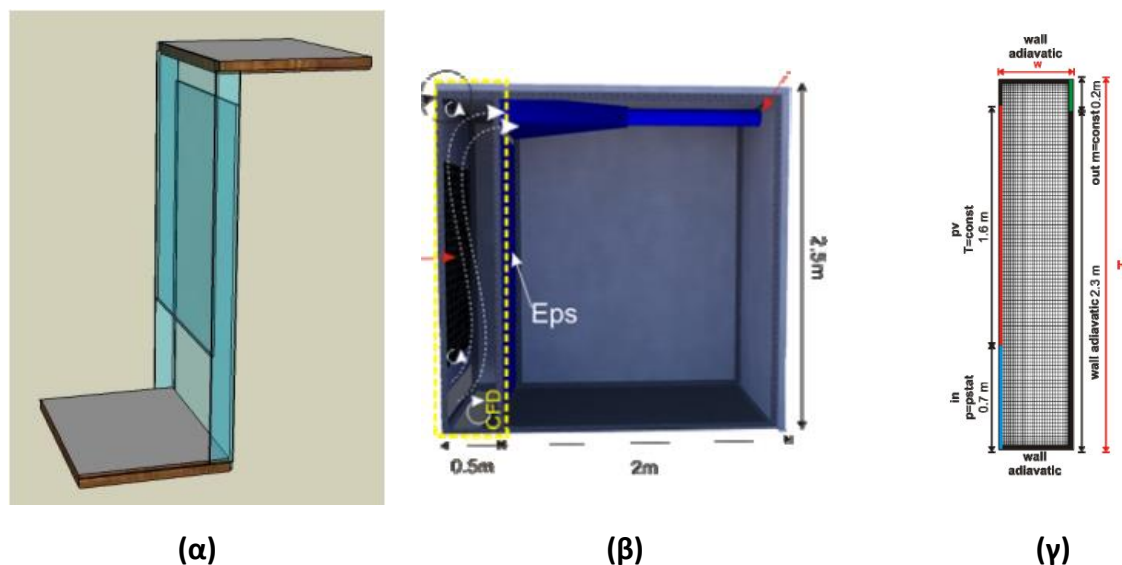
#### 5.1.1 Περιγραφή του πειράματος

Σκοπός της πειραματικής προσομοίωσης (16), ήταν ο εντοπισμός στροβίλων οι οποίοι δημιουργούνται εντός του κλωβού, η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλογα με την εκάστοτε παραμετρική ανάλυση, η οποία βασίζεται στο διαφορετικό πλάτος του κλωβού. Οι βασικές περιπτώσεις οι οποίες εξετάστηκαν πειραματικά είναι επτά, μία για κάθε διαφορετικό πλάτος, 1d, 2d, 3d, 4d, 5d, 6d και 7d. Ο κοινός παράγοντας είναι η διάσταση  $d=12.5\text{cm}$  και μέσω αυτής προκύπτουν τα διάκενα των υπολοίπων περιπτώσεων. Αφού καθοριστούν οι διαστάσεις του πειραματικού μοντέλου επόμενο βήμα αποτελεί η οπτικοποίηση της ροής η οποία επιτεύχθηκε με την χρήση μίας φωτεινής δέσμης Laser και μηχανές παραγωγής καπνού. Για τον υπολογισμό της διαφοράς πίεσης έγινε χρήση μανόμετρου το οποίο τοποθετήθηκε στο άνω μέρος του αγωγού. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε κάμερα ταχείας λήψης με την καταγραφή στιγμιότυπων σε απειροστά διαδοχικά χρονικά διαστήματα.

#### 5.1.2 Γεωμετρία

Για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν δύο ξύλινες πλάκες που αποτελούν την βάση του μοντέλου και το άνω όριο της κατασκευής. Σε αυτές τις δύο ξύλινες πλάκες ενώθηκαν δύο γυάλινες πλάκες οι οποίες αποτελούν την πρόσοψη του κτηρίου και την πίσω όψη. Τέλος έγινε χρήση δύο πλακών plexiglass οι οποίες αποτελούν τις πλάγιες όψεις του κτηρίου. Συνολικά η γεωμετρία παρουσιάζεται στην Εικ. 22α και ο λόγος γεωμετρικής ομοιότητας που χρησιμοποιείται ισούται με πέντε (5), όπως αναλύεται παρακάτω. Οι πρότυπες διαστάσεις του μοντέλου είναι αυτές που φαίνονται στην Εικ. 22β και αναφέρονται στην γεωμετρία 4d. Οι ξύλινες πλάκες φέρουν διαστάσεις μήκους 25cm και πλάτους 16cm και το συνολικό ύψος είναι 50cm. Η αναλογία μεταξύ των πειραματικών διαστάσεων και των πραγματικών είναι 1/5. Ο όρος “πραγματικές διαστάσεις” αναφέρεται στις διαστάσεις του μοντέλου στο οποίο θα γίνει υπολογιστική επίλυση του πεδίου ροής και ταυτίζεται με τις διαστάσεις από την ανάλυση του Ουρδουμποζάνη (21) Το μήκος του διακένου μεταξύ των στερεών τοιχωμάτων στην προς μελέτη γεωμετρία είναι 0.5m και στην πειραματική διάταξη στην προκειμένη περίπτωση η πλάκα που χρησιμοποιείται για το ενδιάμεσο διάκενο έχει

πλάτος 0.1m κάτι το οποίο συνάδει και με την σταθερά αναλογίας. Για το διάκενο του αγωγού εισόδου το ύψος είναι 0.7m και κατ' επέκταση στο πειραματικό μοντέλο με βάση την αναλογία των πλευρών είναι 0.14m και το ύψος του διακένου εξόδου είναι 0.2m οπότε με την αντίστοιχη διαδικασία υπολογίζεται το ύψος του πειραματικού να έχει την τιμή 0.04m. Τα πλάτη των αγωγών εισόδου και εξόδου που δόθηκαν είναι 0.5m και 1.5m αντίστοιχα καθώς σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα το μοντέλο έχει συνολικά πλάτος 2.5m. Οι διαστάσεις του μοντέλου 4d παρουσιάζονται και αναλυτικά στον Πίνακα 8.



Εικ. 22: Διάταξη, (α) πειραματικό μοντέλο Ευάγγελου Τσιαπάλα (16), (β) πλάγια όψη πρότυπου μοντέλου Ουρδουμποζάνη (21), (γ) πλάγια όψη κλωβού Ουρδουμποζάνη (21)

Πίνακας 8: Διαστάσεις πραγματικού μοντέλου (21)

ΧΤΟΤ	2.5m
ΥΤΟΤ	1.25m
ΖΤΟΤ	2.5m
Διάκενο εισόδου(ύψος κάτω διακένου)	0.7m
Ενδιάμεσο διάκενο (έκταση κατά τον Χ άξονα)	0.5m(εκτείνεται από την θέση Χ=0.3m έως την θέση Χ=0.8m)
Διάκενο εξόδου (ύψος άνω διακένου)	0.2m

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν οι περιπτώσεις 1d, 2d, 4d, 7d οι οποίες διαφέρουν μόνο κατά την διάσταση του πλάτους του κλωβού. Τα πλάτη των διακένων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 9 ακολουθούν την σταθερά αναλογίας που προαναφέρθηκε, είναι δηλαδή πέντε φορές μεγαλύτερα από τα πειραματικά.

Πίνακας 9: Πλάτη διακένων

Μοντέλο	Πλάτος διακένου (cm)
1d	12.5
2d	25.0
4d	50.0
7d	19.1

Θα γίνει παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων με το πλάτος του ενδιάμεσου διακένου να αλλάζει την κάθε φορά, για να αποφανθούμε για την ύπαρξη και την έκταση των στροβίλων που δημιουργούνται καθώς επίσης και για μεταβλητές που απαιτείται η παρουσίαση των κατατομών τους στην γεωμετρία.

## 5.2 Αρχικές συνθήκες

Επόμενο βήμα μετά την ανεξαρτησία του πλέγματος αποτελεί ο καθορισμός των αρχικών συνθηκών του προβλήματος. Η μεθοδολογία η οποία θα εφαρμοσθεί για τον προσδιορισμό του προφίλ ταχύτητας εισόδου είναι η ίδια για όλες τις παραμετρικές μελέτες και βασίζεται στην γεωμετρική και δυναμική ομοιότητα των πειραματικών και υπολογιστικών μοντέλων. Για την επίτευξη της γεωμετρικής ομοιότητας ο λόγος του μήκους κάθε τμήματος μεταξύ των πειραματικών διαστάσεων και των αντίστοιχων του μοντέλου το οποίο θα επιλυθεί με υπολογιστικές μεθόδους θα πρέπει να παραμένει σταθερός και είναι γνωστός ως λόγος ομοιότητας. Για την γεωμετρική ομοιότητα των δύο μοντέλων χρησιμοποιούμε τον λόγο ομοιότητας  $S_l$  και για την δυναμική ομοιότητα καθίσταται απαραίτητη προϋπόθεση η ισότητα των αριθμών Reynolds μεταξύ των αντίστοιχων μοντέλων τα οποία συγκρίνονται. Η ανάλυση η οποία ακολουθεί έγινε για την γεωμετρία 4d και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις θα παρουσιαστεί συγκεντρωτικός πίνακας.

Ξεκινώντας με την σταθερά αναλογίας με τις οποίες καθορίζονται οι διαστάσεις του μοντέλου το οποίο θα επιλυθεί με υπολογιστικές μεθόδους χρησιμοποιούμε ως λόγο ομοιότητας το μέγεθος  $S_l$  το οποίο εκφράζεται από την παρακάτω σχέση.

$$S_l = \frac{L_r}{L_{exp}} = 5 \quad 5.1$$

Όπου:

- $L_r$ : Η πραγματική διάσταση
- $L_{exp}$ : Η πειραματική διάσταση

Για τον καθορισμό των βασικών χαρακτηριστικών προσδιορίζονται τα βασικά μεγέθη μεταξύ των δύο μοντέλων για την σταθερή θερμοκρασία των 24ο C. Για σταθερή θερμοκρασία το κινηματικό και το δυναμικό ιξώδες του ρευστού δεν μεταβάλλονται και λαμβάνουν τις τιμές  $\mu=18.32 \cdot 10^{-6}$  και το κινηματικό ιξώδες είναι  $\nu=15.43 \cdot 10^{-6}$ . Με την γνώση των δύο αυτών μεγεθών μπορεί να προσδιορισθεί η πυκνότητα στην συγκεκριμένη θερμοκρασία. Ταυτόχρονα σε τυρβώδη πεδία ροής υπισέρχονται τα μεγέθη της τυρβώδους συνεκτικότητας ( $\mu_t$ ), και της

έντασης της τύρβης ( $I_u$ ). Τα μεγέθη με δείκτη Real αναφέρονται στα υπολογιστικά μοντέλα και τα μεγέθη με δείκτη Exp στα πειραματικά.

$$\rho = \frac{\mu}{\nu} = \frac{18.32 \cdot 10^{-6}}{15.43 \cdot 10^{-6}} = 1.187297$$

Στην συνέχεια για την επίτευξη της δυναμικής ομοιότητας ο αριθμός Reynolds μεταξύ του πειράματος και του αποτελέσματος που θα προκύψει από την υπολογιστική μέθοδο θα πρέπει να ταυτίζονται για να μπορεί να γίνει η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων. Ο αριθμός Reynolds δίνεται από τον τύπο:

$$Re = \frac{Q Dh}{\nu A} \quad 5.2$$

Όπου:

- Q η ογκομετρική παροχή
- Dh η υδραυλική διάμετρος
- $\nu$  το κινηματικό ιξώδες
- A το εμβαδόν της διατομής

Για την υδραυλική διάμετρο του αγωγού έχουμε το μήκος της εσωτερικής διατομής  $a=1.25m$  και το πλάτος της  $b=0.5m$  καθώς η ροή αναπτύσσεται στον κατακόρυφο άξονα Z.

$$Dh = \frac{4 A}{P} = \frac{2ab}{a + b} \quad 5.3$$

Όπου:

- A το εμβαδό της διατομής
- P η βρεχόμενη περίμετρος

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν για τις διαστάσεις και την αναλογία τους, η οποία είναι 1/5, δηλαδή το πραγματικό μοντέλο είναι πενταπλάσιο του πειραματικού ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις μεταξύ των υδραυλικών διαμέτρων και των εμβαδών. Τα μεγέθη με τον δείκτη exp αναφέρονται στο πειραματικό μοντέλο και τα μεγέθη με δείκτη real αναφέρονται στα μεγέθη του κώδικα.

$$\frac{Dh_{real}}{Dh_{exp}} = 5 \quad 5.4$$

$$\frac{A_{real}}{A_{exp}} = 25 \quad 5.5$$

Τα δύο αυτά μοντέλα πρέπει να έχουν γεωμετρική και δυναμική ομοιότητα.

Θα πρέπει, δηλαδή, να ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$Re_{exp} = Re_{real}$$

$$\frac{Q_{\text{exp}} Dh_{\text{exp}}}{\nu A_{\text{exp}}} = \frac{Q_{\text{real}} Dh_{\text{real}}}{\nu A_{\text{real}}}$$

$$Q_{\text{exp}} = \frac{1}{5} Q_{\text{real}} \quad 5.6$$

Ισχύει επίσης:

$$Q = u A \quad 5.7$$

Συνεπώς η 5.6 γίνεται:

$$U_{\text{exp}} A_{\text{exp}} = \frac{1}{5} U_{\text{real}} A_{\text{real}} \quad 5.8$$

$$U_{\text{exp}} = 5 U_{\text{real}} \quad 5.9$$

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση 4d η οποία μελετάται στην παρούσα κατάσταση λαμβάνουμε αριθμό  $Re=17231.862$  συνεπώς από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Re = \frac{Q Dh}{\nu A} \quad 5.10$$

$$Q = u A \quad 5.11$$

Προκύπτει η εξίσωση που μας δίνει την πειραματική ταχύτητα ροής η οποία είναι η εξής:

$$U = \frac{Re \nu}{Dh} \quad 5.12$$

$$U_{\text{exp}} = 1.8596 \text{m/s}$$

Σύμφωνα με την 5.9 προκύπτει ότι η μέση ταχύτητα στο ενδιάμεσο διάκενο στην προς μελέτη γεωμετρία θα είναι  $U_{\text{real}} = 0.3718 \text{m/s}$ . Στην συνέχεια για να υπολογισθεί η μέση ταχύτητα εισόδου της ροής θα εφαρμοσθεί η εξίσωση της συνέχειας. Η εξίσωση της συνέχειας εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας του ρευστού ανεξάρτητα από το άμα αυτό είναι συμπιεστό ή ασυμπιεστό και για οποιοδήποτε πεδίο ροής.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad 5.13$$

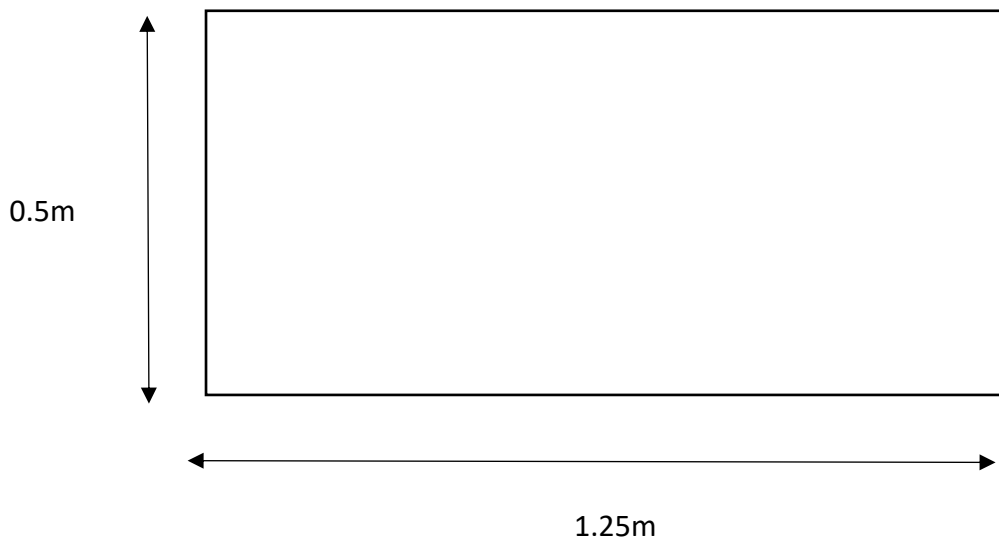
Στην περίπτωση όπου το πρόβλημα που μελετάμε δεν είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, ο πρώτος όρος της εξίσωσης είναι μηδενικός και επίσης, καθώς η πυκνότητα παραμένει σταθερή, η εξίσωση μπορεί να γραφεί απλούστερα στην μορφή:

$$u A = \text{const} \quad 5.14$$

Συνεπώς, εφαρμόζοντας την ανάμεσα στην διατομή του κατακόρυφου διακένου και του διακένου εισόδου με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα προκύπτει ότι:

$$U_{in} A_{in} = U_{real} A_{real} \quad 5.15$$

Η διατομή εισόδου φέρει διαστάσεις μήκους  $a=1.25m$  και ύψους  $b=0.7m$ , συνεπώς το εμβαδόν της διατομής εισόδου είναι  $A_{in} = 0.875m^2$ , το οποίο για τις γεωμετρίες στις οποίες δεν μεταβάλλεται το ύψος της οπής εισόδου και το μήκος της πρόσοψης παραμένει σταθερό. Για το κατακόρυφο διάκενο στο οποίο υπολογίστηκε η  $U_{real}$  θα παρουσιαστούν οι διαστάσεις του σε κάτοψη για λόγους ευκολίας και το εμβαδόν του στην περίπτωση αυτή είναι  $A_{real} = 0.625 m^2$ .



Συνεπώς, μέσω της 5.15 η μέση ταχύτητα εισόδου της ροής που μας ενδιαφέρει,  $U_{in} = 0.2656m/s$ .

Το υπολογιστικό μοντέλο τύρβης στο οποίο βασίστηκε ο κώδικας για την επίλυση του προβλήματος είναι το k-epsilon. Απαραίτητο για τον πλήρη ορισμό των αρχικών συνθηκών αποτελεί και ο καθορισμός των μεγεθών  $k$  και  $\epsilon$ . Για τον υπολογισμό τους είναι απαραίτητο να καθορισθεί και η ένταση της τύρβης,  $I_u$ , η οποία λαμβάνει την τιμή 10% καθώς επίσης και ο λόγος,  $\frac{\mu_t}{\mu} = 10$ . Οι εξισώσεις με τις οποίες προκύπτει το  $k$  και το  $\epsilon$  είναι οι παρακάτω:

$$k = \frac{3}{2} (I_u U_{in})^2 \quad \text{Εξίσωση 5.16}$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu \rho k^2}{\mu_t} = \frac{C_\mu \frac{\rho}{\mu} k^2}{\frac{\mu_t}{\mu}} = \frac{C_\mu k^2}{10 \nu} \quad \text{Εξίσωση 5.17}$$



Ο συντελεστής  $C_\mu$  είναι μία σταθερά και η τιμή η οποία λαμβάνει είναι 0.09. Με βάση τα προαναφερθέντα υπολογίζεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια  $k = 0.00105 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$  και  $\varepsilon = 0.006 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$ .

**Πίνακας 10: Ταχύτητα εισόδου, τυρβώδης κινητική ενέργεια, ρυθμός καταστροφής της τύρβης**

	$U_{in}(\frac{\text{m}}{\text{s}})$	$k(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2})$	$\varepsilon(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^3})$
1d	0.2766	0.001143	0.00076
2d	0.2665	0.001066	0.00066
4d	0.2656	0.001058	0.00065
7d	0.26980	0.001092	0.00069

Στα επόμενα υποκεφάλαια θα παρουσιαστούν για την κάθε γεωμετρία ξεχωριστά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του κώδικα και από την σύγκριση με την αντίστοιχη πειραματική διάταξη.

## 5.3 Υπολογιστικά αποτελέσματα

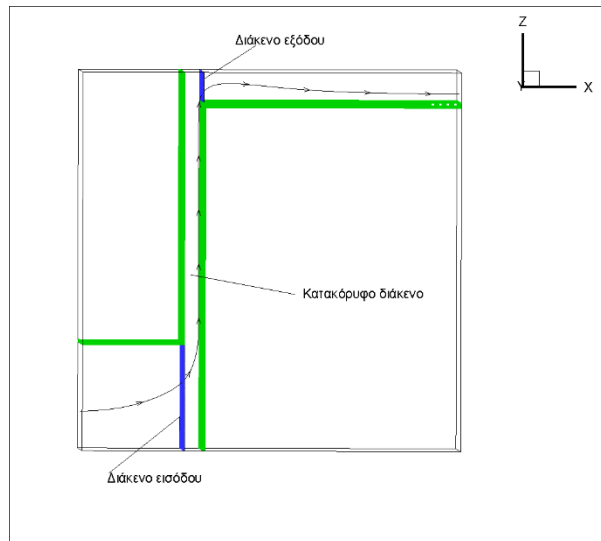
### 5.3.1 Γεωμετρία 1d

Η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται στην γεωμετρία του πειράματος 1d. Γνωρίζοντας λοιπόν τις διαστάσεις του πειράματος και την σταθερά αναλογίας μεταξύ της πειραματικής κατασκευής σε σχέση με το μοντέλο το οποίο θα επιλυθεί υπολογιστικά. Προκύπτουν λοιπόν οι διαστάσεις του προς ανάλυση μοντέλου οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 11: Διαστάσεις γεωμετρίας 1d**

ΧΤΟΤ	2.5m
ΥΤΟΤ	1.25m
ΖΤΟΤ	2.5m
Διάκενο εισόδου(ύψος κάτω διακένου)	0.7m
Ενδιάμεσο διάκενο (έκταση κατά τον Χ άξονα)	0.125m(εκτείνεται από την θέση Χ=0.675m έως την θέση Χ=0.8m)
Διάκενο εξόδου (ύψος άνω διακένου)	0.2m

Οι παραπάνω διαστάσεις παρουσιάζονται στην Εικ. 23 στην οποία φαίνεται συνάμα και η φορά της ροής με την βοήθεια ροϊκής γραμμής.



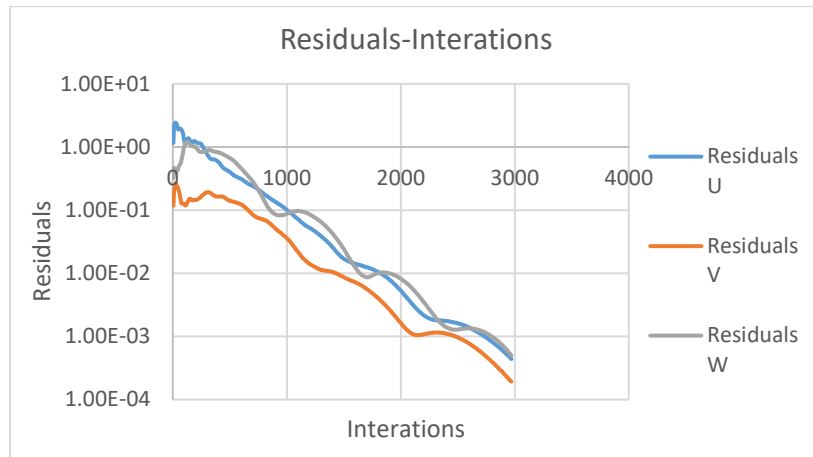
**Εικ. 23: Περιγραφή της γεωμετρίας**

Για τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών αρχικών συνθηκών ακολουθείται η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε και στην γεωμετρία 4d. Με την χρήση των εξισώσεων προηγούμενου κεφαλαίου υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη που καθορίζουν το προφίλ ταχύτητας εισόδου, ταχύτητα εισόδου [ $U_{in}$ ], τυρβώδης κινητική ενέργεια [ $k$ ] και καταστροφή της τύρβης [ $\epsilon$ ]. Το προφίλ είναι και στην περίπτωση αυτή ομοιόμορφο. Παρουσιάζονται και στον παρακάτω πίνακα οι τιμές οι οποίες υπολογίστηκαν για τα προαναφερθέντα μεγέθη.

**Πίνακας 12: Αρχικές τιμές προφίλ εισόδου**

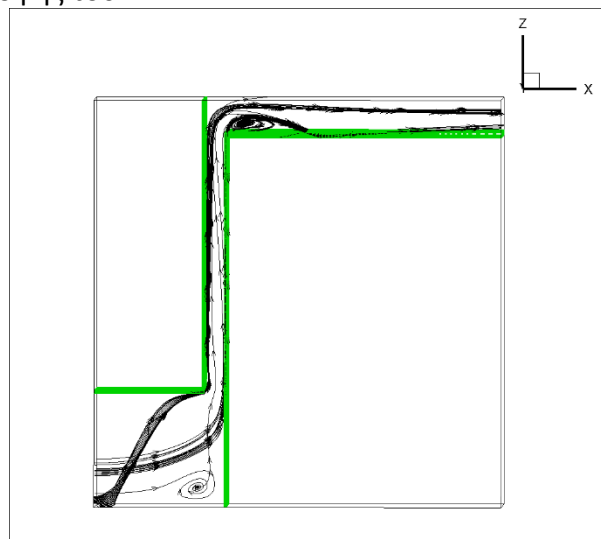
$U_{in}$ [ $m/s^2$ ]	0.276689694
$k$ [ $m^2/s^2$ ]	0.001148358
$\epsilon$ [ $m^2/s^3$ ]	0.000769185

Στα προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής απαραίτητη καθίσταται η σύγκλιση των εξισώσεων επίλυσης και για αυτό το λόγω θα παρουσιαστούν τα υπόλοιπα των συνιστωσών της ταχύτητας.



### Διάγραμμα 3: Υπόλοιπα εξισώσεων σε λογαριθμική κλίμακα

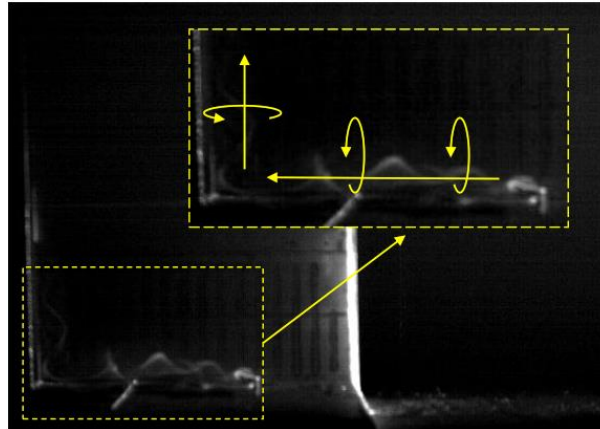
Για την επίτευξη της δυναμικής ομοιότητας ο αριθμός Reynolds είναι αναγκαίο να παραμένει ο ίδιος και στην προκειμένη περίπτωση  $Re = 22594.224$ . Σύμφωνα λοιπόν με τα προαναφερθέντα καθώς και με τις μεθοδολογίες που έχουν αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια ξεκινάει η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται αρχικά στην Εικ. 24 οι στρόβιλοι που αναπτύσσονται στην γεωμετρία 1d συνολικά και στην συνέχεια θα γίνει ανάλυση του καθενός ξεχωριστά. Οι κύριοι στρόβιλοι που θα μελετηθούν είναι αυτός ο οποίος δημιουργείται στην κάτω γωνία της γεωμετρίας και είναι οριζόντιος διαμήκης, οι κατακόρυφοι στρόβιλοι οι οποίοι δημιουργούνται παράλληλα στα πλαϊνά τοιχώματα και τέλος ένας οριζόντιος διαμήκης στρόβιλος ο οποίος παρατηρείται στην έξοδο της ροής από το κατακόρυφο διάκενο, στην γωνία δηλαδή η οποία σχηματίζεται από την εξωτερική τοιχοποιία του κτηρίου και της οροφής του.



Εικ. 24: Θέσεις στρόβιλων σε πλάγια όψη στην γεωμετρία.

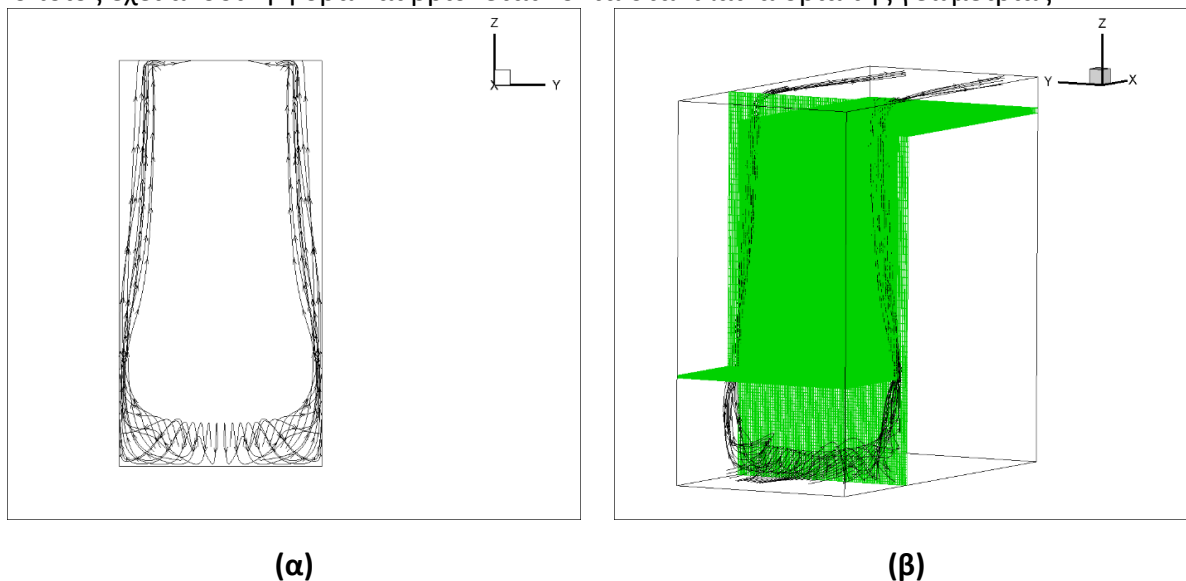
Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα σχηματίζονται στρόβιλοι στην περιοχή η οποία βρίσκεται στην κάτω και πίσω γωνία του μοντέλου, δηλαδή στην επιφάνεια του δαπέδου το

οποίο έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό τοίχωμα του κτηρίου. Αυτές οι δίνες που σχηματίζονται παρουσιάζονται και στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικ. 25 απεικονίζεται σε πρόσοψη ο στρόβιλος που σχηματίζεται κατά μήκος των δύο πλαϊνών τοιχωμάτων.



**Εικ. 25: Διαμήκης οριζόντιος στρόβιλος πειραματικού μοντέλου (16)**

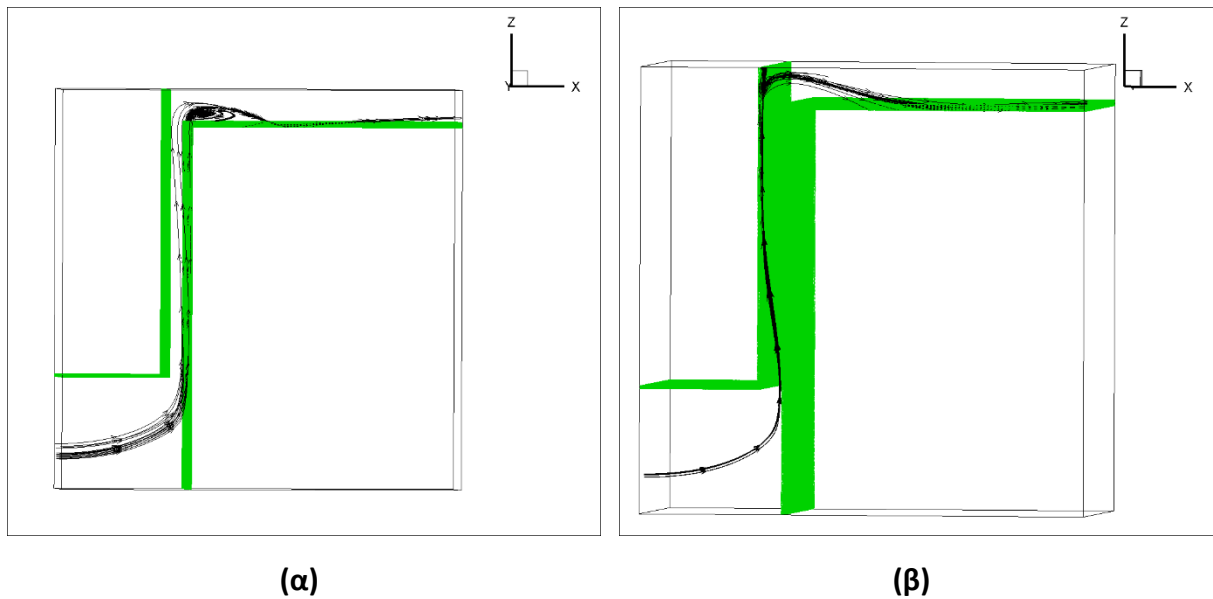
Τα συμπεράσματα που απορρέουν από την υπολογιστική ανάλυση όσο αφορά τις δίνες οι οποίες σχηματίζονται στο πεδίο ροής παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικ. 26α η ροή στροβιλίζεται στο πίσω μέρος του ενδιάμεσου διακένου και στην συνέχεια ακολουθεί ανοδική πορεία παράλληλη με τα πλάγια τοιχώματα. Στην Εικ. 26β απεικονίζεται ο στρόβιλος ο οποίος έχει ανοδική φορά και βρίσκεται κοντά στα πλαϊνά όρια της γεωμετρίας.



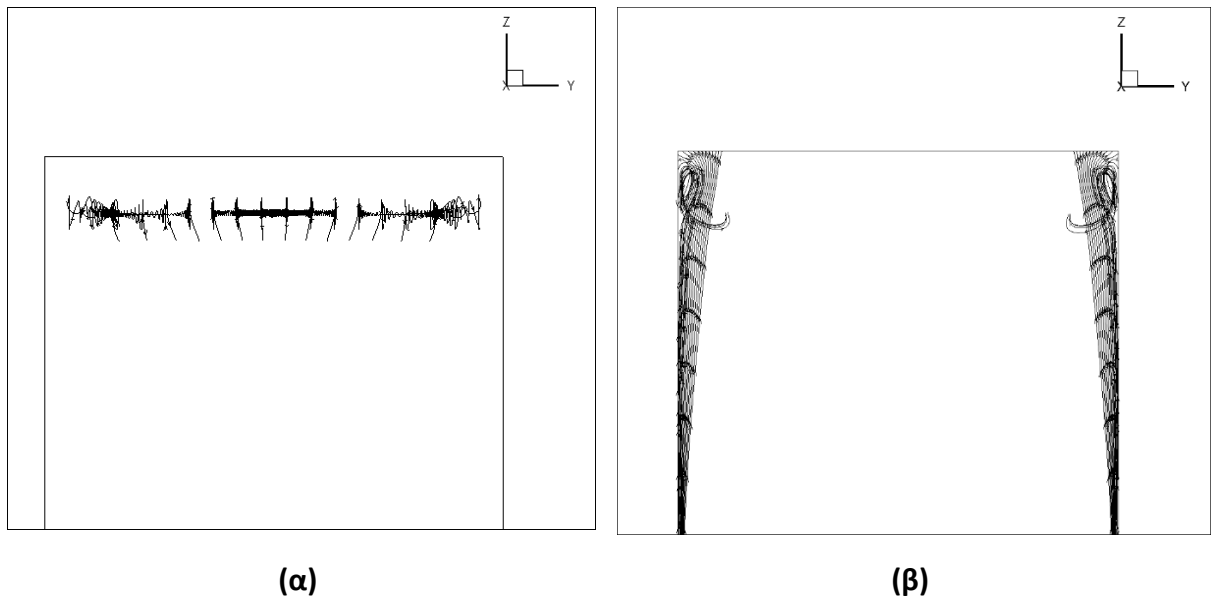
**Εικ. 26: Διαμήκης στρόβιλος στην πίσω γωνία, (α) σε πρόσοψη, (β) τρισδιάστατος**

Κατά την ανάλυση της γεωμετρίας 1d παρατηρήθηκαν και στρόβιλοι κατά την έξοδο της ροής από το κατακόρυφο διάκενο οι οποίοι σχηματίζονται στο άνω μέρος της γεωμετρίας μεταξύ της ανώτατης επιφάνειας του υπολογιστικού χωρίου και της επιφάνειας στην θέση  $Z=2.3\text{m}$ , η οποία αποτελεί το κάτω όριο του διακένου εξόδου. Οι δίνες αυτές που σχηματίζονται παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικ. 28 απεικονίζεται η γεωμετρία σε

τρισδιάστατη μορφή καθώς και οι στρόβιλοι οι οποίοι δημιουργούνται στην άνω περιοχή της γεωμετρίας και στην Εικ. 28 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι στρόβιλοι σε πρόσοψη.



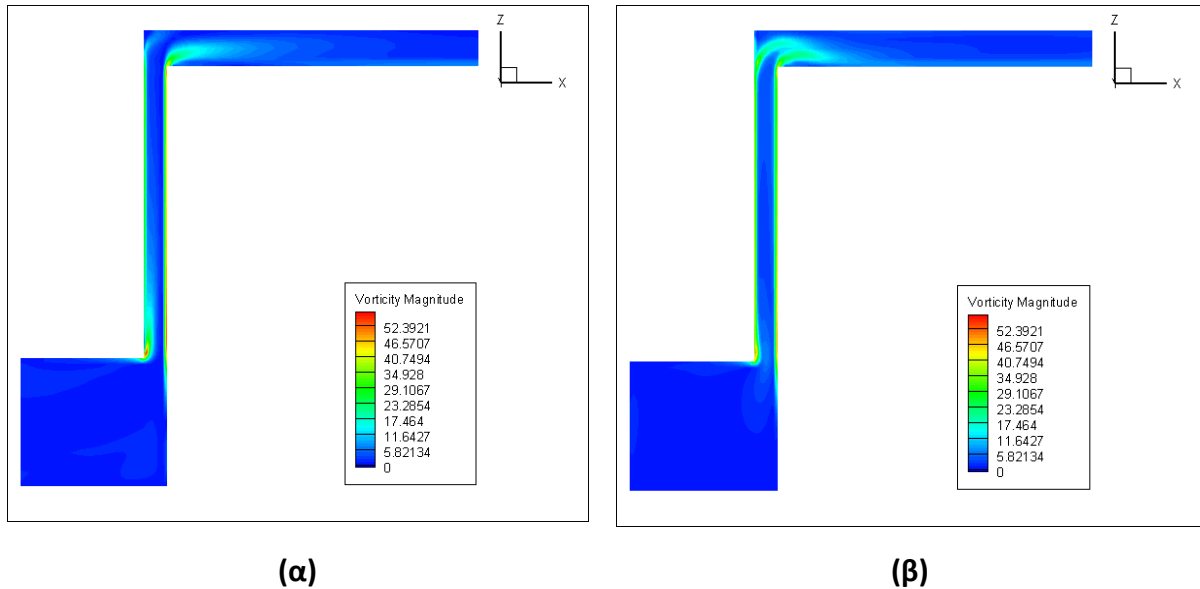
Εικ. 27: Τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας, (α) Διαμήκης οριζόντιος στρόβιλος στην έξοδο, (β) Στρόβιλος στην άνω γωνία



Εικ. 28: (α) Διαμήκης οριζόντιος στρόβιλος στην έξοδο, (β) Στρόβιλος στην άνω γωνία

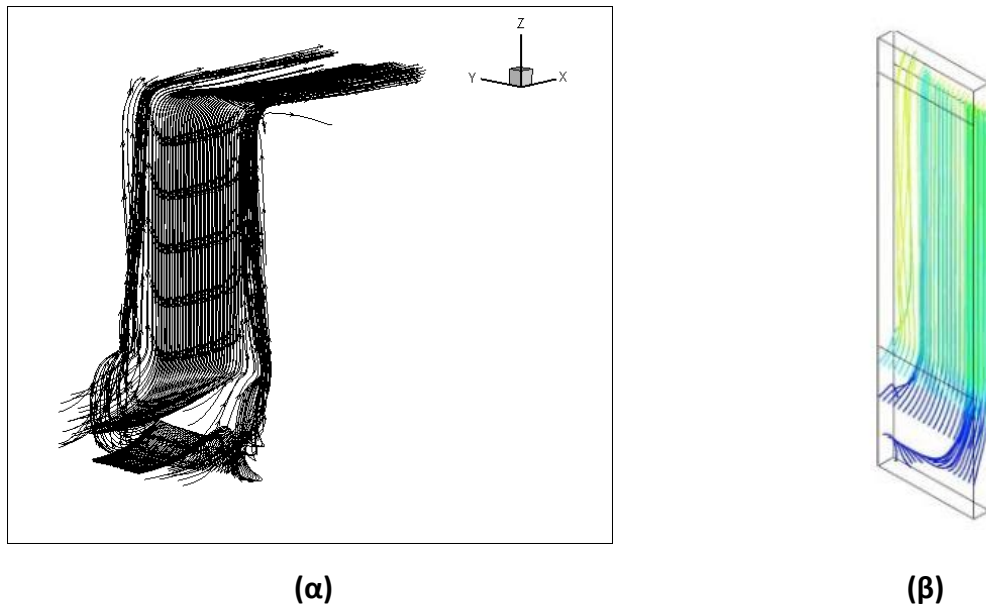
Επόμενο στάδιο της ανάλυσης αποτελεί η μελέτη του πεδίου της στροβιλότητας της ροής. Η διαδικασία αυτή θα διεκπεραιωθεί με την χρήση κατατομών σε κατάλληλες θέσεις του υπολογιστικού χωρίου στις οποίες θα παρουσιάζονται και οι δίνες οι οποίες σχηματίζονται

στην εκάστοτε περίπτωση. Ταυτόχρονα για καλύτερη αξιολόγηση καθίσταται αναγκαία η χρήση της κατάλληλης κλίμακας διακριτοποίησης των τιμών τις οποίες λαμβάνει το μέτρο της στροβιλότητας (vorticity magnitude). Στην Εικ. 29 παρουσιάζεται το μέτρο της στροβιλότητας της ροής στις θέσεις  $Y=Y_{max}$  (Εικ. 29α) και  $Y=Y_{max}/2$  (Εικ. 29β).



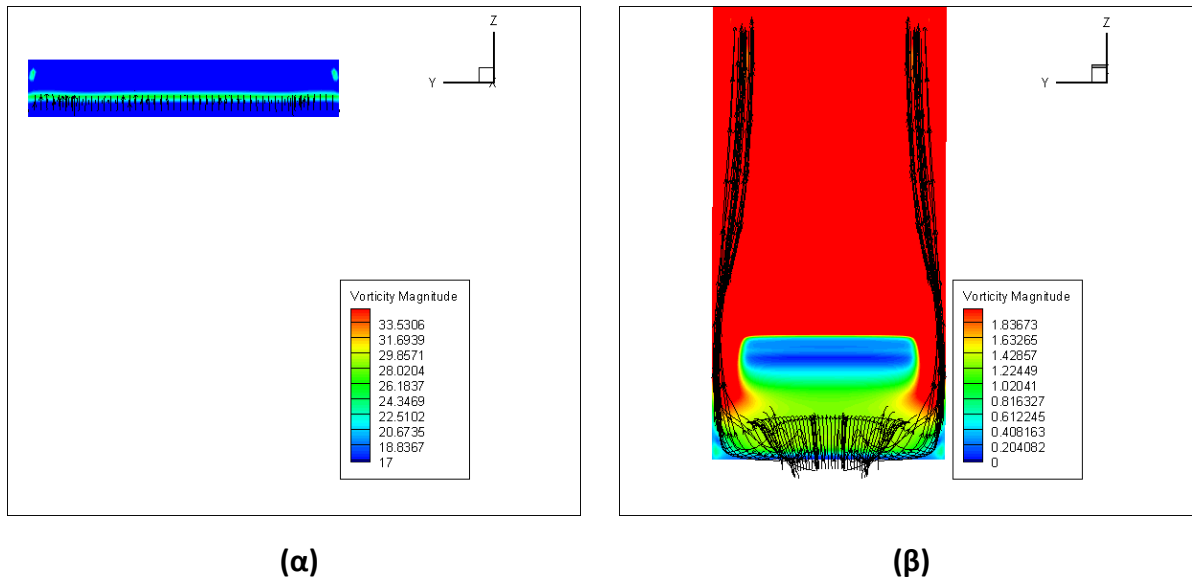
**Εικ. 29: Μέτρο στροβιλότητας [1/sec] (α) στο πλαϊνό τοίχωμα, (β) στον άξονα συμμετρίας**

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες παρατηρείται ότι το μέτρο της στροβιλότητας λαμβάνει τιμές από το 0-5 στο μεγαλύτερο μέρος του χωρίου, κάτι το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ροή είναι σχετικά ομοιόμορφη με μικρές αναταραχές όσο το πλάτος του κατακόρυφου διακένου ελαττώνεται. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και στην Εικ. 30 στην οποία παρουσιάζονται οι γραμμές ροής του πεδίου οι οποίες προέρχονται από την επίλυση του κώδικά (Εικ. 30α) και αυτές οι οποίες έχουν προκύπτουν από την ανάλυση του προβλήματος μέσω του προγράμματος Ansys CFX από την έρευνα των Ορδομπουζάνη Κωνσταντίνου, Μπούρη Δημήτριου, Θεοδοσίου Θεόδωρου (21) (Εικ. 30β).

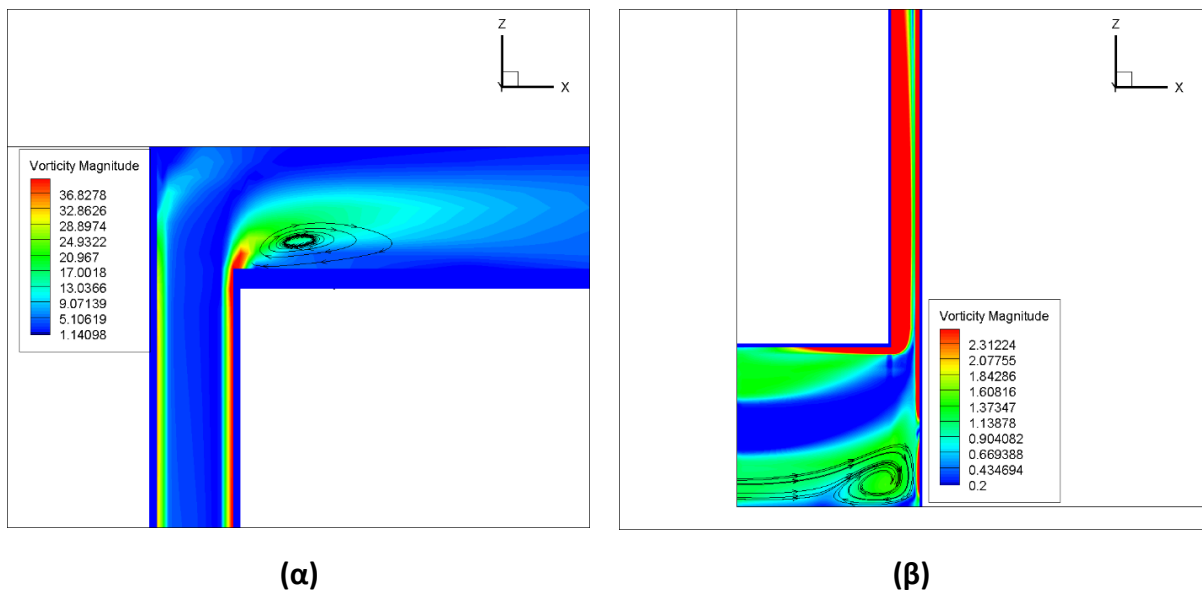


**Εικ. 30: Γραμμές ροής (α) από επίλυση κώδικά, (β) στο Ansys (21)**

Αξίζει ταυτόχρονα να παρουσιασθεί και το μέτρο της στροβιλότητας υπό κλίμακα στις περιοχές που παρουσιάζονται οι στρόβιλοι. Στην Εικ. 31β απεικονίζονται οι δίνες μαζί με την κατατομή της στροβιλότητας στο κάτω μέρος του χώρου, εκεί που σχηματίζεται η γωνία μεταξύ κτηρίου και δαπέδου, και στην Εικ. 31α ο στρόβιλος που δημιουργείται στην έξοδο από το άνω διάκενο μαζί με την αντίστοιχη κατανομή. Το μέτρο της στροβιλότητας λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε θέσεις στις οποίες αλλάζει ο προσανατολισμός της ροής και κοντά στα στερεά τοιχώματα καθώς αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις. Στην περίπτωση του άνω στρόβιλου το μέτρο της στροβιλότητας λαμβάνει περίπου την τιμή 20 ενώ στην περίπτωση της δίνης στην κάτω περιοχή του χώρου η τιμή αυτή αντιστοιχεί περίπου στο 1.2. Οι θέσεις στις οποίες παρουσιάζονται οι παρακάτω κατατομές του μέτρου της στροβιλότητας βρίσκονται εντός των στρόβιλων οι οποίοι αναπτύσσονται στην κάτω και στην άνω γωνία της γεωμετρίας, όπως φαίνεται και από την Εικ. 24.



Εικ. 31: Στρόβιλος και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] (α) στην άνω δίνη σε πρόσοψη, (β) στην κάτω δίνη σε πρόσοψη



Εικ. 32: Στρόβιλος και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] (α) στην άνω δίνη σε πλάγια όψη, (β) στην κάτω δίνη σε πλάγια όψη

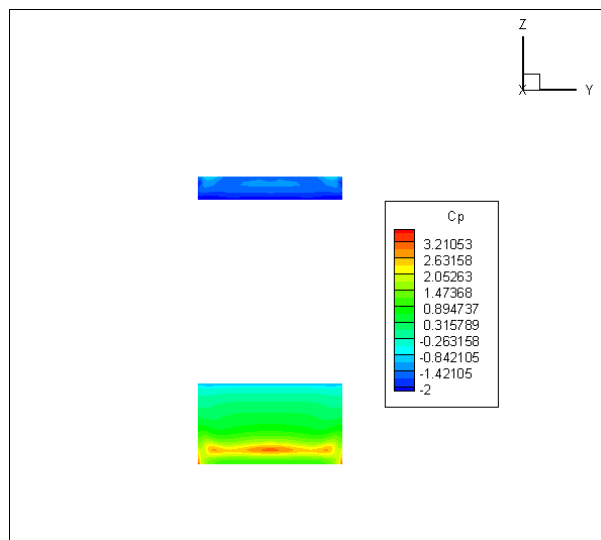
Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου από την δικέλυφη όψη. Στην περίπτωση αυτή διαφοροποιούνται οι τιμές οι οποίες λαμβάνει η μέση πίεση στην είσοδο και στην έξοδο του διακένου σε σχέση με αυτές οι οποίες υπολογίστηκαν  $P_{\text{mean,in}} = 0.3312$  και  $P_{\text{mean,out}} = -0.538002$  και η διαφορά πίεσης υπολογίζεται  $\Delta P = P_{\text{mean,out}} - P_{\text{mean,in}} = -0.867$ . Στην γεωμετρία η οποία έχει πλάτος



διακένου 0.25, περίπτωση 2d, η διαφορά πίεσης είναι κατ' απόλυτη τιμή  $\Delta P=0.3813$  η οποία είναι μικρότερη κατ' απόλυτη τιμή από την παρούσα περίπτωση. Το συμπέρασμα το οποίο εξάγεται είναι ότι όσο αυξάνει το πλάτος του διακένου η διαφορά πίεσης μειώνεται, κάτι το οποίο συνάδει και με τα αποτελέσματα του Ευάγγελου Τσιαπάλα (16). Στην συνέχεια εισάγεται το μέγεθος  $C_p$  το οποίο αποτελεί την αδιάστατη πίεση και υπολογίζεται με πίεση αναφοράς την πίεση εισόδου στην δικέλυφη όψη, άρα  $P_{ref} = P_{mean,in} = 0.3312$ . Η αδιάστατη αυτή πίεση υπολογίζονται στις διατομές εισόδου και εξόδου από το κατακόρυφο διάκενο, οι οποίες φαίνονται και στην Εικ. 43.

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{0.5 \rho U^2}$$

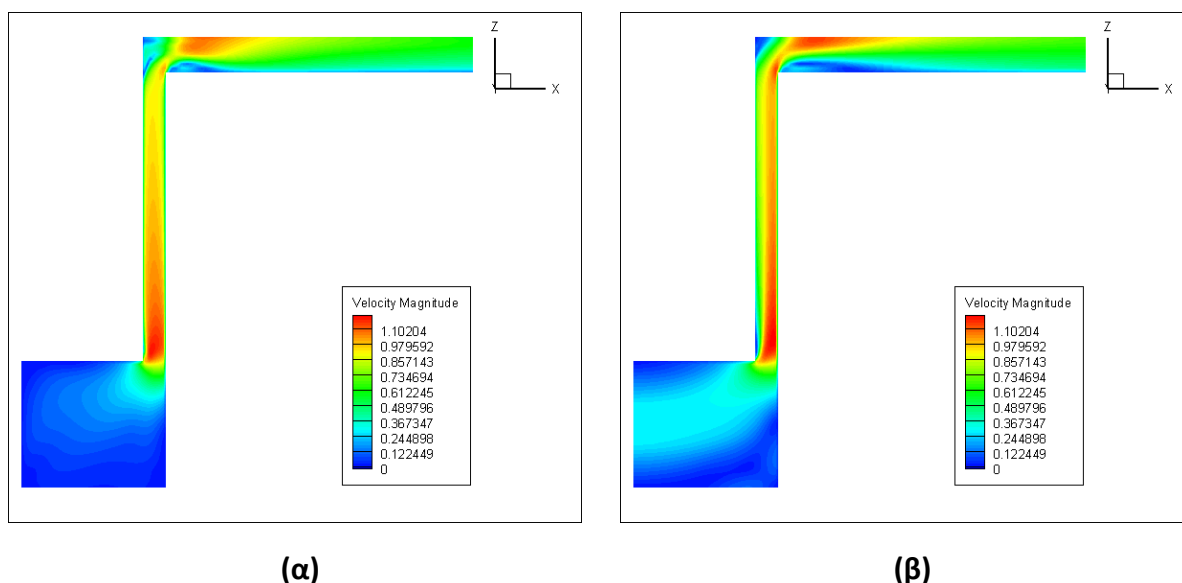
Η μέγιστη τιμή της αδιάστατης πίεσης λαμβάνεται στο διάκενο εισόδου της ροής και στην συνέχεια αυτή αρχίζει να ελαττώνεται και εν τέλει στο διάκενο εξόδου οι τιμές οι οποίες λαμβάνει είναι αρνητικές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στην Εικ. 33. Το εύρος τιμών της αδιάστατης πίεσης είναι  $[-2, 3.21]$  και είναι τιμές που κατ' απόλυτη τιμή είναι μεγαλύτερες από της γεωμετρίας 2d  $[-1.23, 1.57]$ . Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στην περίπτωση αυτή, στην οποία το διάκενο είναι το μικρότερο σε πλάτος η διαφορά της μέση πίεσης στις δύο αυτές διατομές είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη.



**Εικ. 33: Αδιάστατη πίεση στην είσοδο και στην έξοδο της δικέλυφη όψης.**

Τέλος θα γίνει αναφορά στο πεδίο της ταχύτητας. Ξεκινώντας την ανάλυση παρουσιάζονται οι κατατομές του μέτρου της ταχύτητας στο πλαϊνό τοίχωμα (Εικ. 34α) και στον άξονα συμμετρίας της γεωμετρίας (Εικ. 34β). Παρατηρούμε ότι η κατατομή του μέτρου της ταχύτητας όσο πλησιάζουμε προς τον άξονα συμμετρίας τείνει να γίνεται πιο ομοιόμορφη. Επίσης στην θέση  $Y=Y_{max}/2$  διαπιστώνεται ότι το μέγεθος αυτό μεγιστοποιείται σε περιοχές οι οποίες είναι μεγαλύτερες σε έκταση από ότι στα πλάγια τοιχώματα. Ταυτόχρονα η τιμή του μέτρου ταχύτητας στο χωρίο κοντά στην δικέλυφη όψη είναι μικρότερο από αυτό κοντά στο τοίχωμα του κτηρίου στην θέση του άξονα συμμετρίας.. Στην άνω γωνία παρατηρείται μείωση

του μέτρου κάτι το οποίο εμφανίζεται και στο κάτω όριο του διακένου εξόδου για όλες τις περιπτώσεις.



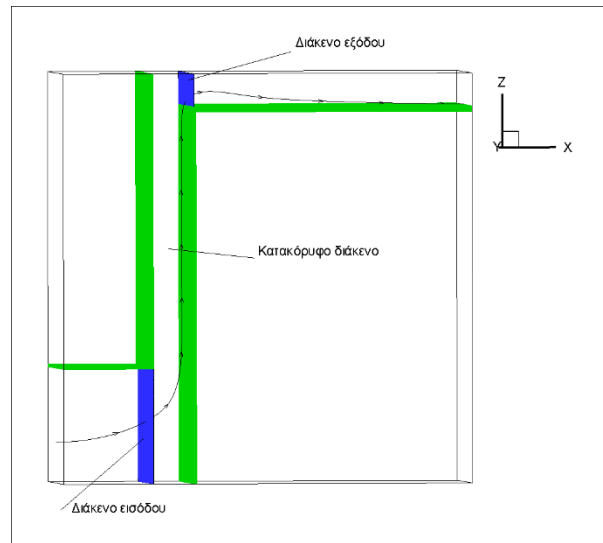
**Εικ. 34: Μέτρο ταχύτητας (α) σε πλάγια όψη στο πλαϊνό τοίχωμα, (β) σε πλάγια όψη στον άξονα συμμετρίας.**

### 5.3.2 Γεωμετρία 2d

Η γεωμετρία που θα αναλυθεί στην συνέχεια αποτελεί την δεύτερη κατά σειρά και η διαφορά της από την προηγούμενη έγκειται στο πλάτος του διακένου που βρίσκεται ανάμεσα στην δικέλυφη όψη του κτηρίου και της εξωτερικής τοιχοποιίας. Η ανάλυση στην περίπτωση αυτή γίνεται ξανά συγκρίνοντας το υπό κλίμακα πειραματικό μοντέλο και τα αποτελέσματα που εξάγονται από την υπολογιστική λύση. Η διαφορά μεταξύ των μοντέλων όπως προαναφέρθηκε είναι στο πλάτος του διακένου στο οποίο η ροή αναπτύσσεται κατακόρυφα. Στην παρούσα μελέτη έχει διάσταση 0.25m (πέντε φορές μεγαλύτερο από το πειραματικό) ενώ στην προηγούμενη μελέτη το πλάτος του διακένου ήταν 0.125m.

**Πίνακας 13: Διαστάσεις γεωμετρίας 2d**

ΧΤΟΤ	2.5m
ΥΤΟΤ	1.25m
ΖΤΟΤ	2.5m
Διάκενο εισόδου(ύψος κάτω διακένου)	0.7m
Ενδιάμεσο διάκενο (έκταση κατά τον Χ άξονα)	0.250m(εκτείνεται από την θέση Χ=0.550m έως την θέση Χ=0.8m)
Διάκενο εξόδου (ύψος άνω διακένου)	0.2m



**Εικ. 35: Περιγραφή της γεωμετρίας.**

Οι αρχικές συνθήκες στην περίπτωση αυτή υπολογίζονται με τον αντίστοιχο τρόπο με την προηγούμενη γεωμετρία. Αναφέρεται ξανά η μεθοδολογία για λόγους πληρότητας. Για να μπορέσει να γίνει σύγκριση μεταξύ μοντέλων υπό κλίμακα είναι απαραίτητη η γεωμετρική και δυναμική ομοιότητα μεταξύ των δύο περιπτώσεων, δηλαδή αναλογία διαστάσεων και ισότητα αριθμών Reynolds. Υπολογίζοντας έτσι την μέση ταχύτητα διακένου από τον τύπο:

$$U = \frac{Re \nu}{Dh}$$

Στην συνέχεια με την εξίσωση της συνέχειας υπολογίζουμε την ταχύτητα με την οποία εισέρχεται η ροή στον αγωγό και με βάση αυτή την ταχύτητα υπολογίζουμε την τυρβώδη κινητική ενέργεια ( $k$ ) και την καταστροφή της τύρβης ( $\epsilon$ ) από τους παρακάτω τύπους:

$$k = \frac{3}{2} (I_u U_{in})^2$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu \rho k^2}{\mu_t} = \frac{C_\mu \frac{\rho}{\mu} k^2}{\frac{\mu}{\mu_t}} = \frac{C_\mu k^2}{10 \nu}$$

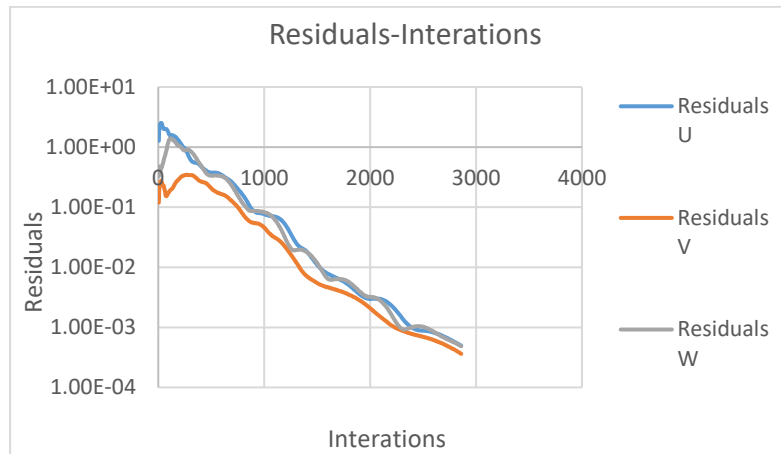
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τρία αυτά μεγέθη.

**Πίνακας 14: Αρχικές τιμές προφίλ ταχύτητας.**

$U_{in}$ [ $m/s^2$ ]	0.266582
$k$ [ $m^2/s^2$ ]	0.001066
$\epsilon$ [ $m^2/s^3$ ]	0.000663

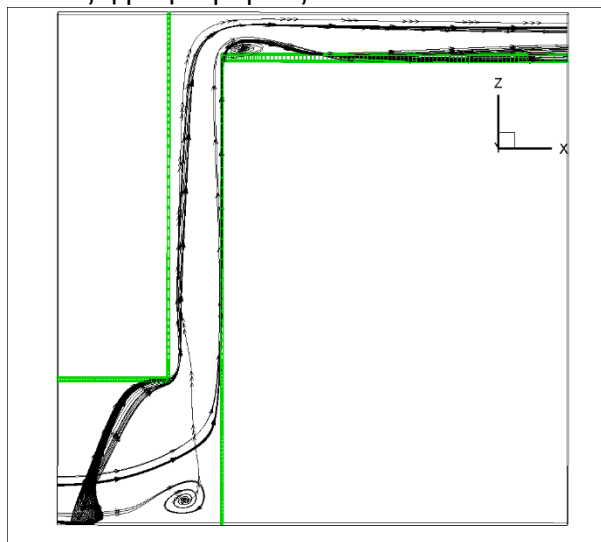
Κατόπιν θα γίνει ανάλυση της ροής ως προς τη στροβιλικότητα του πεδίου. Κατά τη διαδικασία αυτή θα παρουσιαστούν στρόβιλοι οι οποίοι παρατηρήθηκαν μέσω της πειραματικής

διάταξης και ταυτόχρονα αυτοί που σχηματίζονται με την υπολογιστική επίλυση. Επίσης για καλύτερη εποπτεία του προβλήματος θα αναλυθούν και βασικά μεγέθη της ροής όπως στροβιλότητα, μέτρο ταχύτητας, διαφορά πίεσης. Ξεκινώντας την ανάλυση βασική μέριμνα για την περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αποτελεί η σύγκλιση των εξισώσεων με τις οποίες ο κώδικας υπολογίζει τα φυσικά μεγέθη. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα υπόλοιπα των εξισώσεων σε λογαριθμική κλίμακα και παρατηρούμε ότι η σύγκλιση είναι ικανοποιητική.



**Διάγραμμα 4: Υπόλοιπα εξισώσεων σε λογαριθμική κλίμακα**

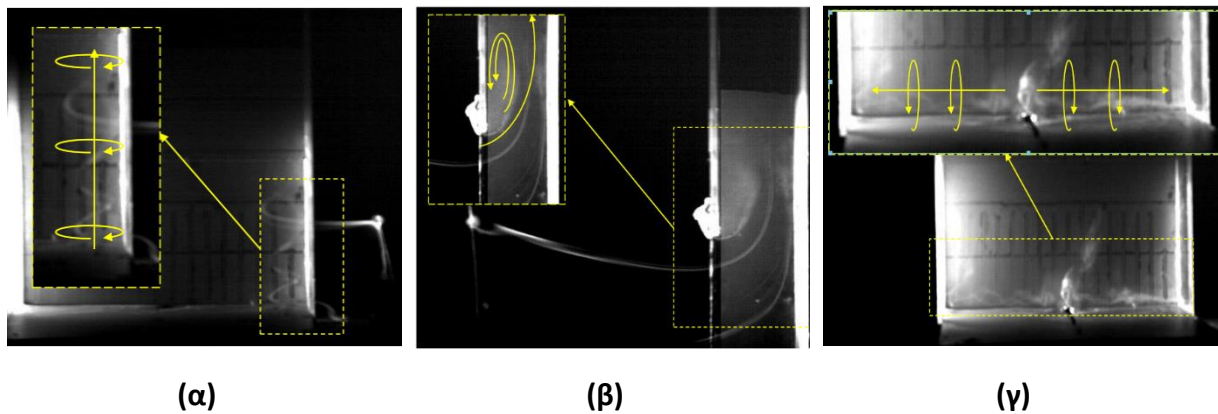
Όπως και στην γεωμετρία πλάτους διακένου 0.125m, 1d, έτσι και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται συνολικά η γεωμετρία με τα διάκενα εισόδου και εξόδου καθώς και οι αντίστοιχες θέσεις στις οποίες η ροή στροβιλίζεται.



**Εικ. 36: Θέσεις στροβίλων στην γεωμετρία σε πλάγια όψη.**

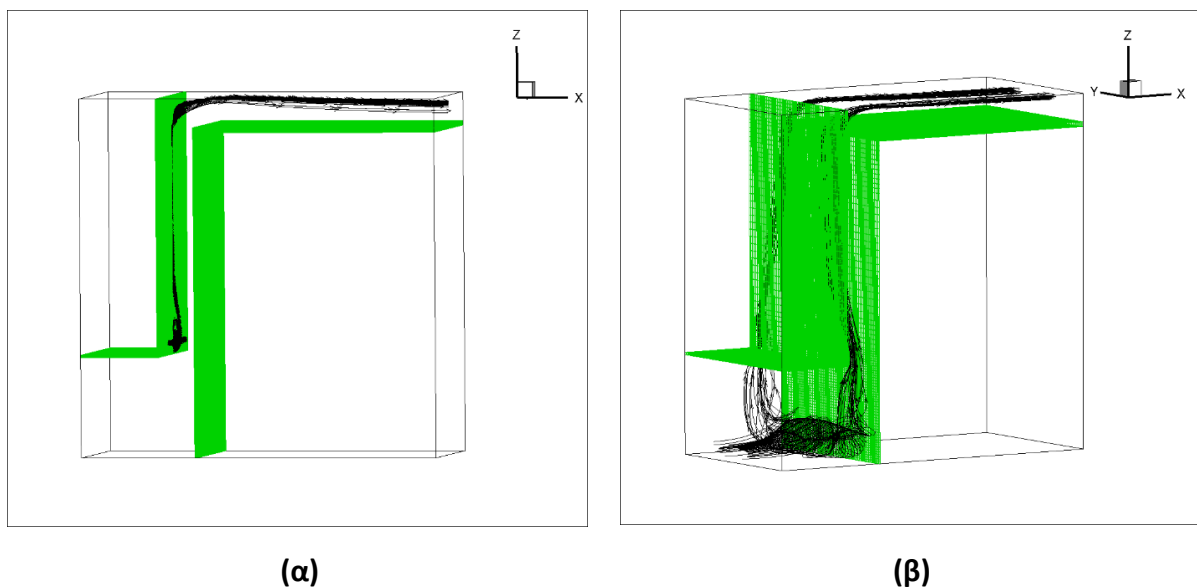
Επόμενο βήμα στην ανάλυση αποτελεί η παρουσίαση των στροβίλων που δημιουργούνται στο πεδίο ροής. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα στρόβιλοι δημιουργούνται με ανοδική κατεύθυνση στο εσωτερικό των πλάγιων τοιχωμάτων, όπως φαίνεται και στην Εικ. 37α, στο χωρίο πάνω από το διάκενο εισόδου της ροής στην δικέλυφη όψη (Εικ. 37β) και τέλος

στο πίσω μέρος του δαπέδου εκτείνεται ένας στρόβιλος από την μία άκρη των πλαϊνών τοιχωμάτων έως την άλλη (Εικ. 37γ).

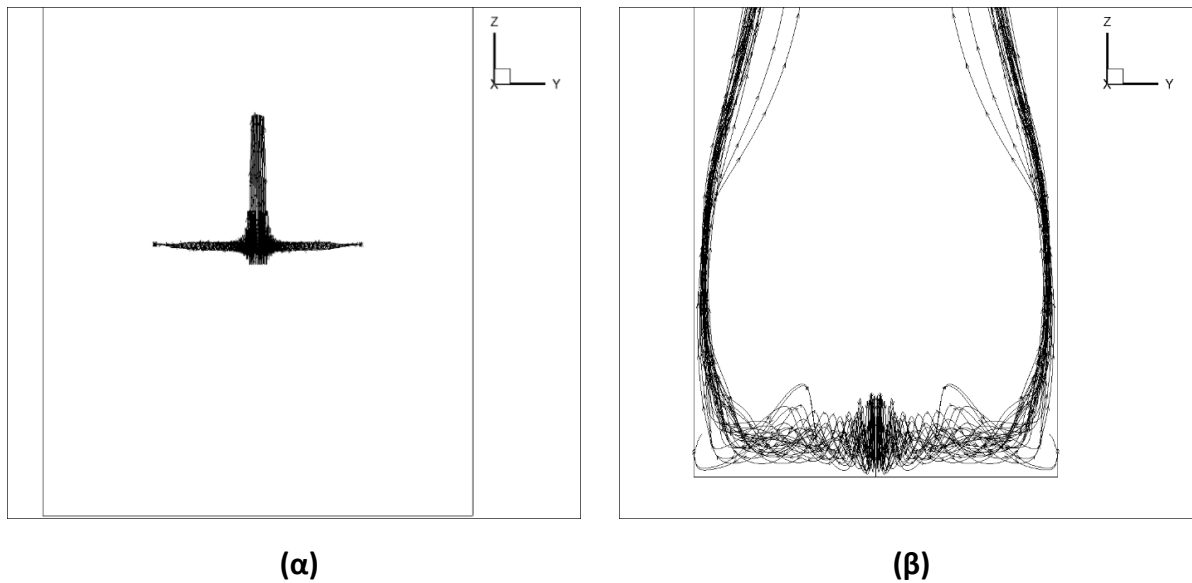


**Εικ. 37: Στρόβιλοι κατακόρυφου διακένου παρατηρούμενοι από πειραματική ανάλυση (16): (α) πλαϊνών τοιχωμάτων, (β) εισόδου της ροής, (γ) πίσω τοιχωμάτων**

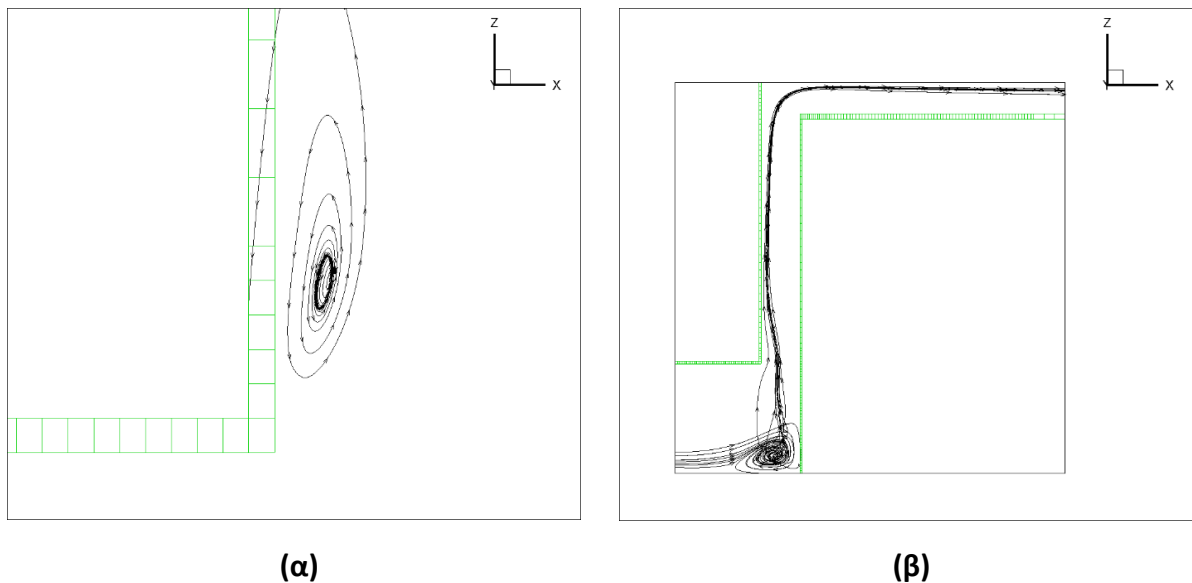
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υπολογιστική διαδικασία όσον αφορά στους στρόβιλους που αναπτύσσονται στο πεδίο ροής που μελετάμε θα παρουσιαστούν με την χρήση των διανυσμάτων της ταχύτητας και των γραμμών ροής. Στην Εικ. 38 παρουσιάζονται οι στρόβιλοι άνω του διακένου εισόδου και στην πίσω γωνία της γεωμετρίας σε τριδιάστατη απεικόνιση. Σύμφωνα με την Εικ. 39α παρατηρούμε ότι καθώς η ροή εισέρχεται στο κατακόρυφο τμήμα του αγωγού υπόκειται στην δημιουργία στρόβιλου ο οποίος βρίσκεται ακριβώς πάνω από το διάκενο εισόδου, ύψους 0.7m. Στην Εικ. 39β παρατηρείται ο στρόβιλος που εκτείνεται στο πίσω μέρος της δικέλυφης όψης και εκτείνεται σε όλο το μήκος της.



**Εικ. 38 Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη παραγόμενοι από υπολογιστική διαδικασία σε τριδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας: (α) Στρόβιλος στην είσοδο της ροής πάνω από το διάκενο εισόδου, (β) Στρόβιλος στην πίσω γωνία**



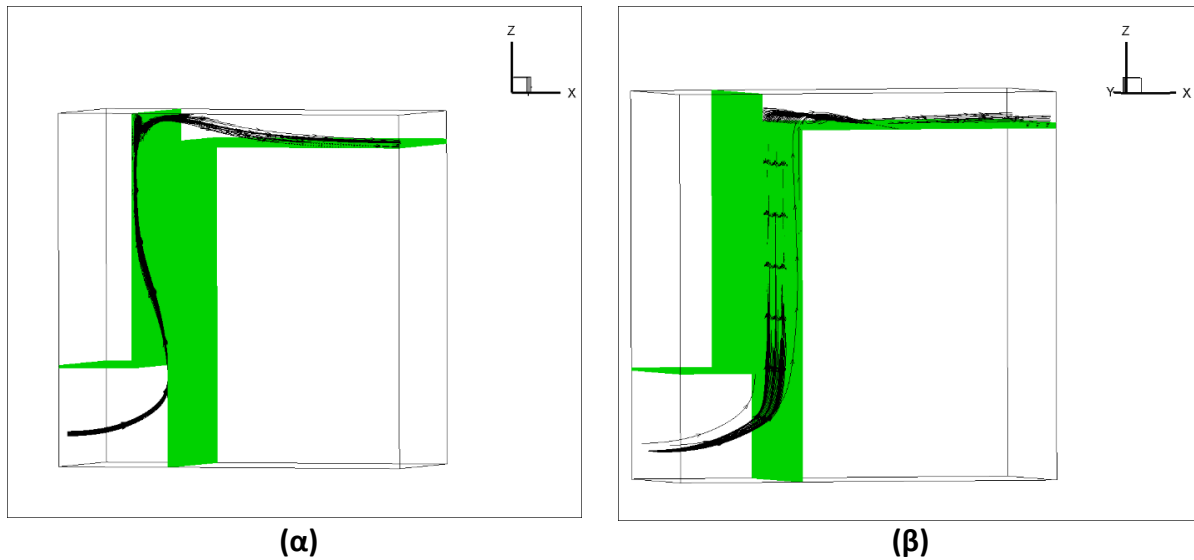
**Εικ. 39** Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη παραγόμενοι από υπολογιστική διαδικασία σε πρόσοψη: (α) Στρόβιλος στην είσοδο της ροής πάνω από το διάκενο εισόδου, (β) Στρόβιλος στην πίσω γωνία



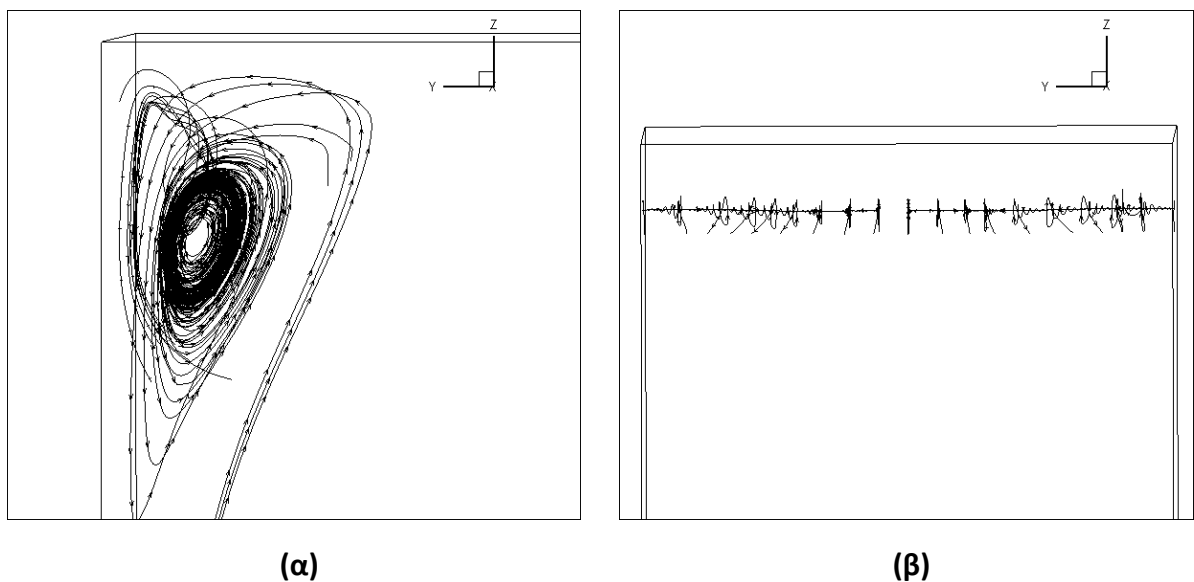
**Εικ. 40** Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη παραγόμενοι από υπολογιστική διαδικασία σε πλάγια όψη: (α) Στρόβιλος στην είσοδο της ροής πάνω από το διάκενο εισόδου, (β) Στρόβιλος στην πίσω γωνία

Για το άνω μέρος της προς μελέτη γεωμετρίας, δηλαδή για την περιοχή στην οποία η ροή εξέρχεται από το κατακόρυφο διάκενο και συνεχίζει να κινείται με την φορά με την οποία είχε εισέλθει αρχικά στον αγωγό σχηματίζονται στρόβιλοι τόσο κατά την έξοδό της από αυτό όσο και στην γωνία μεταξύ της δικέλυφης όψης και του άνω ορίου του υπολογιστικού χωρίου. Στην

παρακάτω εικόνα παρατίθενται οι στρόβιλοι αυτοί. Στην Εικ. 42α απεικονίζεται ο στρόβιλος ο οποίος αναπτύσσεται κατά τη φορά της ροής, δηλαδή κατά τον άξονα X ενώ στην Εικ. 42β φαίνονται μικρότεροι στρόβιλοι οι οποίοι αναπτύσσονται κατά μήκος της διατομής. Θα παρουσιαστούν και οι εικόνες φσκδ στις οποίες φαίνονται η γεωμετρία σε τρισδιάστατη μορφή και οι εν λόγω στρόβιλοι.



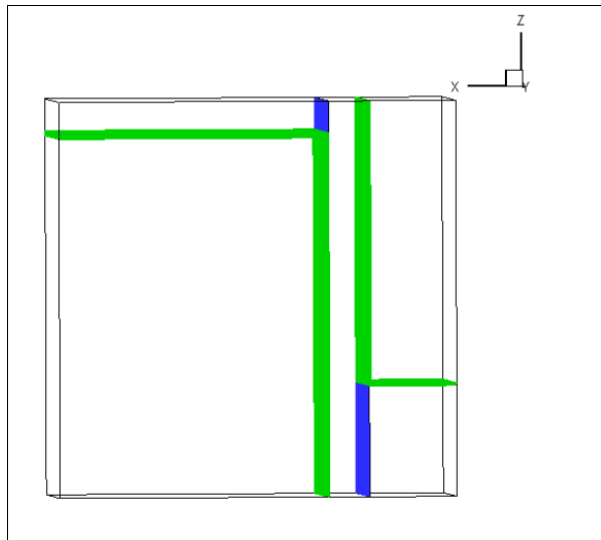
**Εικ. 41** Θέσεις στροβίλων σε τρισδιάστατη απεικόνιση: (α) Στρόβιλος στην γωνία , (β) Διαμήκης στρόβιλοι άνω διακένου



**Εικ. 42** Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη στο άνω μέρος: (α) Στρόβιλος στην γωνία , (β) Διαμήκης στρόβιλοι άνω διακένου

Μετά την μελέτη των στροβίλων οι οποίοι σχηματίζονται καθίσταται απαραίτητος ο υπολογισμός και η απεικόνιση βασικών μεγεθών του πεδίου ροής. Υπολογίζεται αρχικά η

πτώση της πίεσης στο κατακόρυφο διάκενο και οι διατομές αυτές φαίνονται στην παρακάτω στην Εικ. 43, όπου με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα στερεά τοιχώματα και με μπλε η είσοδος και η έξοδος από το διάκενο. Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης υπολογίζεται αρχικά η μέση πίεση σε κάθε διατομή. Για την διατομή εισόδου έχουμε  $P_{\text{mean,in}} = 0.1075378$  και για την διατομή εξόδου  $P_{\text{mean,out}} = -0.2737798$  άρα  $\Delta P = P_{\text{mean,out}} - P_{\text{mean,in}} = -0.3813078$



**Εικ. 43: Διατομές εισόδου και εξόδου από το διάκενο**

Στην συνέχεια αδιαστατοποιείται η πίεση στις παραπάνω διατομές. Η αδιάστατη πίεση  $C_p$  δίνεται από τον τύπο:

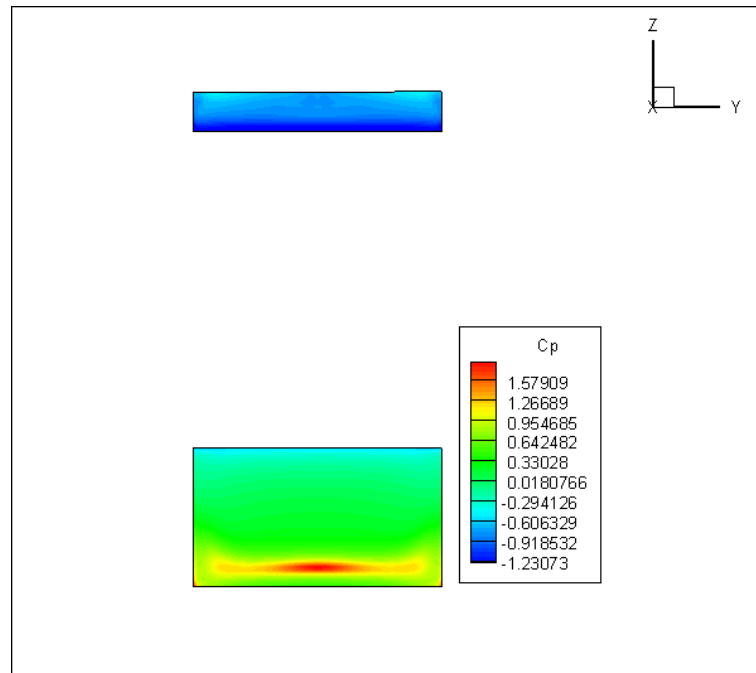
$$C_p = \frac{P - P_{\text{ref}}}{0.5 \rho U^2}$$

Όπου:

- $P$  η πίεση
- $P_{\text{ref}}$  η πίεση αναφοράς, εν προκειμένου θεωρείται η μέση πίεση εισόδου  $P_{\text{mean,in}}$
- $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού
- $U$  το μέτρο της ταχύτητας,  $U^2 = U_x^2 + U_y^2 + U_z^2$

Στην Εικ. 44 παρουσιάζονται οι κατατομές της αδιάστατης πίεσης ( $C_p$ ) στο διάκενο εισόδου και στο διάκενο εξόδου της ροής. Η μέγιστη τιμή της παρατηρείται στο κάτω μέρος του διακένου εισόδου και στο άνω διάκενο η πίεση λαμβάνει αρνητικές τιμές και ελαχιστοποιείται στο κάτω άκρο του διακένου εξόδου. Σημειώνεται επίσης πως στο κάτω διάκενο η αδιάστατη πίεση είναι κοντά στην τιμή μηδέν στο χωρίο πάνω από την περιοχή που έχει την μέγιστη τιμή της και κατόπιν αρχίζει να γίνεται αρνητική στο άνω άκρο του διακένου εισόδου.



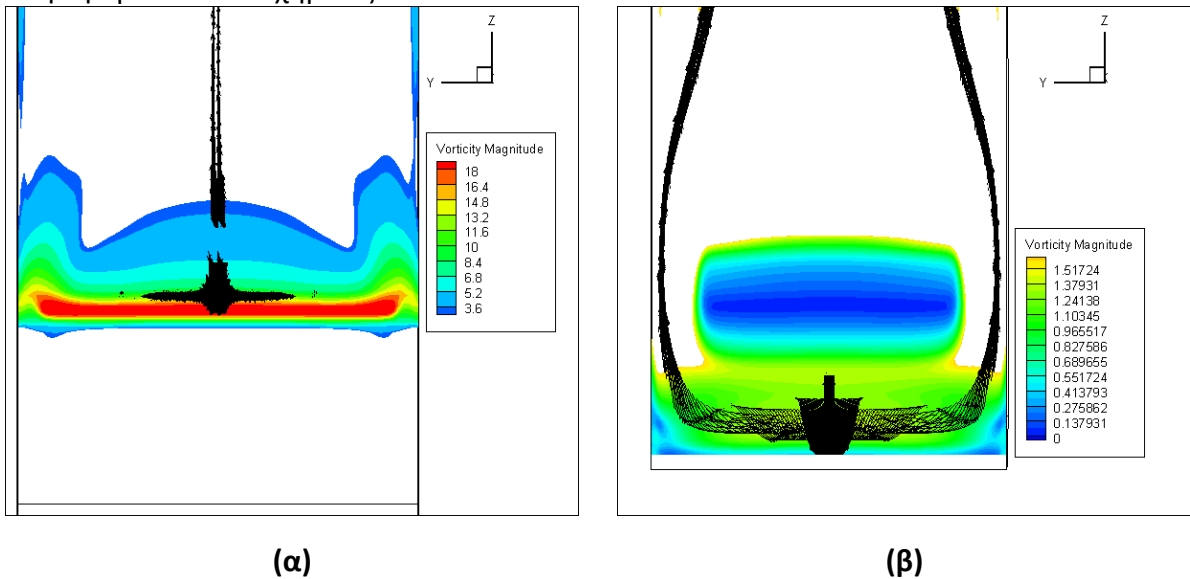


**Εικ. 44: Αδιάστατη πίεση στα διάκενα εισόδου και εξόδου.**

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητο να εμπεριέχει και το πεδίο στροβιλότητας της ροής. Με την χρήση κατατομών μας παρέχεται η δυνατότητα ταυτοποίησης των στροβίλων που αναφέρθηκαν στις παραπάνω εικόνες. Αναμένεται υψηλή στροβιλότητα σε περιοχές του πεδίου ροής στα οποία αναπτύσσονται δίνες και σε περιοχές στα οποία η ροή ακολουθεί μία ομοιόμορφη πορεία η στροβιλότητα δεν θα παρουσιάζει μεταβολές στο μέτρο της σε μεγάλο βαθμό. Υψηλή τιμή της στροβιλότητας αναμένουμε και κοντά στα στερεά όρια του υπολογιστικού χωρίου.

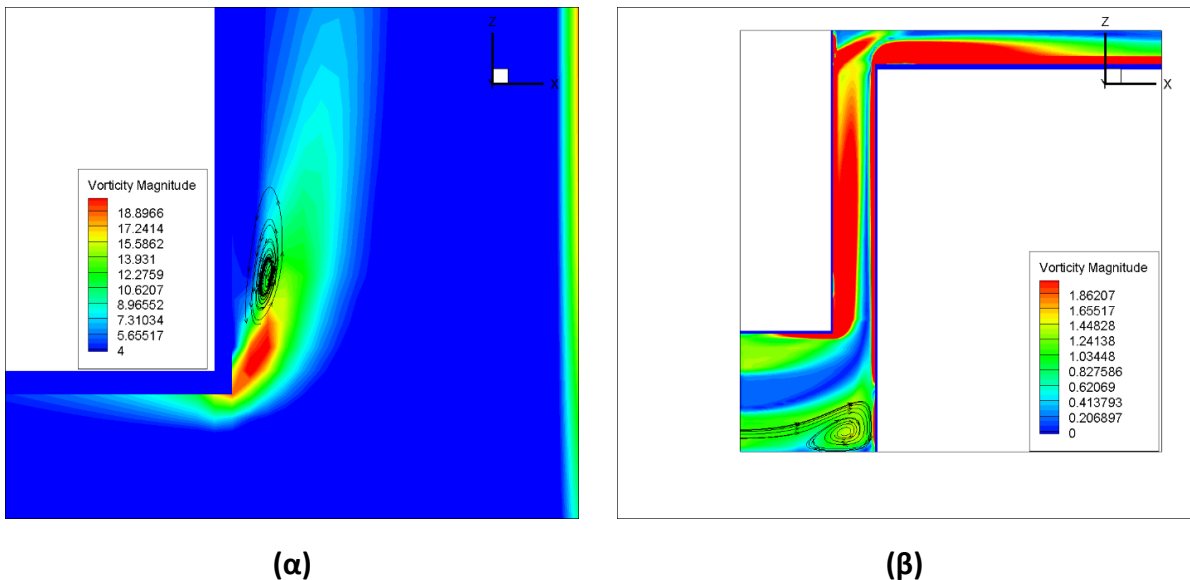
Η ανάλυση ξεκινάει με την περίπτωση των στροβίλων οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικ. 39. Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη παραγόμενοι από υπολογιστική διαδικασία σε πρόσοψη: (α) Στρόβιλος στην είσοδο της ροής πάνω από το διάκενο εισόδου, (β) Στρόβιλος στην πίσω γωνία. Για τους δύο στροβίλους που σχηματίζονται χρησιμοποιείται διαφορετική κλίμακα του μέτρου στροβιλότητας με σκοπό να αποτυπώνονται με καλύτερη ευκρίνεια και οι γραμμές ροής του πεδίου αλλά και για το λόγο ότι στις δύο αυτές θέσεις το μέτρο της έχει διαφορετική τιμή. Στην περίπτωση του στροβίλου στο άνω διάκενο λόγω αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής εξαιτίας της γωνίας που δημιουργείται από την γεωμετρία η στροβιλότητα θα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της δίνης η οποία σχηματίζεται στο πίσω μέρος της δικέλυφης όψης. Όπως παρατηρούμε και στην Εικ. 45 σύμφωνα με την βοήθεια της κλίμακας η οποία χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση της στροβιλότητας του πεδίου ροής γύρω από το άνω διάκενο αυτή λαμβάνει τιμή κοντά στο δέκα, Εικ. 45α, ενώ στην δεύτερη περίπτωση Εικ. 45β, η κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε λαμβάνει τιμές από το μηδέν έως το 1.8. Και οι δύο εικόνες απεικονίζουν το προφίλ της ροής σε πρόσοψη και γίνεται χρήση και των γραμμών ροής για καλύτερη αξιολόγηση και πληρότητα των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα και με τις εικόνες που παρουσιάζουν το μέτρο της στροβιλότητας για την περίπτωση 1d Εικ. 31β η τιμή η οποία λαμβάνει στον κάτω οριζόντιο στρόβιλο είναι παρεμφερής με την νέα υπολογισθείσα. Στο χωρίο το οποίο βρίσκεται άνω του διακένου εισόδου της ροής στον κλωβό το μέτρο της

στροβιλότητας είναι αυξημένο καθώς υφίσταται αλλαγή του προσανατολισμού της ροής με βάση την γωνία που σχηματίζεται.



**Εικ. 45: (α) Στρόβιλος διακένου εισόδου σε πρόσοψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (β) Στρόβιλος πίσω γωνίας σε πρόσοψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec]**

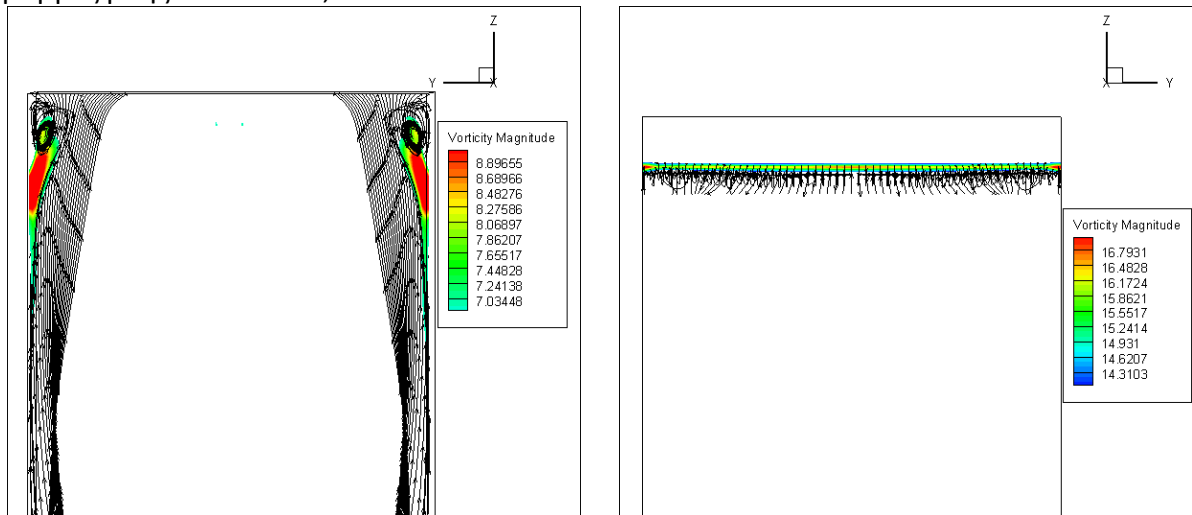
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι ίδιοι στρόβιλοι μαζί με το μέτρο της στροβιλότητας σε πλάγια όψη κάνοντας τομή στον άξονα συμμετρίας της ροής.



**Εικ. 46: (α) Στρόβιλος διακένου εισόδου σε πλάγια όψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (β) Στρόβιλος πίσω γωνίας σε πλάγια όψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec]**

Προχωρώντας στους στρόβιλους οι οποίοι σχηματίζονται στο διάκενο εξόδου της ροής παρατηρούμε πάλι διαφορά στο μέτρο της στροβιλότητας στην εκάστοτε περίπτωση. Απεικονίζονται και στην περίπτωση αυτή οι δίνες που δημιουργούνται σε πρόσοψη και

χρησιμοποιείται και η κατάλληλη κλίμακα του μέτρου της στροβιλότητας της ροής για τις δύο περιπτώσεις. Το συμπέρασμα που προέκυψε ως προς την τιμή του μέτρου της στροβιλότητας, ότι λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές όταν η ροή αλλάζει κατεύθυνση, επιβεβαιώνεται καθώς στην περίπτωση του στρόβιλου που δημιουργείται πριν την γωνία εξόδου είναι χαμηλότερο σε σχέση με αυτό που παρατηρείται στην περίπτωση που η ροή από το κατακόρυφο διάκενο αλλάζει κατεύθυνση και συνεχίζει να κινείται οριζόντια, 7,5 και 15 αντίστοιχα . Η απεικόνιση του μεγέθους της στροβιλότητας θα γίνει ξανά με την χρήση κατατομών σε συνδυασμό με τις γραμμές ροής του πεδίου, Εικ. 47.

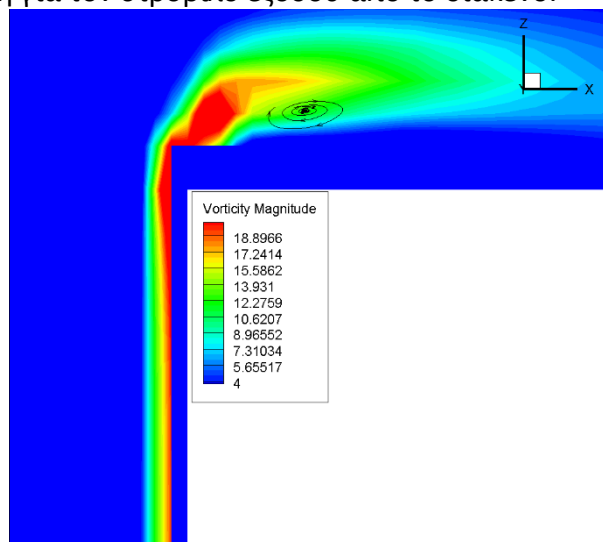


(α)

(β)

**Εικ. 47: (α) Στρόβιλος στην γωνία πριν το διάκενο εξόδου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (β) στρόβιλος μετά το διάκενο εξόδου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec]**

Στην τελευταία εικόνα παρουσιάζεται το μέτρο της στροβιλότητας σε συνδυασμό με τις ροϊκές γραμμές σε πλάγια όψη για τον στρόβιλο εξόδου από το διάκενο.



**Εικ. 48: Πλάγια όψη στρόβιλου εξόδου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec]**

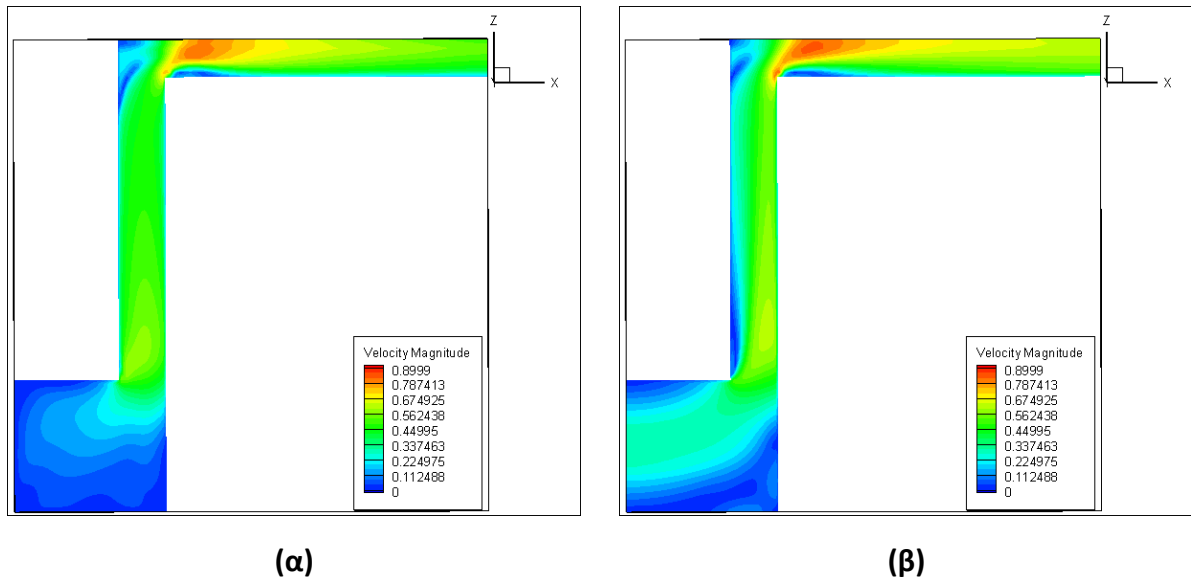
Για την ανάλυση της ροής γίνεται περαιτέρω σχολιασμός για το μέτρο της ταχύτητας (velocity magnitude). Το μέτρο της ταχύτητας δεν υπολογίζεται απευθείας από την επίλυση του κώδικα και υπολογίζεται μέσω του Tec plot. Το μέτρο της ταχύτητας δίνεται από τον τύπο:

$$U^2 = U_x^2 + U_y^2 + U_z^2$$

Όπου:

- $U_x$  η συνιστώσα της ταχύτητας στο X άξονα
- $U_y$  η συνιστώσα της ταχύτητας στο Y άξονα
- $U_z$  η συνιστώσα της ταχύτητας στο Z άξονα

Η ροή εισέρχεται στον αγωγό από την X κατεύθυνση, αναπτύσσεται οριζόντια μέχρι την είσοδο της στο κατακόρυφο διάκενο και τέλος κατά την έξοδο της από αυτό επανέρχεται στην κίνησή της με τη φορά του άξονα X όπως παρουσιάζεται και στην Εικ. 43: Διατομές εισόδου και εξόδου από το διάκενο. Στην Εικ. 49: (α) μέτρο ταχύτητας στο πλαϊνό τοίχωμα, (β) ) μέτρο ταχύτητας στον άξονα συμμετρίας, παρουσιάζεται το μέτρο της ταχύτητας σε δύο διαφορετικές θέσεις  $Y=Y_{\max}$  και  $Y=Y_{\max}/2$ . Λόγω συμμετρίας του προβλήματος οι κατατομές του μέτρου της ταχύτητας στις δύο ακραίες θέσεις, δηλαδή στα πλαϊνά τοιχώματα είναι ταυτόσημες. Στην Εικ. 49α απεικονίζεται η κατατομή του μέτρου της ταχύτητας στο πλαϊνό τοίχωμα σε πλάγια όψη και παρατηρούμε αύξηση της από την περιοχή που βρίσκεται άνω του διακένου εισόδου και καθώς μεταβαίνει στο τέλος από τον κατακόρυφο στον οριζόντιο προσανατολισμό το μέγεθος αυτό λαμβάνει ακόμα μεγαλύτερες τιμές, σε ένα χωρίο κατάντι του διακένου εξόδου, μέχρις ότου εξομαλυνθεί η ροή. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο κάτω μέρος του αγωγού εξόδου το οποίο βρίσκεται κοντά στην γωνία που σχηματίζουν τα τοιχώματα η ροή επιβραδύνεται καθώς το μέτρο της ταχύτητας μειώνεται. Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν και για την κατατομή της ταχύτητας στον άξονα συμμετρίας (Y), Εικ. 49β, με διαφορά όμως αυτή τη φορά να παρατηρείται στην περιοχή του κατακόρυφου διακένου η οποία βρίσκεται κοντά στην δικέλυφη όψη, στην οποία το μέτρο της ταχύτητας είναι μικρότερο από την τιμή που βρέθηκε στο πλαϊνό τοίχωμα. Συγκρίνοντας τις Εικ. 49α και Εικ. 34α παρατηρούμε ότι στα πλαϊνά τοιχώματα το μέτρο της ταχύτητας ακολουθεί την ίδια κατανομή, ξεκινάει δηλαδή στην θέση  $Z=0.7m$  η οποία αποτελεί το ύψος του διακένου εισόδου με μία τιμή η οποία σταδιακά φθίνει όσο η ροή κινείται κατακόρυφα. Καθώς ο προσανατολισμός της ροής από κατακόρυφος γίνεται οριζόντιος το μέτρο αυξάνει τιμή λόγω στένωσης της διατομής και αλλαγής κατεύθυνσης.



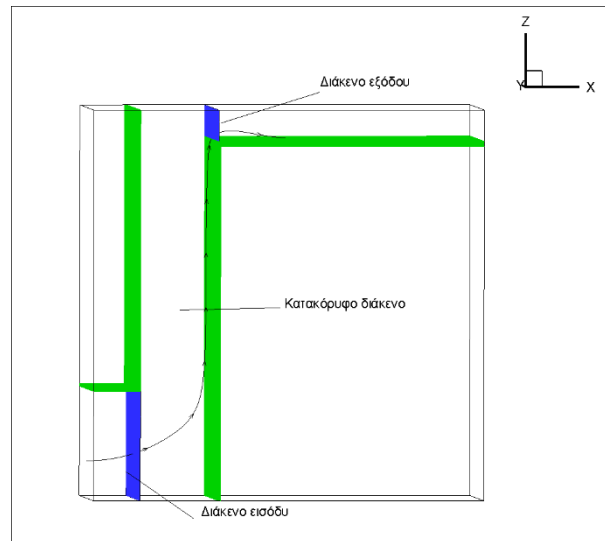
Εικ. 49: (α) μέτρο ταχύτητας στο πλαϊνό τοίχωμα, (β) ) μέτρο ταχύτητας στον άξονα συμμετρίας.

### 5.3.3 Γεωμετρία 4d

Η γεωμετρία 4d αποτελεί την πρότυπη γεωμετρία στην οποία βασίστηκε το πειραματικό μοντέλο. Το πλάτος του διακένου στην προκειμένη περίπτωση είναι 0.5m και οι συνολικές διαστάσεις της γεωμετρίας παρουσιάζονται στον παρακάτω στον Πίνακα 15 και στην Εικ. 50 παρουσιάζεται η προς μελέτη γεωμετρία.

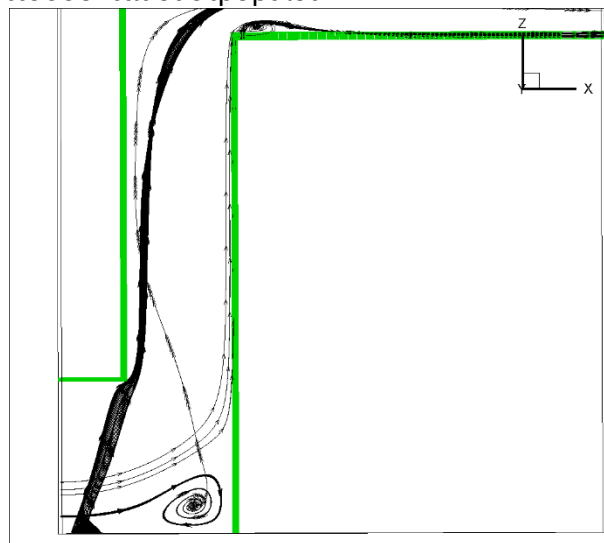
Πίνακας 15: Βασικές διαστάσεις γεωμετρίας

ΧΤΟΤ	2.5m
ΥΤΟΤ	1.25m
ΖΤΟΤ	2.5m
Διάκενο εισόδου(ύψος κάτω διακένου)	0.7m
Ενδιάμεσο διάκενο (έκταση κατά τον Χ άξονα)	0.5m(εκτείνεται από την θέση Χ=0.3m έως την θέση Χ=0.8m)
Διάκενο εξόδου (ύψος άνω διακένου)	0.2m



**Εικ. 50: Περιγραφή γεωμετρίας**

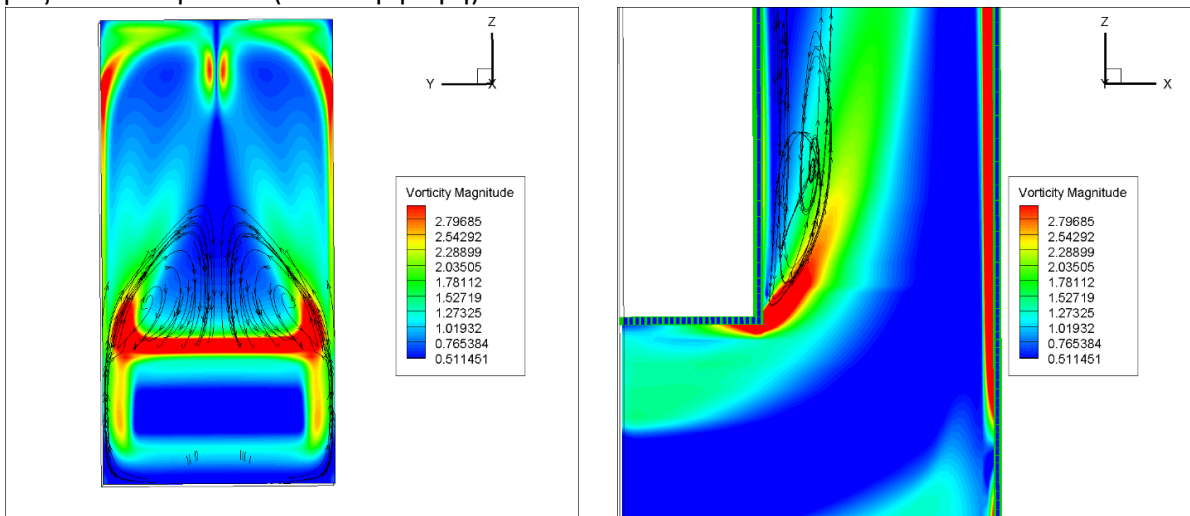
Επόμενο βήμα αποτελεί η σύγκριση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίλυση του κώδικα με τα πειραματικά. Θα παρουσιαστούν κατατομές βασικών μεγεθών, τα οποία είτε προκύπτουν απευθείας από την επίλυση του κώδικα είτε υπολογίζονται μέσω του Tec plot 360, καθώς επίσης και οι στρόβιλοι που δημιουργούνται στο πεδίο ροής. Παρουσιάζεται η αντίστοιχη εικόνα (Εικ. 51) όπως και στις προηγούμενες γεωμετρίες με τις θέσεις στις οποίες αναπτύσσονται οι στρόβιλοι.



**Εικ. 51: Θέσεις στρόβιλων στη γεωμετρία.**

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρούνται δίνες στην περιοχή η οποία βρίσκεται στην γωνία μεταξύ του δαπέδου, το οποίο αποτελεί το κάτω όριο του υπολογιστικού χωρίου και της εξωτερικής τοιχοποιίας του κτηρίου, Εικ. 56. Ταυτόχρονα στην παρούσα γεωμετρία η ροή στροβιλίζεται και στην περιοχή άνω του διακένου εισόδου με το που εισέρχεται στον κλωβό, Εικ. 52. Με την υπολογιστική ανάλυση παρατηρήθηκαν στρόβιλοι στο άνω τμήμα του μοντέλου, ένας διαμήκης στρόβιλος ο οποίος εκτείνεται σε όλο το μήκος της

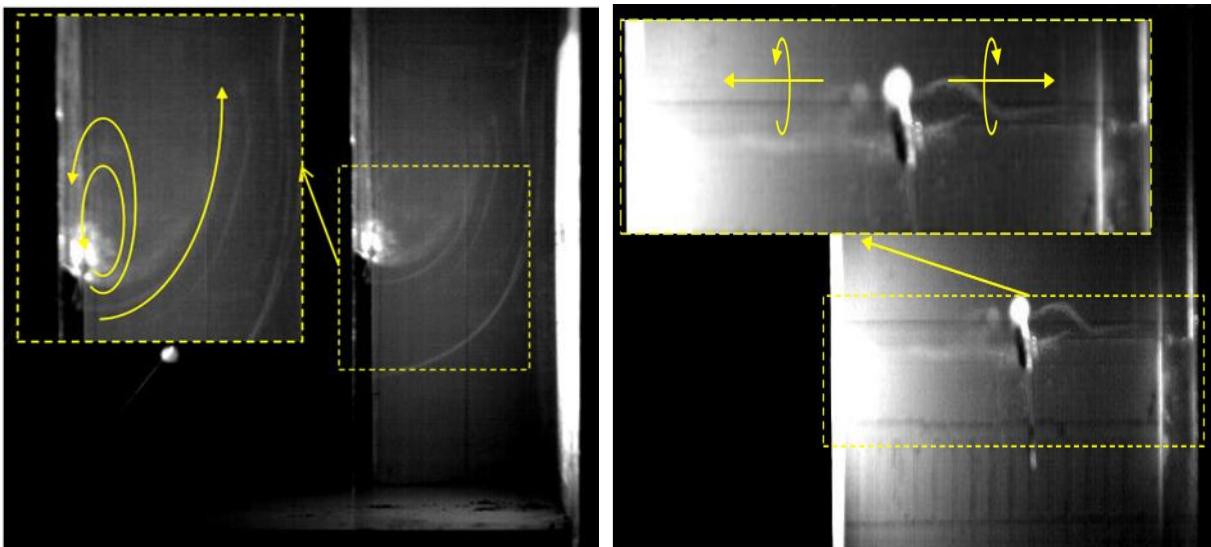
γεωμετρίας και βρίσκεται κατάντι του άνω διακένου εξόδου και ένας ο οποίος βρίσκεται στην γωνία του κλωβού η οποία σχηματίζεται από το ανώτερο υπολογιστικό όριο και την κάθετη προς αυτό επιφάνεια (δικέλυφη όψη).



(α)

(β)

Εικ. 52: Μέτρο στροβιλότητας [1/sec] και στρόβιλος διακένου εισόδου, (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη στον άξονα συμμετρίας



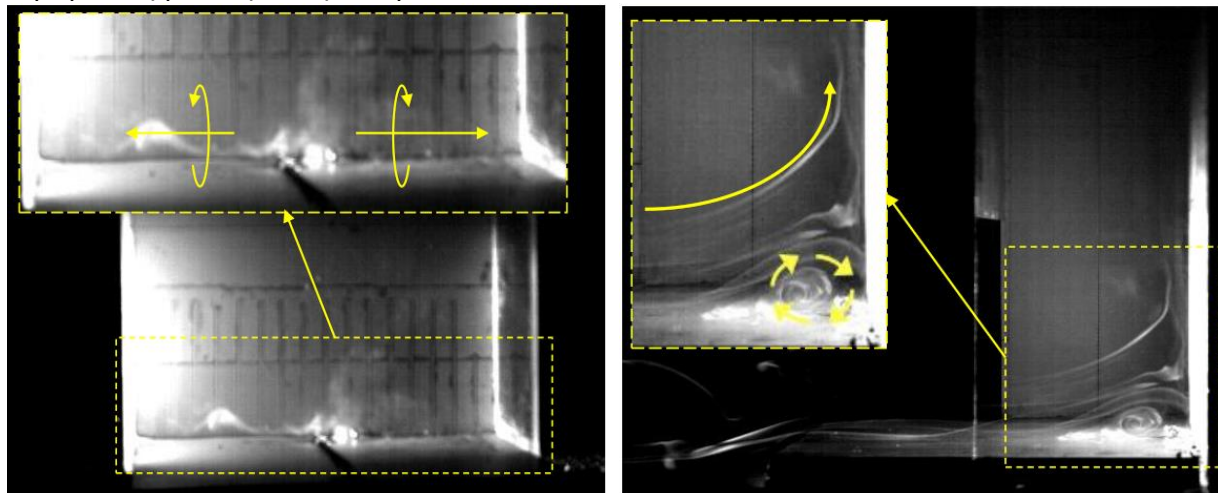
(α)

(β)

Εικ. 53: Στρόβιλος πειραματικής διάταξης στο διακένου εισόδου (16), (α) πλάγια όψη, (β) πρόσοψη

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα παρατηρήθηκε στροβιλισμός της ροής στην κάτω γωνία του κλωβού. Η οπτικοποίηση του θα γίνει με την χρήση των ροϊκών γραμμών σε συνδυασμό με την κατανομή του μέτρου της στροβιλότητας του πεδίου στην οποία έχει γίνει χρήση κατάλληλης κλίμακας για την καλύτερη αποτύπωση των χαρακτηριστικών της ροής. Στην Εικ.

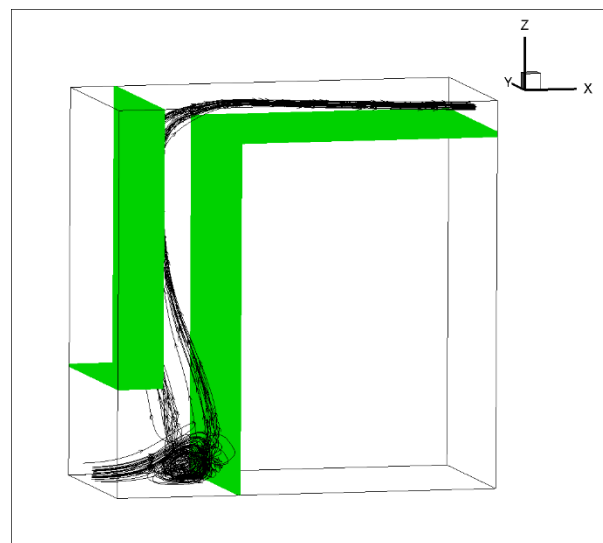
54 απεικονίζεται ο εν λόγω στρόβιλος με βάση τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από την πειραματική μελέτη του φαινομένου.



(α)

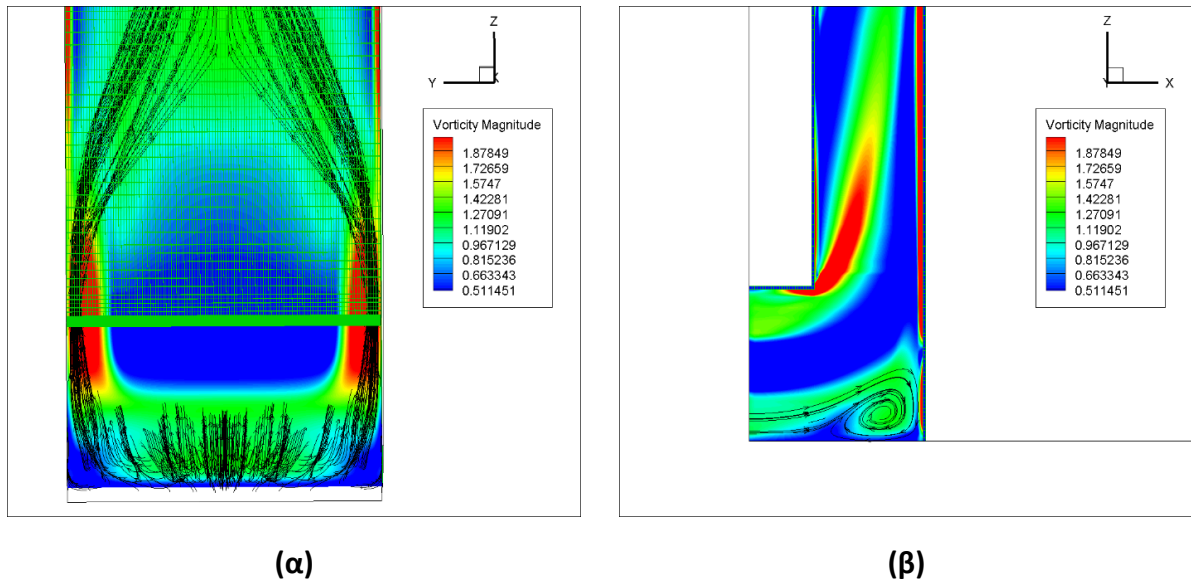
(β)

Εικ. 54: Στρόβιλος πειραματικής διάταξης στην πίσω γωνία του κλωβού (16), (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη



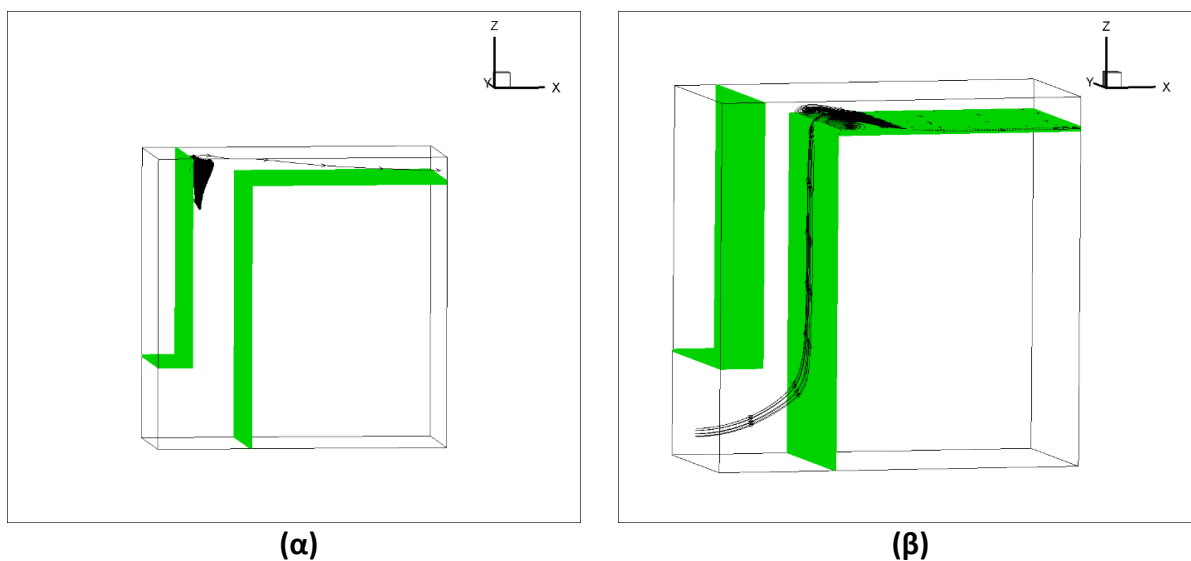
Εικ. 55: Στρόβιλος κάτω γωνίας σε τρισδιάστατη απεικόνιση



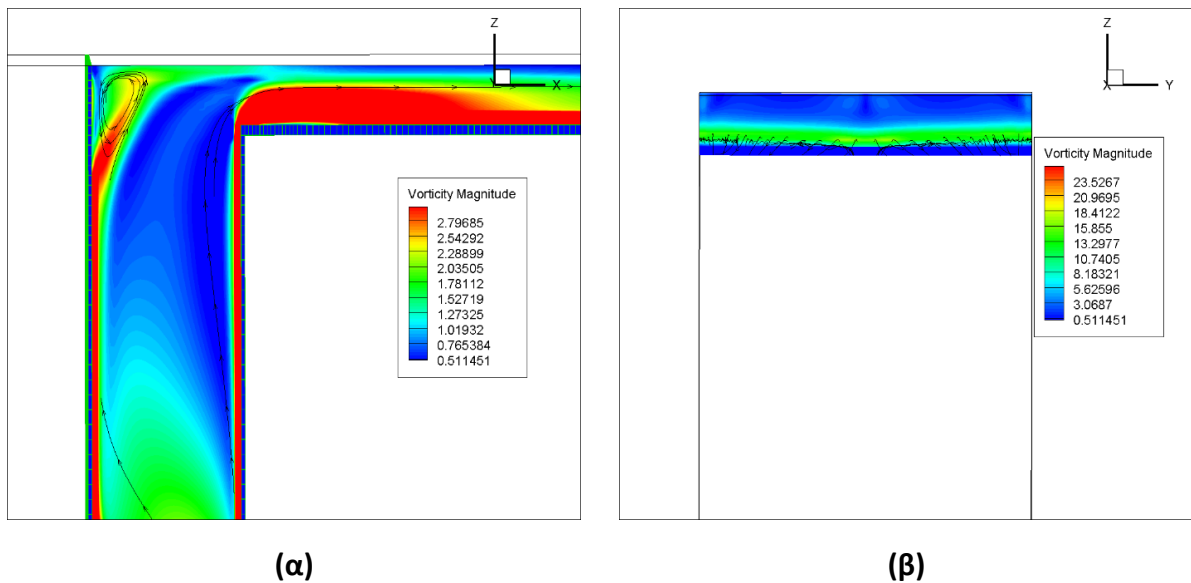


**Εικ. 56: Στρόβιλος πίσω γωνίας κλωβού και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη**

Το μέτρο της στροβιλότητας που αναπτύσσεται στην προαναφερθείσα θέση δεν διαφέρει σε σχέση με τις γεωμετρίες 1d,2d που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες ενότητες. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι στρόβιλοι στο άνω τμήμα της γεωμετρίας. Στην Εικ. 58α απεικονίζεται ο στρόβιλος στην γωνία του κλωβού και στην Εικ. 58β ο οριζόντιος στρόβιλος μετά το διάκενο εξόδου. Σύμφωνα με τις κατατομές του μέτρου της στροβιλότητας στις αντίστοιχες θέσεις παρατηρείται διαφορά στο μέτρο της και αυτό οφείλεται στην αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής από τον κατακόρυφο στον οριζόντιο προσανατολισμό και στην γωνία η οποία σχηματίζεται από το κτήριο. Κοντά στα τοιχώματα είναι αναμενόμενη η υψηλή τιμή του μέτρου στροβιλότητας λόγω διατμητικών τάσεων.

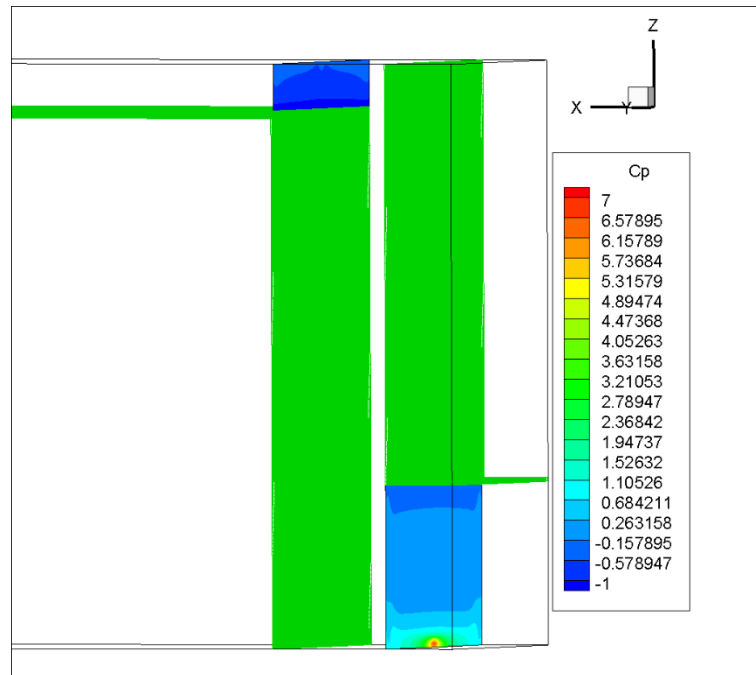


Εικ. 57 Τρισδιάστατη απεικόνιση θέσεων στροβίλων: (α) Άνω γωνίας, (β) Οριζόντιου στροβίλου μετά την έξοδο από το διάκενο



Εικ. 58: Μέτρο στροβιλότητας [1/sec] και δίνες στο άνω τμήμα: (α) Στρόβιλος στην γωνία του άνω τμήματος, (β) Οριζόντιος στρόβιλος μετά την έξοδο από το διάκενο

Στην συνέχεια όπως και στις προηγούμενες γεωμετρίες έτσι και στην παρούσα θα παρουσιαστεί η διαφορά πίεσης στις διατομές εισόδου και εξόδου από τον κλωβό. Για την διατομή εισόδου έχουμε  $P_{\text{mean,in}} = 0.035382$  και για την διατομή εξόδου  $P_{\text{mean,out}} = -0.25007$  άρα  $\Delta P = P_{\text{mean,out}} - P_{\text{mean,in}} = -0.285448$ . Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός της μέσης αδιάστατης πίεσης ( $C_p$ ) στις αντίστοιχες διατομές. Ως πίεση αναφοράς χρησιμοποιείται η μέση πίεση εισόδου και στην Εικ. 59 παρουσιάζονται οι κατατομές της αδιάστατης πίεσης στις διατομές αυτές.



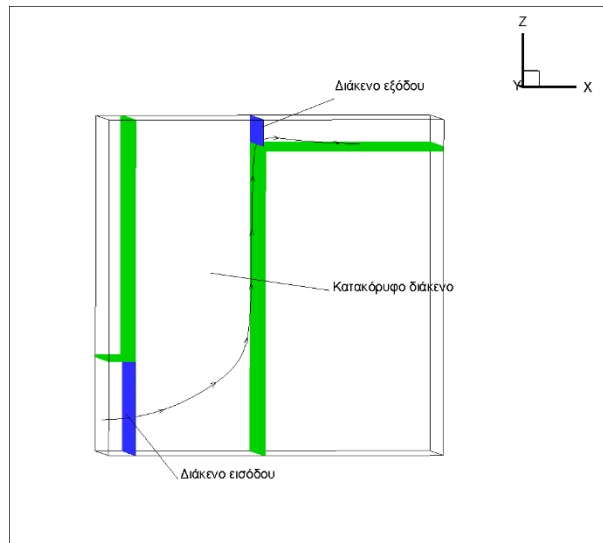
Εικ. 59: Κατατομές αδιάστατης πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο του κλωβού.

### 5.3.4 Γεωμετρία 7d

Η γεωμετρία 7d φέρει την μεγαλύτερη διάσταση πλάτους του κλωβού, 0.191m και με βάση την σταθερά αναλογίας μεταξύ των μοντέλων καταλήγουμε πως στην γεωμετρία η οποία θα επιλυθεί αριθμητικά το πλάτος αυτό είναι 0.955m. Οι διαστάσεις που χαρακτηρίζουν την παρούσα γεωμετρία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στην Εικ. 60 παρουσιάζεται και η γεωμετρική διάταξη.

Πίνακας 16: Διαστάσεις γεωμετρίας 7d

ΧΤΟΤ	2.5m
ΥΤΟΤ	1.25m
ΖΤΟΤ	2.5m
Διάκενο εισόδου(ύψος κάτω διακένου)	0.7m
Ενδιάμεσο διάκενο (έκταση κατά τον Χ άξονα)	0.955m(εκτείνεται από την θέση Χ=0.2m έως την θέση Χ=1.155m)
Διάκενο εξόδου (ύψος άνω διακένου)	0.2m



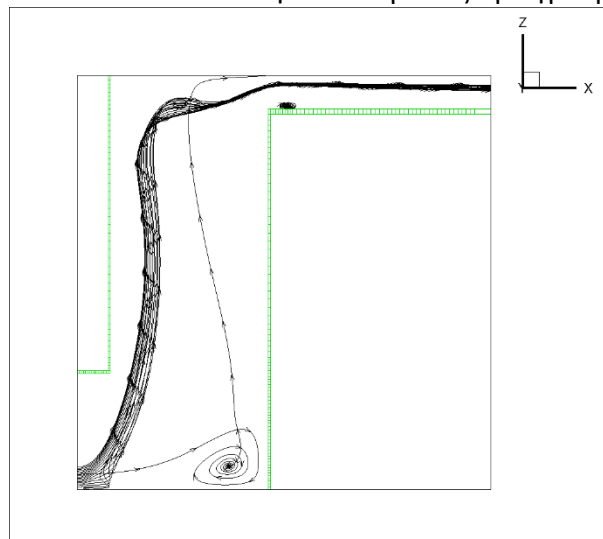
**Εικ. 60: Περιγραφή γεωμετρίας.**

Οι αρχικές συνθήκες που υπολογίζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 17: Αρχικές συνθήκες και ο αριθμός Reynolds=13844.971.

**Πίνακας 17: Αρχικές συνθήκες**

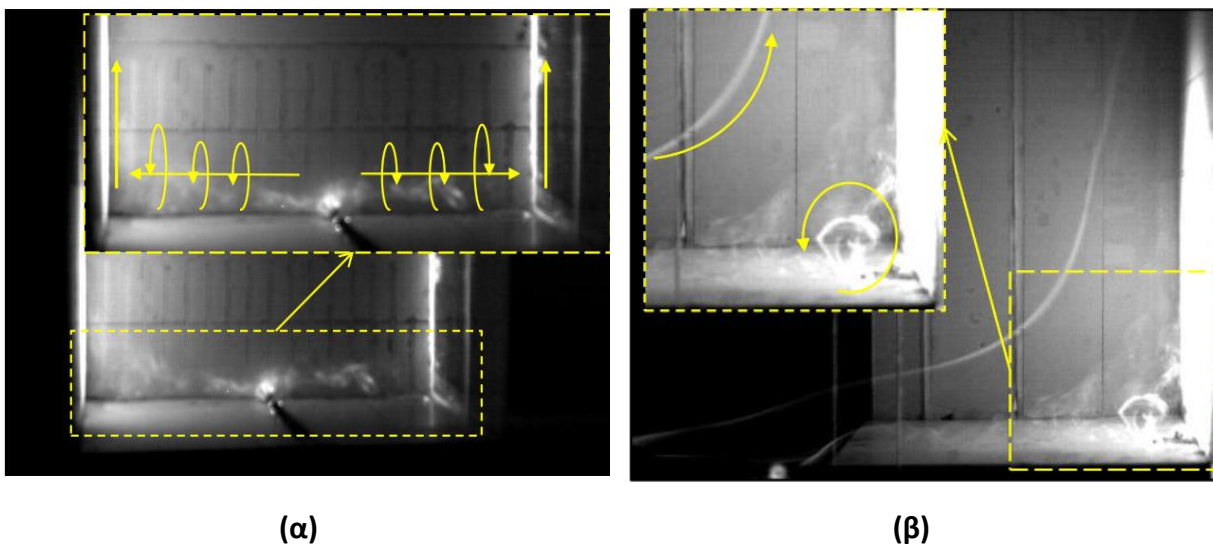
$U_{in}$ [ $m/s^2$ ]	0.266582
$k$ [ $m^2/s^2$ ]	0.001066
$\epsilon$ [ $m^2/s^3$ ]	0.000663

Πριν προχωρήσει η ανάλυση στον εκάστοτε στρόβιλο ξεχωριστά παρουσιάζονται στην Εικ. 61 συνολικά οι στρόβιλοι οι οποίοι απεικονίστηκαν και για τις προηγούμενες γεωμετρίες.

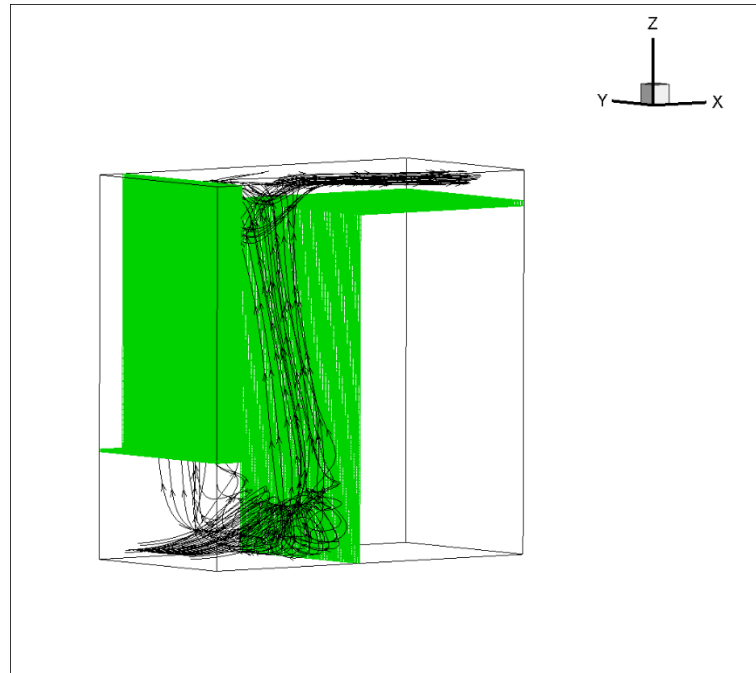


**Εικ. 61: Θέσεις στρόβιλων στην γεωμετρία σε πλάγια όψη.**

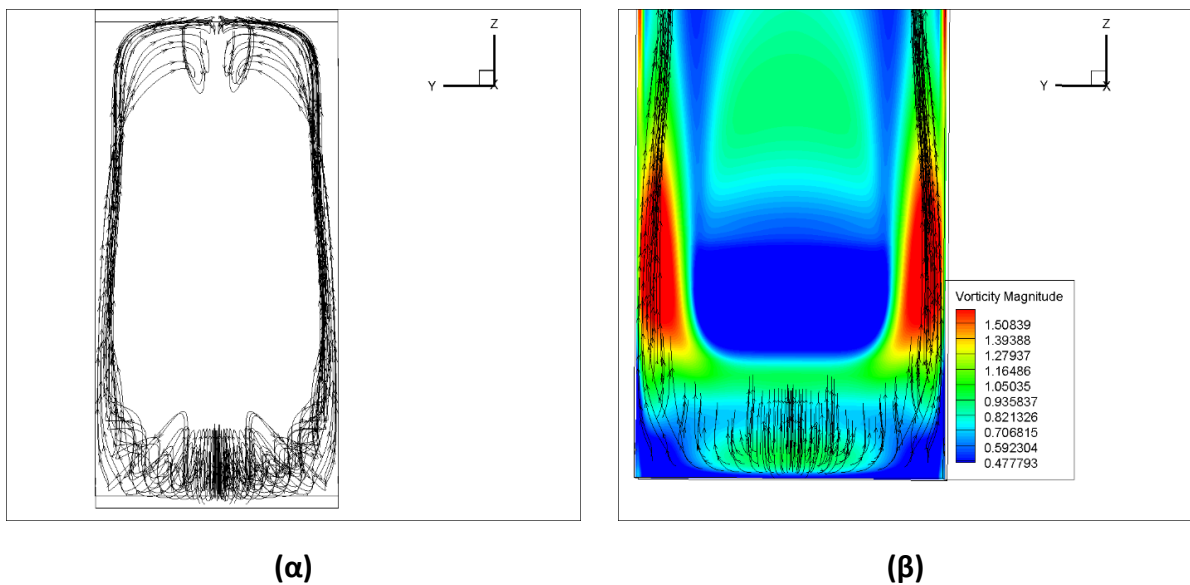
Στην περίπτωση 7d, όπως και στις προηγούμενες, παρατηρείται στροβιλισμός της ροής στην γωνία η οποία σχηματίζεται από το δάπεδο και το εξωτερικό τοίχωμα του κτηρίου. Η δίνη αυτή βρίσκεται στο πίσω μέρος του κλωβού και παρατηρήθηκε και από τα πειραματικά αποτελέσματα. Με την χρήση των ροϊκών γραμμών και τον υπολογισμό του μέτρου της στροβιλότητας γίνεται καλύτερη οπτικοποίησή της. Στις Εικ. 62α,β απεικονίζεται η δίνη που προέκυψε από το πείραμα σε πρόσοψη και πλάγια όψη αντίστοιχα. Ο οριζόντιος διαμήκης στρόβιλος που εκτείνεται μεταξύ των πλαϊνών τοιχωμάτων οδηγεί την ροή σε δύο αντίθετες κατευθύνσεις η οποία στην συνέχεια ακολουθεί ανοδική πορεία παράλληλα με τα στερεά τοιχώματα. Στην Εικ. 63 παρουσιάζεται ο οριζόντιος διαμήκης στρόβιλος ο οποίος αναπτύσσεται μεταξύ των πλαϊνών τοιχωμάτων σε τρισδιάστατη απεικόνιση μαζί με τα στερεά τοιχώματα της εγκατάστασης. Στην Εικ. 64α παρουσιάζεται ο ίδιος στρόβιλος σε πρόσοψη χωρίς την χρήση των στερεών τοιχωμάτων και στην Εικ. 65β οπτικοποιείται με την προσθήκη της κατανομής του μέτρου της στροβιλότητας στην αντίστοιχη θέση. Παρατηρείται στην περίπτωση 7d ότι οι ροϊκές γραμμές ακολουθούν πορεία παράλληλη με τα πλαϊνά στερεά τοιχώματα αλλά στο άνω τμήμα της γεωμετρίας όπως φαίνεται στην Εικ. 64α οι γραμμές ροής τείνουν να δημιουργήσουν ένα στρόβιλο στον άξονα συμμετρίας της γεωμετρίας κάτι το οποίο δεν συμβαίνει για τις προηγούμενες περιπτώσεις.



Εικ. 62: Στρόβιλος στο πίσω μέρος του κλωβού (16), (α) σε πρόσοψη, (β) σε πλάγια όψη



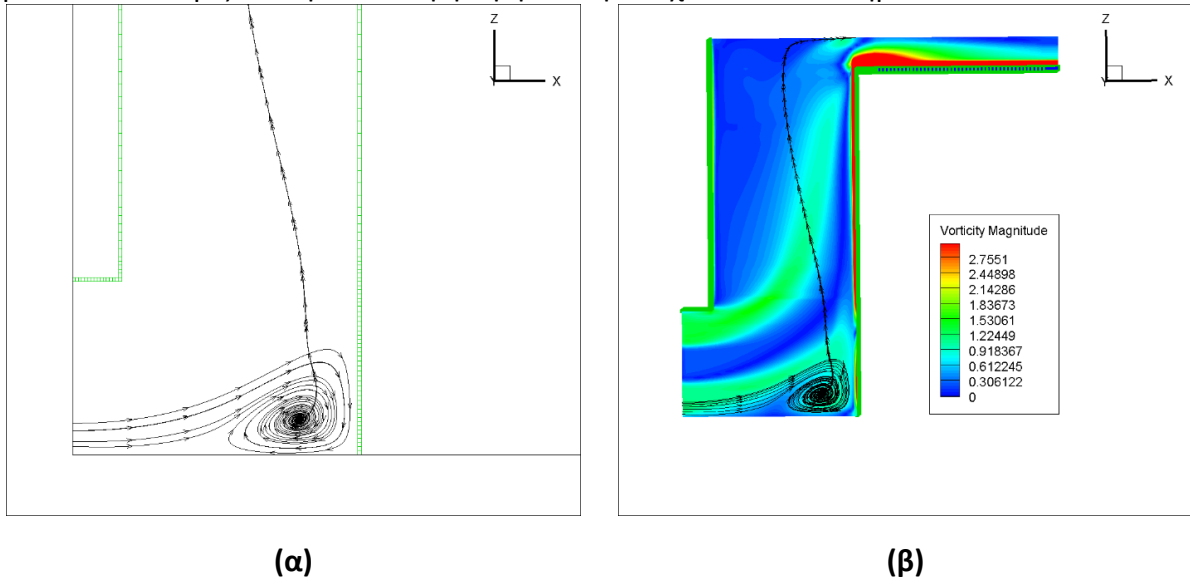
Εικ. 63: Οριζόντιος διαμήκης στρόβιλος στην κάτω πίσω γωνία σε τρισδιάστατη απεικόνιση



Εικ. 64: Στρόβιλος στο πίσω μέρος του κλωβού σε πρόσοψη, (α) χωρίς κατανομή στροβιλότητας, (β) με κατανομή στροβιλότητας [1/sec]

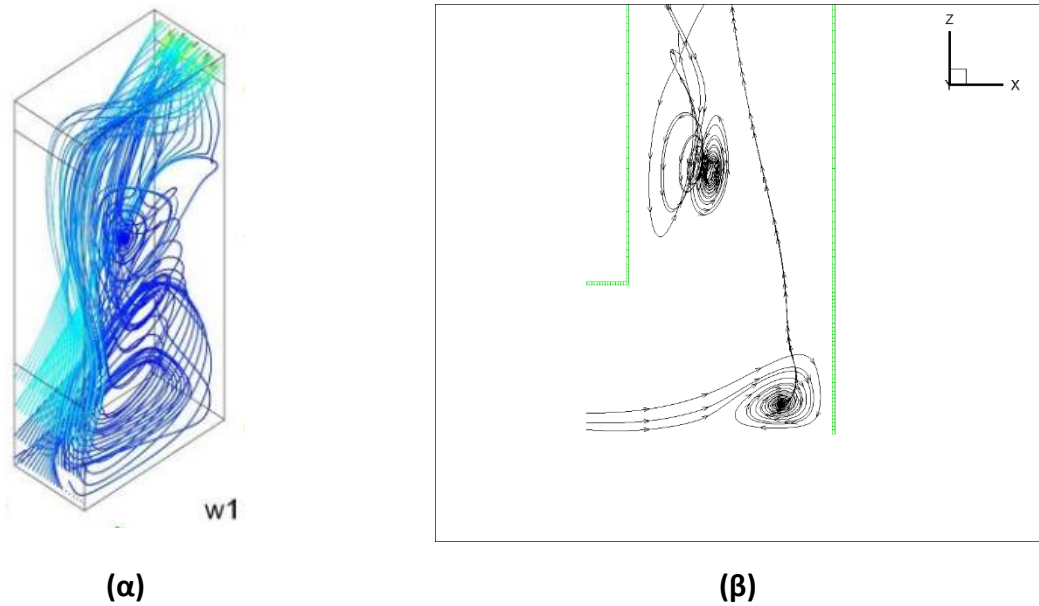
Οι τιμές τις οποίες λάμβανε το μέτρο της στροβιλότητας στις αντίστοιχες θέσεις για τις προηγούμενες γεωμετρίες είναι παρεμφερής και δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση. Σύμφωνα με τις Εικ. 31β, Εικ. 45β, Εικ. 56α μπορούν να συγκριθούν και οι αντίστοιχες τιμές. Οι τιμές αυτές δεν μεταβάλλονται έντονα με την μεταβολή του πλάτους της γεωμετρίας. Στην συνέχεια θα

παρουσιαστεί ο αντίστοιχος στρόβιλος σε πλάγια όψη η οποία τοποθετείται στον άξονα συμμετρίας της κατασκευής δηλαδή στην θέση  $Y=0.625\text{m}$  και τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες που παρατίθενται παρακάτω. Για καλύτερη εποπτεία θα προστεθούν και τα στερεά όρια τα οποία ορίζουν την δικέλυφη όψη και την τοιχοποιία του κτηρίου.



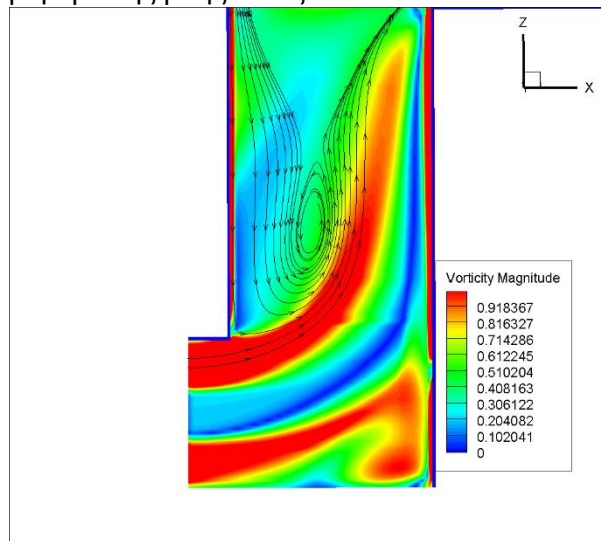
**Εικ. 65: Στρόβιλος στο πίσω μέρος του κλωβού σε πλάγια όψη, (α) χωρίς κατανομή στροβιλότητας, (β) με κατανομή στροβιλότητας [1/sec]**

Η περίπτωση αυτή αποτελεί την τελευταία κατά σειρά μελέτη και έχει το μεγαλύτερο πλάτος διακένου. Σύμφωνα με την έρευνα που έχει γίνει από τους Ουρδουμποζάνη κ.ά. (21) για γεωμετρία πλάτους διακένου 1m, σχεδόν παρόμοιο με την εξεταζόμενη περίπτωση παρατηρήθηκε μία ακανόνιστη μορφή της ροής στον κλωβό. Παρατηρείται σε αυτή την περίπτωση η μεγαλύτερη διάμετρος του στροβίλου στην πίσω γωνία του κλωβού αλλά και η ύπαρξη στροβίλου στο ενδιάμεσο μέρος του κλωβό. Για την καλύτερη απεικόνιση και σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση λιγότερων γραμμών ροής. Στην Εικ. 66 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του πεδίου μέσω του λογισμικού ANSYS CFX (Εικ. 66α) και αυτών τα οποία προκύπτουν από την επίλυση του κώδικα και οπτικοποιούνται μέσω του Tec plot 360 (Εικ. 66β) .



**Εικ. 66: Ροή εντός του κλωβού, (α) ANSYS CFX (21), (β) TEC PLOT 360**

Ο στρόβιλος ο οποίος παρατηρείται στις παραπάνω εικόνες, στη μέση του κατακόρυφου διακένου, απομονώθηκε και με τη χρήση ροϊκών γραμμών και του μέτρου της στροβιλότητας οπτικοποιείται η συμπεριφορά της ροής εντός του διακένου.



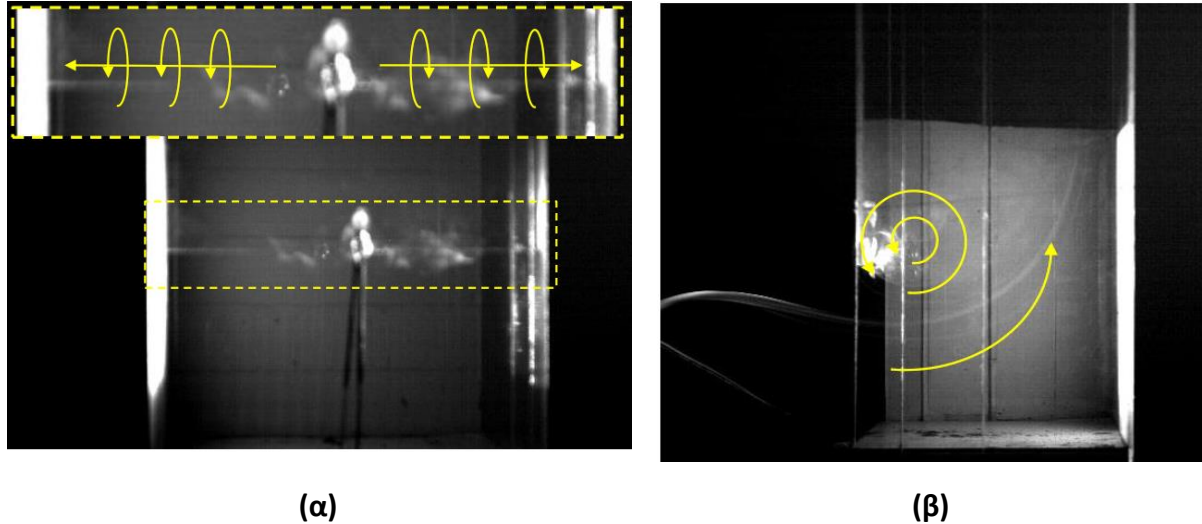
**Εικ. 67: Στρόβιλος σε πλάγια όψη στον άξονα συμμετρίας και μέτρο στροβιλότητας [1/sec].**

Οι γραμμές ροής που περιγράφουν τον προσανατολισμό της ροής υποδεικνύουν μία διαφορετική διαδρομή σε σχέση με τις περιπτώσεις 1,2d και στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει περισσότερη ανάλυση.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα υποδείχθηκε ύπαρξη στροβιλισμού της ροής κατά την είσοδό της στον κλωβό στην περιοχή άνω του διακένου εισόδου. Στην υπολογιστική επίλυση του προβλήματος ο στρόβιλος αυτός απεικονίζεται και μέσω της εικόνας Εικ. 67 στην οποία παρατηρούμε ότι οι γραμμές ροής έρχονται κατακόρυφα και με φορά προς τα κάτω από την

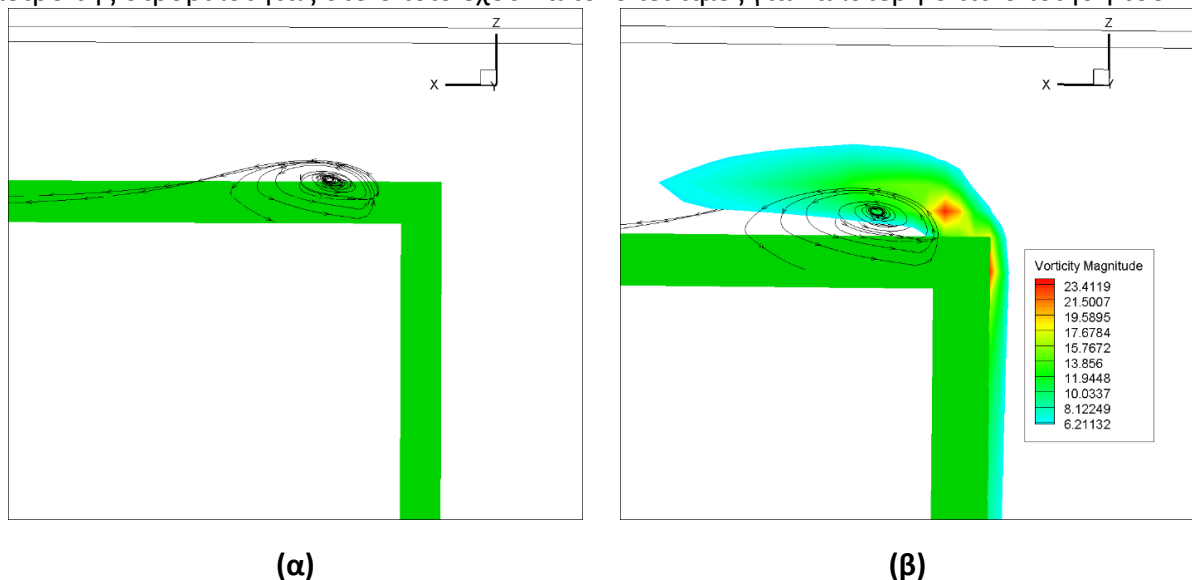


άνω περιοχή του κτηρίου μέχρι το ύψος 0.7m, το οποίο αποτελεί και το ύψος του διακένου εισόδου για όλες τις περιπτώσεις. Σε αντίθεση με την περίπτωση 2d στην οποία υποδεικνύεται καθαρά ο στροβιλισμός της ροής για μεγαλύτερα διάκενα ο στρόβιλος εξαπλώνεται και εντός του κλωβού και δημιουργείται η ανομοιομορφία της ροής.



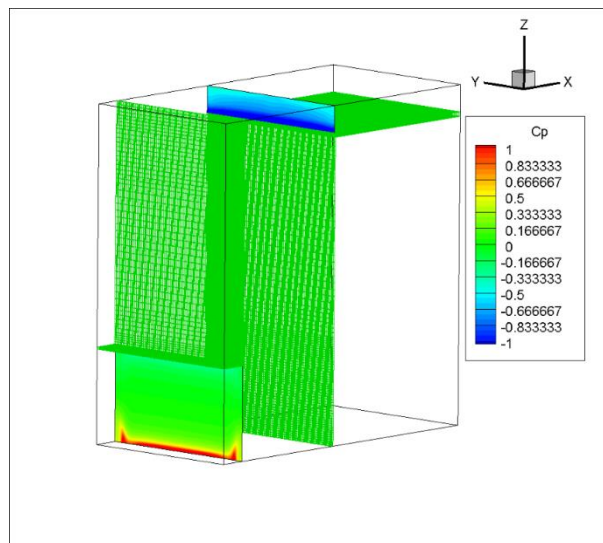
Εικ. 68: Στρόβιλος στο διάκενο εισόδου (16) , (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη

Στην περίπτωση 7d παρατηρείται και πάλι στροβιλισμός κατά την έξοδο της ροής από το άνω διάκενο, παρόλα αυτά στην εν προκειμένω περίπτωση ο στροβιλισμός των ροϊκών γραμμών παρατηρείται μόνο στα πλάγια τοιχώματα και όχι καθ' όλο το μήκος της γεωμετρίας. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο στρόβιλος αυτός σε πλάγια όψη και ταυτόχρονα και το μέτρο της στροβιλότητας στο οποίο έχουν αποκοπεί τιμές για καλύτερη οπτικοποίησή του.



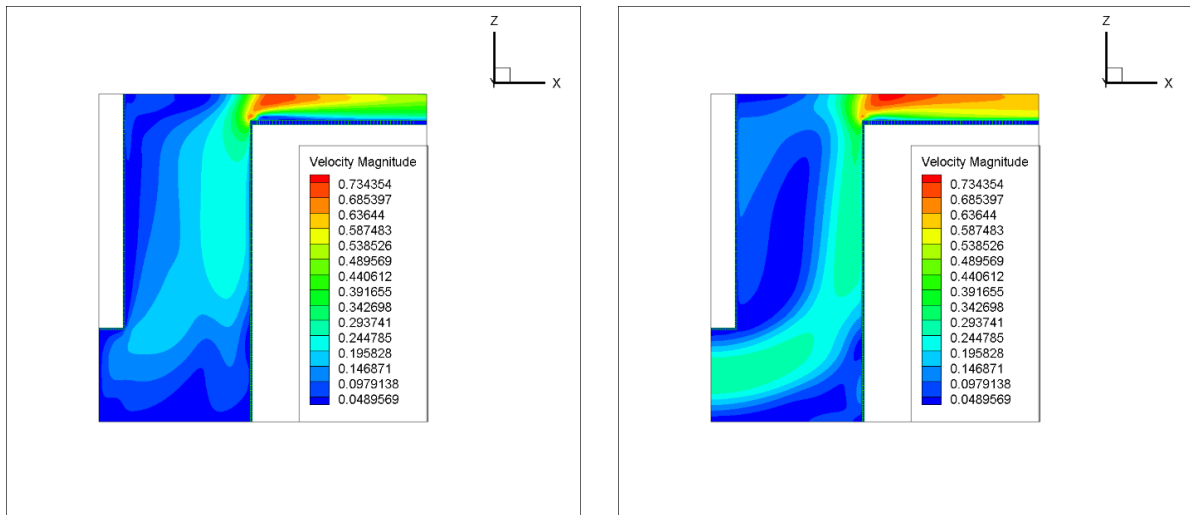
Εικ. 69: Στρόβιλος στο διάκενο εξόδου σε πλάγια όψη, (α) χωρίς μέτρο στροβιλότητας, (β) με κατατομή του μέτρου στροβιλότητας [1/sec]

Επόμενο βήμα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων αποτελεί η μελέτη του πεδίου της πίεσης. Υπολογίζεται η μέση αδιάστατη πίεση στις διατομές εισόδου και εξόδου από τον κλωβό. Η πίεση αδιαστατοποιήθηκε με την μέση πίεση εισόδου η οποία βρέθηκε  $P_{\text{mean,in}} = -0.01157$ . Η μέσες αδιάστατες πιέσεις εισόδου και εξόδου από την διατομή υπολογίσθηκαν  $C_{p_{\text{mean,in}}} = 0.058996$  και  $C_{p_{\text{mean,out}}} = -0.78108$ . Η διαφορά πίεσης  $\Delta C_{p_{\text{mean}}} = 0.840071$  η οποία είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίσθηκε στην περίπτωση 4d. Ενώ αναμένεται πτώση της μέσης πίεσης όσο αυξάνει το πλάτος του διακένου η διαφορά μέσης πίεσης  $\Delta P = P_{\text{mean,out}} - P_{\text{mean,in}} = 0.2988$ , νούμερο το οποίο είναι μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίσθηκε στην περίπτωση 4d (0.2854). Για το γεγονός αυτό πιθανή αιτία να είναι η αρνητική τιμή η οποία λαμβάνει η πίεση εισόδου και για αυτό το λόγω αυτό υπάρχει το προαναφερθέν πρόβλημα. Στην επόμενη εικόνα θα παρουσιαστούν οι κατατομές της αδιάστατης πίεσης στα διάκενα εισόδου και εξόδου της ροής από τον κλωβό. Το συμπέρασμα το οποίο εξάγεται από τις Εικ. 70 είναι πως η υψηλότερη τιμή λαμβάνεται στην είσοδο της ροής στο κάτω μέρος του διακένου, μειώνεται καθ' ύψος και στο διάκενο εξόδου αποκτά μόνο αρνητικές τιμές με την χαμηλότερη να βρίσκεται κοντά στην γωνία η οποία σχηματίζεται στην οροφή του κτηρίου.



**Εικ. 70: Κατατομές αδιάστατης πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο από τον κλωβό.**

Τέλος για την παρούσα γεωμετρία θα παρουσιαστούν και οι κατατομές της ταχύτητας στον άξονα συμμετρίας και στα πλαϊνά τοιχώματα οι οποίες δεν διαφέρουν με αυτές των προηγούμενων μοντέλων και τα συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί επιβεβαιώνονται και στην περίπτωση αυτή.



(α)

(β)

Εικ. 71: Κατατομή μέτρου ταχύτητας σε πλάγια όψη, (α) πλαινό τοίχωμα , (β) άξονα συμμετρίας.

## 6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

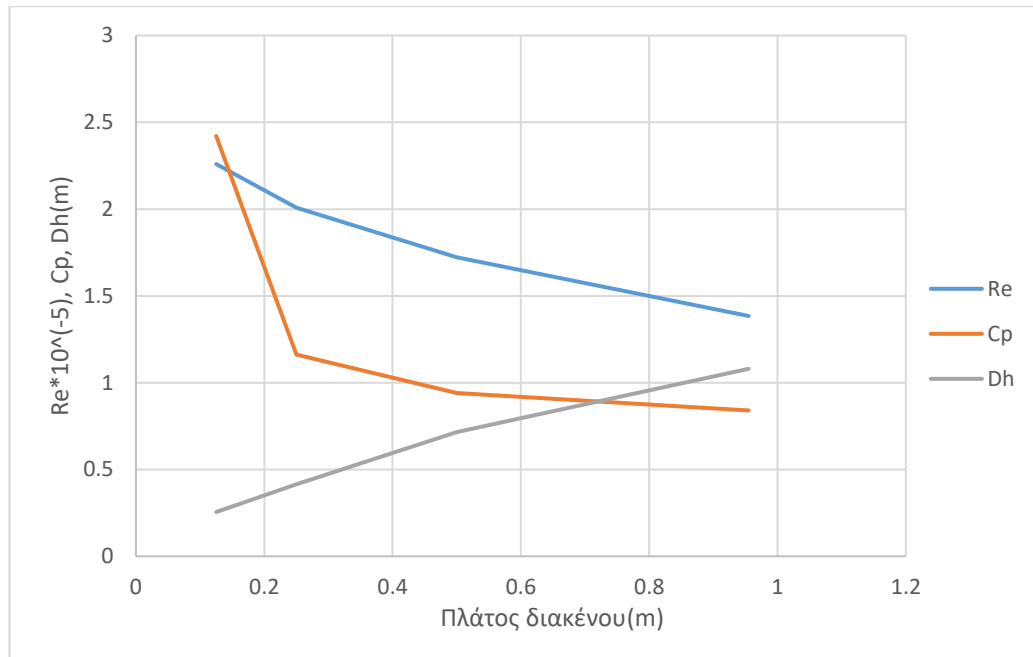
Στόχος του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από την υπολογιστική ανάλυση του μοντέλου.

### 6.1 Γενικά

Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια έχουν υπολογισθεί για την κάθε γεωμετρία ξεχωριστά και στο κεφάλαιο αυτό επικεντρωνόμαστε στην σύγκρισή τους. Στις παρακάτω περιπτώσεις παρουσιάζονται οι γεωμετρίες 1d, 2d, 4d, 7d οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το πλάτος του διακένου που βρίσκεται μεταξύ της δικέλυφης όψης και της εξωτερικής επιφάνειας του τοιχώματος. Όλα τα προαναφερθέντα μοντέλα ακολουθούν την ίδια αναλογία διαστάσεων μεταξύ πειραματικών (16) και υπολογιστικών και ταυτόχρονα για την επίτευξη της δυναμικής ομοιότητας ο αριθμός Reynolds παραμένει αμετάβλητος μεταξύ των αντίστοιχων κατασκευών. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων θα εξετασθεί ως προς τη διάμετρο των πλάγιων κάθετων δινών, την κλίση της ροής, τον οριζόντιο στρόβιλο ο οποίος σχηματίζεται στο χωρίο άνω του δαπέδου και μεταξύ της όψης και του τοιχώματος του κτηρίου, τον στρόβιλο ο οποίος αναπτύσσεται στην περιοχή άνω του διακένου εισόδου και για τον προσανατολισμό της ροής. Εκτός των παρατηρήσεων που θα αναπτυχθούν για τα προαναφερθέντα θα εξετασθεί και η πτώση πίεσης στο μοντέλο. Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικός πίνακας ο οποίος περιέχει τα βασικά μεγέθη της κάθε γεωμετρίας. Στο Διάγραμμα 5 απεικονίζεται η μεταβολή των μεγεθών με βάση το πλάτος του διακένου του κλωβού.

**Πίνακας 18: Βασικές παράμετροι γεωμετριών**

	1d	2d	4d	7d
Reynolds number	22594.224	20075.72	17231.86	13844.971
Πλάτος διακένου(m)	0.125	0.25	0.5	0.955
Υδραυλική διάμετρος(m)	0.255	0.415	0.715	1.08
Πτώση πίεσης ( $\Delta C_p$ )	2.421668	1.162163	0.940552	0.840071



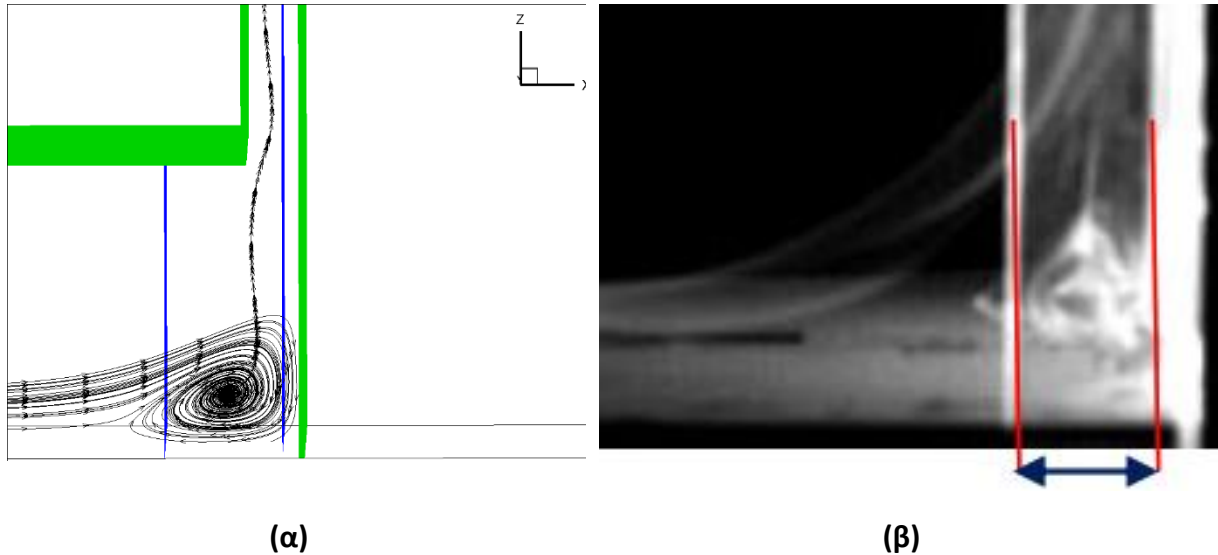
**Διάγραμμα 5: Μεταβολή μεγεθών συναρτήσει του πλάτους του διακένου**

## 6.2 Οριζόντιος στρόβιλος

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν για τις προαναφερθείσες γεωμετρίες παρατηρείται η δημιουργία ενός οριζόντιου στρόβιλου στο χωρίο που σχηματίζεται από την εξωτερική τοιχοποιία του κτηρίου και του δαπέδου. Θα γίνει παραμετρική ανάλυση η οποία βασίζεται στην αδιαστατοποίηση της διαμέτρου του στρόβιλου με το πλάτος του κατακόρυφου διακένου. Η θέση στην οποία θα παρουσιαστούν οι στρόβιλοι είναι στο επίπεδο συμμετρίας της γεωμετρίας, δηλαδή στη θέση  $Y=Y_{max}/2$ , με την απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και ταυτόχρονα δύο κάθετων προς το δάπεδο επιφανειών από τις οποίες η μία βρίσκεται στην αρχή και η άλλη στο πέρας του στρόβιλου και η διαφορά τους αποτελεί την διάμετρο της δίνης. Οι κατακόρυφες επιφάνειες θα τοποθετούνται σε θέσεις στις οποίες ο στρόβιλισμός της ροής είναι έντονος και θα αποκόπτονται γραμμές ροής στις οποίες θα υπάρχει μεν στρόβιλισμός αλλά δεν θα είναι ιδιαίτερα έντονος.

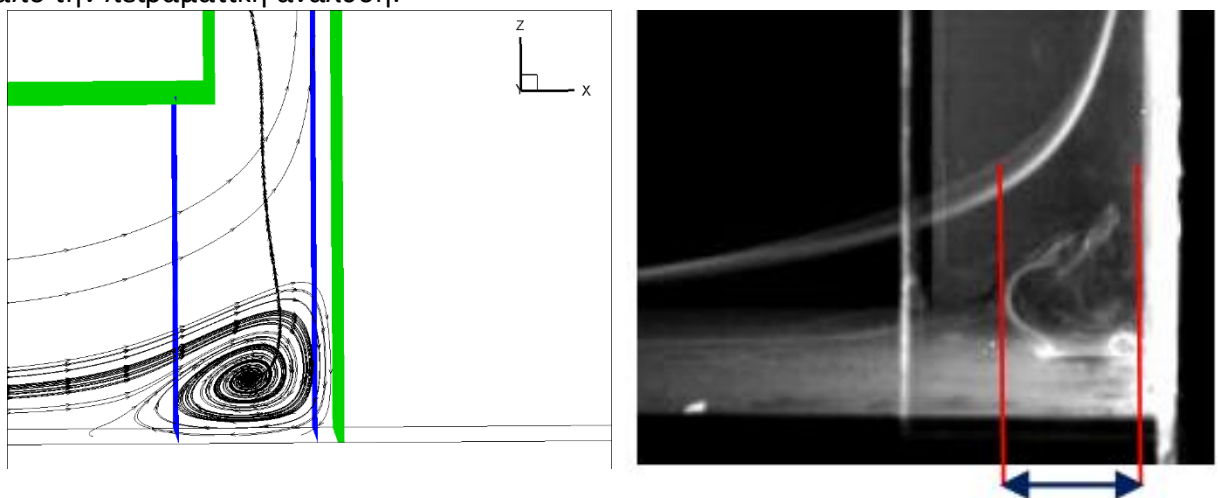
Για την γεωμετρία πλάτους διακένου 0.125m (1d) η διάμετρος του στρόβιλου γίνεται μέσω υπολογισμού της διαφοράς τελικής και αρχικής θέσης στην οποία ο στρόβιλος αναπτύσσεται. Παρατηρούμε ότι κατά την υπολογιστική ανάλυση ο στρόβιλος εκτείνεται μέχρι και το χωρίο το οποίο βρίσκεται ανάντι του διακένου εισόδου κάτι το οποίο δεν παρατηρείται στο πειραματικό μοντέλο στο οποίο η δίνη αναπτύσσεται εντός του κατακόρυφου διακένου. Πιθανή αιτία που δημιουργεί την διαφορά αυτή μπορεί να είναι η ύπαρξη στερεού τοιχώματος το οποίο λειτουργεί σαν αγωγός εισόδου της ροής, καθώς χωρίς την ύπαρξή του μπορεί να οδηγούμασταν σε απόκλιση της λύσης. Στην Εικ. 72α παρατηρούνται και γραμμές ροής οι οποίες βρίσκονται πίσω από τις επιφάνειες που αποτελούν τα όρια του στρόβιλου. Οι επιφάνειες τοποθετήθηκαν στο όριο στο οποίο ο στρόβιλος είναι έντονος και για αυτό δεν λήφθηκαν υπόψη η εν λόγω γραμμές ροής. Για την παρούσα γεωμετρία οι επιφάνειες

βρίσκονται στις θέσεις  $X=0.48\text{m}$  και  $X=0.76\text{m}$  με αποτέλεσμα η διάμετρος του στροβίλου να είναι  $D1=0.28\text{m}$ .



**Εικ. 72: Οριζόντιοι στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16)**

Για την γεωμετρία πλάτους διακένου  $0.25\text{m}$  ( $2d$ ) η κατακόρυφη επιφάνεια η οποία αποτελεί την αρχή του στροβίλου βρίσκεται στην θέση  $X=0.471\text{m}$  και το πέρας του στροβίλου είναι στην επιφάνεια στην θέση  $X=0.7575\text{m}$ . Στην περίπτωση αυτή η διάμετρος προκύπτει  $D2=0.2865\text{m}$ , το οποίο σαν νούμερο είναι λίγο μεγαλύτερο από το υπολογιζόμενο για την γεωμετρία  $1d$ . Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς με την πειραματική ανάλυση που έγινε είχε προκύψει ότι οι διαμέτροι των οριζόντιων στροβίλων που αναπτύσσονται στην κάτω περιοχή των γεωμετριών  $1,2d$  είναι σχεδόν παρόμοιες. Στην παρακάτω Εικ. 73α παρουσιάζονται οι στρόβιλοι με τη χρήση ροϊκών γραμμών και στην Εικ. 73β τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική ανάλυση.

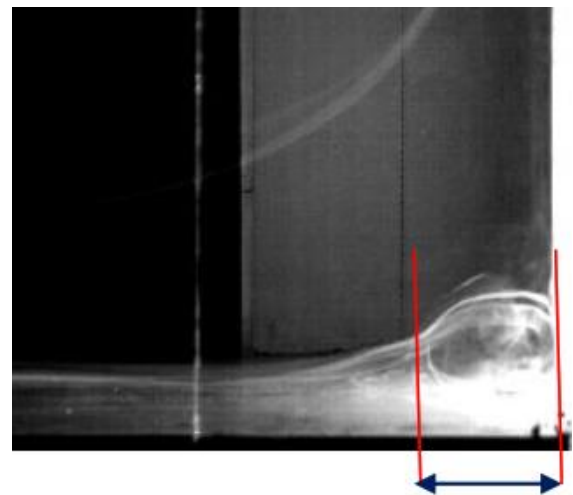
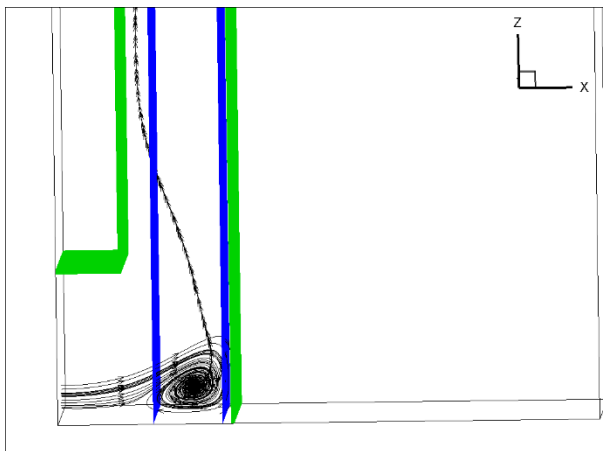


(α)

(β)

**Εικ. 73: Οριζόντιοι στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλα (16)**

Για την γεωμετρία αναφοράς πλάτους διακένου 0.5m ακολουθείται ξανά η ίδια μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της διαμέτρου του στρόβιλου ο οποίος δημιουργείται στην γωνία μεταξύ δαπέδου και εξωτερικής τοιχοποιίας. Στην Εικ. 74α παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή ο στρόβιλος δεν εκτείνεται σε περιοχές που βρίσκονται πίσω από το διάκενο εισόδου, είναι δηλαδή ολόκληρη η δίνη εντός της δικέλυφης όψης. Οι κάθετες επιφάνειες στις οποίες βρίσκονται τα άκρα του στρόβιλου βρίσκονται στις θέσεις  $X=0.44\text{m}$  και  $0.76\text{m}$  και με βάση αυτές υπολογίζεται η διάμετρος του στρόβιλου  $D4=0.32\text{m}$ .

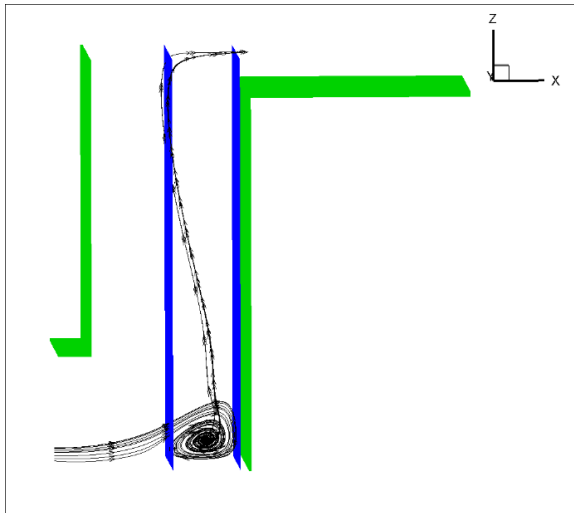


(α)

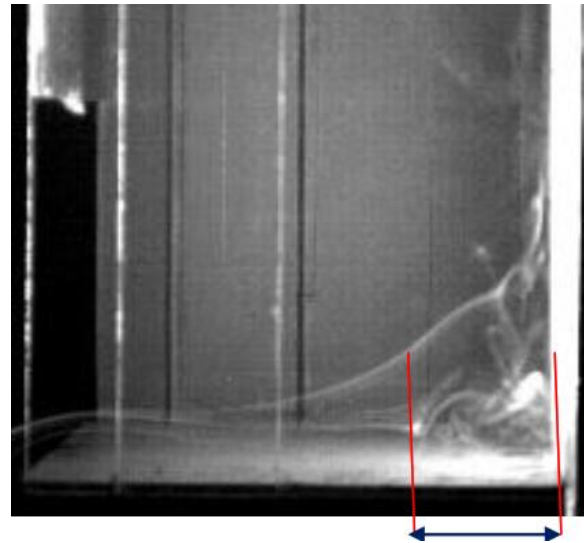
(β)

**Εικ. 74: Οριζόντιοι στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16)**

Τέλος για την περίπτωση 7d όπου το πλάτος του διακένου είναι 0.955m η διάμετρος του στρόβιλου ο οποίος σχηματίζεται στην κάτω γωνία την κατασκευής  $D7=0.41\text{m}$ , δηλαδή η μεγαλύτερη από όλες τις προαναφερθείσες διαμέτρους, κάτι το οποίο είναι και αναμενόμενο με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Η διάμετρός του υπολογίσθηκε και αυτή την φορά με την χρήση δύο κάθετων επιφανειών οι οποίες τοποθετήθηκαν στην αρχής και στο πέρας του στρόβιλου όπως θα παρουσιαστεί και στην συνέχεια. Οι επιφάνειες αυτές βρίσκονται στις θέσεις  $X=0.695\text{m}$  και  $X=1.105\text{m}$ .



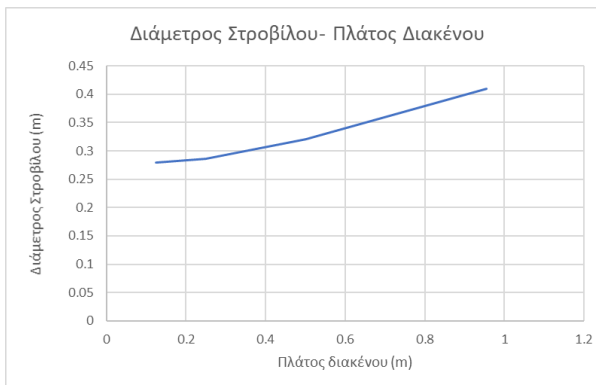
(α)



(β)

**Εικ. 75: Οριζόντιοι στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16)**

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα για τις γεωμετρίες 1d, 2d, 4d παρατηρούμε ότι η διάμετρος του εν λόγω στρόβιλου αυξάνεται αναλογικά με το πλάτος της διατομής του κλωβού. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και από την πειραματική μελέτη όπως θα παρουσιαστεί και στα παρακάτω διαγράμματα. Για τις γεωμετρίες 1d και 2d φαίνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη ποσοστιαία μεταβολή της διαμέτρου της δίνης και με βάση το πείραμα αλλά και με βάση την υπολογιστική μελέτη και από την γεωμετρία 4d και μετά παρατηρείται εμφανής η διαφορά.



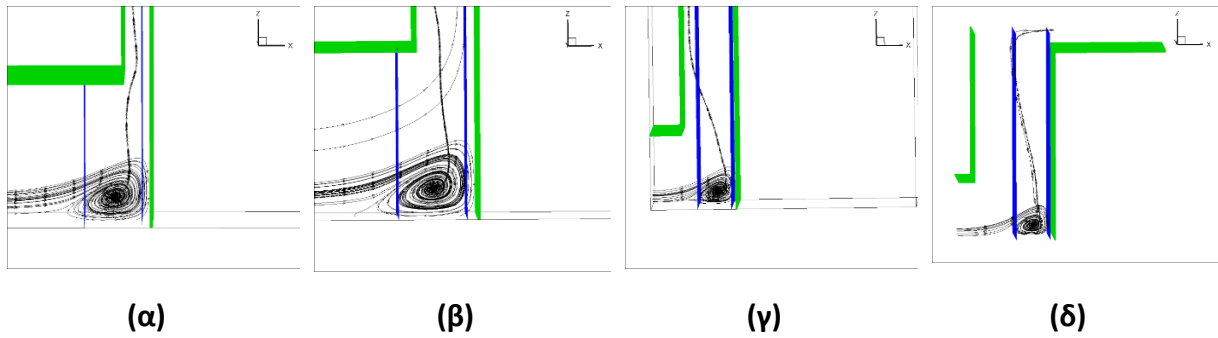
(α)



(β)

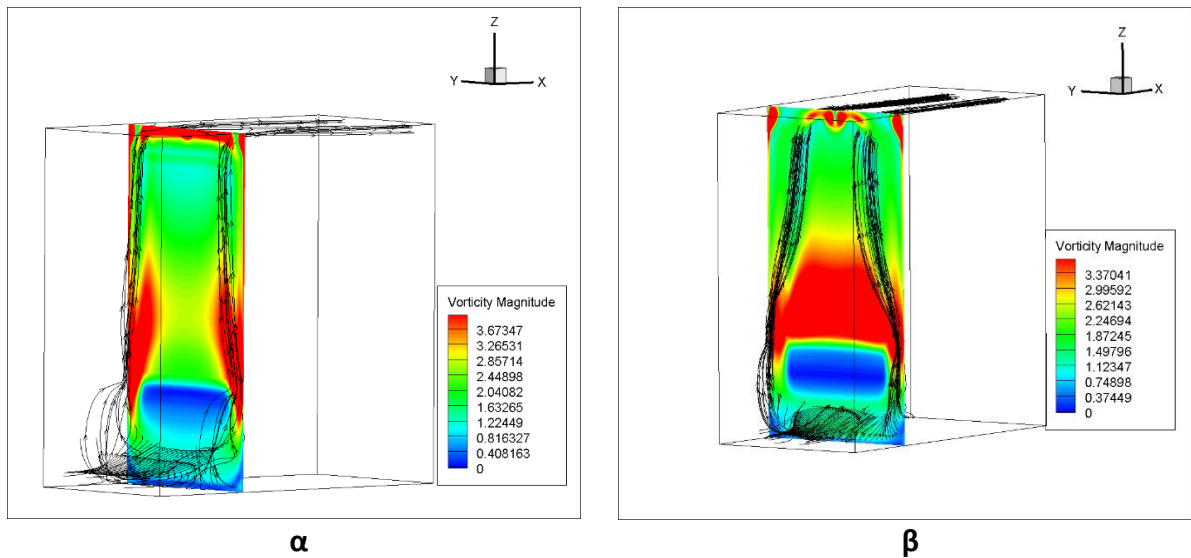
**Εικ. 76: Διάμετρος οριζόντιων στρόβιλων σε αναλογία με το πλάτος διακένου σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16)**



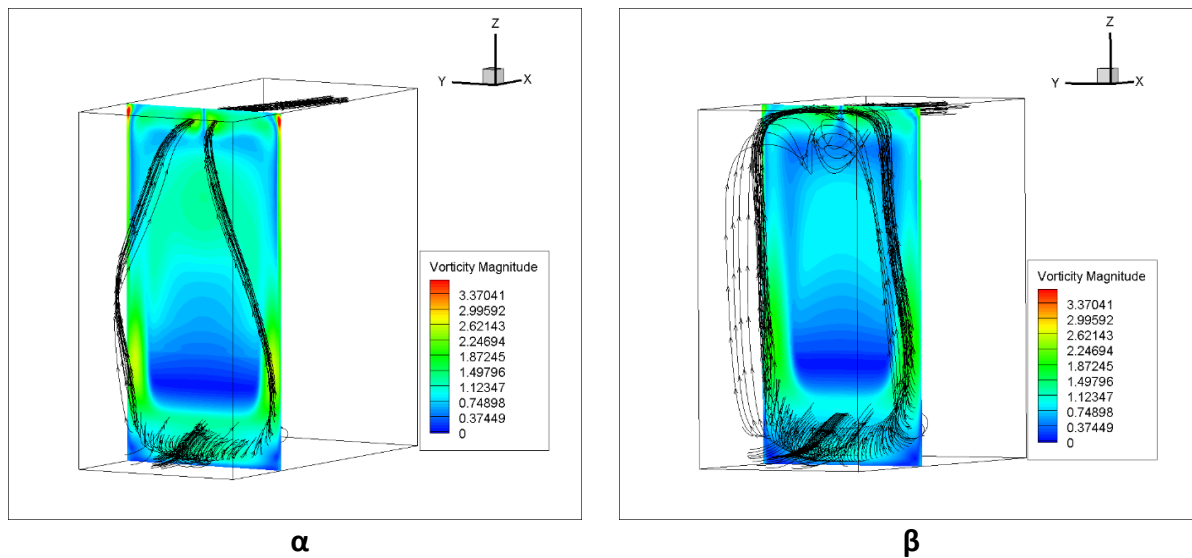


Εικ. 77: Έκταση οριζόντιου διαμήκη στροβίλου στις γεωμετρίες, (α) 1d, (β) 2d, (γ) 4d, (δ) 7d

Τέλος όσον αφορά στον διαμήκη οριζόντιο στρόβιλο ο οποίος σχηματίζεται στην πίσω γωνία της διάταξης θα παρουσιαστούν τρισδιάστατες εικόνες στις οποίες θα φαίνονται οι ροϊκές γραμμές και ταυτόχρονα και το μέτρο της στροβιλότητας στο κέντρο του στροβίλου .



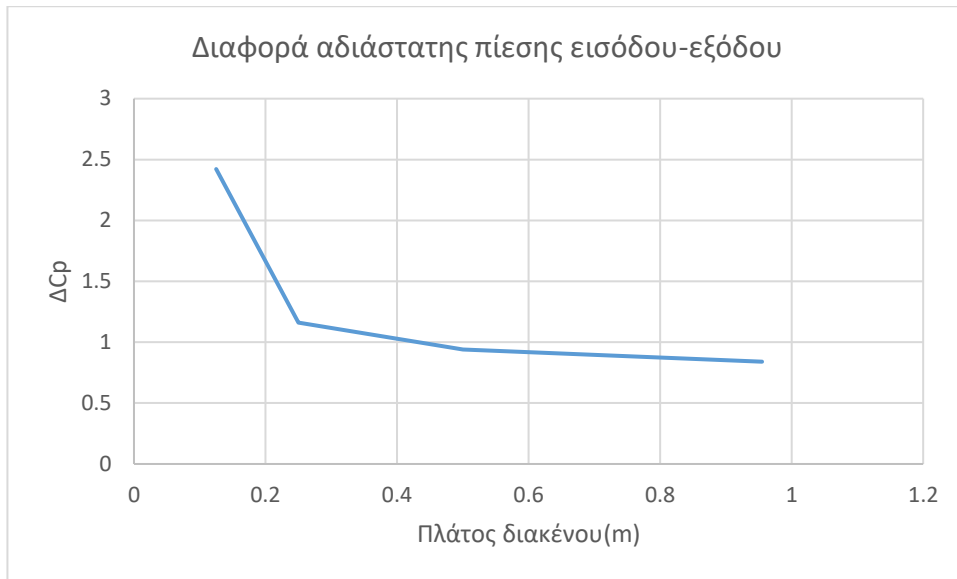
Εικ. 78: Τρισδιάστατη αναπαράσταση στροβίλου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (α) 1d, (β) 2d



Εικ. 79: Τρισδιάστατη αναπαράσταση στροβίλου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (α) 4d, (β) 7d

### 6.3 Πτώση πίεσης

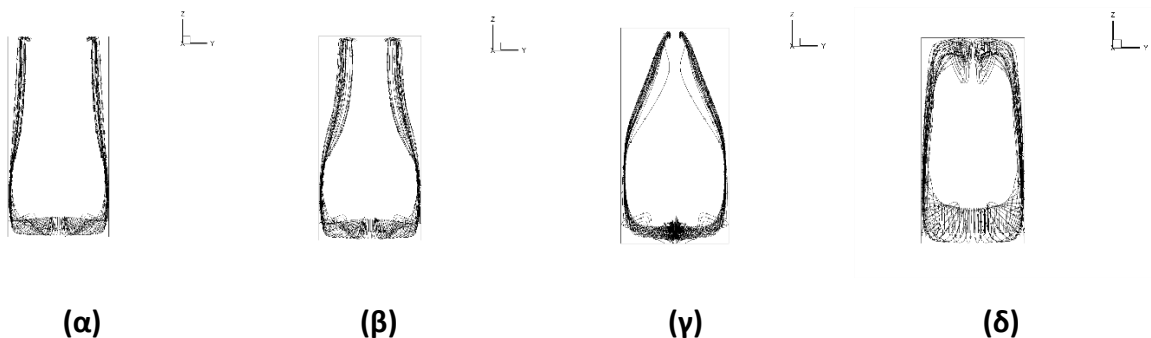
Επόμενος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί και η μελέτη της διαφοράς πίεσης. Για όλες τις προαναφερθείσες γεωμετρίες έχει γίνει υπολογισμός της μέσης πίεσης για τα διάκενα εισόδου και εξόδου της ροής από τον κλωβό. Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος το οποίο έχει υπολογισθεί είναι η μέση πίεση  $C_p$  στις διατομές αυτές. Υπολογίζοντας την μέση αδιάστατη πίεση σε αυτές τις διατομές υπολογίζουμε και το  $\Delta C_p$  (μεταβολή αδιάστατης πίεσης). Για την μεταβολή αυτή θα παρουσιαστεί διάγραμμα το οποίο θα απαρτίζεται από την απόλυτη διαφορά πίεσης σε συνάρτηση με το πλάτος του διακένου. Τα πειραματικά αποτελέσματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η πτώση πίεσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους του διακένου και κατά συνέπεια αναμένεται μία φθίνουσα καμπύλη μεταξύ διαφοράς πίεσης και πλάτους. Στον Πίνακα 18 αναγράφονται οι βασικές παράμετροι των γεωμετριών. Όπως θα παρατηρηθεί και παρακάτω στο Διάγραμμα 6 η πτώση πίεσης στα μοντέλα 1d και 2d είναι απότομη ενώ από στην συνέχεια ακολουθείται μία πιο ομαλή πορεία. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και πειραματικά αλλά και υπολογιστικά. Η διαδικασία υπολογισμού της μέσης πίεσης και της μέσης αδιάστατης πίεσης αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια που αποτελούνται από την ανάλυση της κάθε γεωμετρίας ξεχωριστά. Στην ενότητα που περιγράφεται η γεωμετρία 7d αναφέρθηκε ότι η πτώση μέσης πίεσης αυξάνεται σε σχέση με τις προηγούμενες μελέτες ενώ η μέση αδιάστατη πίεση φθίνει.



Διάγραμμα 6: Διαφορά αδιάστατης πίεσης συναρτήσει του πλάτους του διακένου

## 6.4 Ροή αέρα

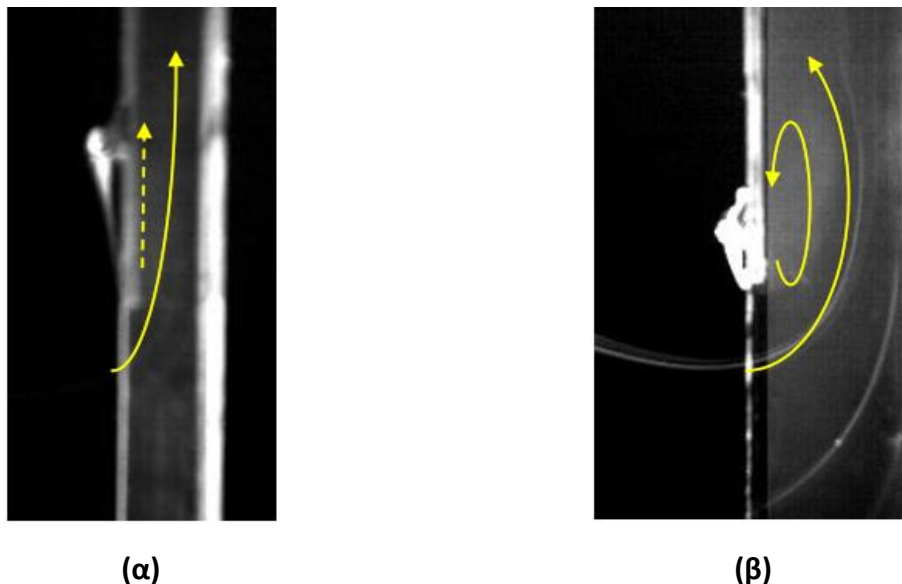
Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι για μικρά πλάτη διακένου  $1d$  και  $2d$  η οριζόντια δίνη η οποία δημιουργήθηκε στην πίσω γωνία του στροβίλου είχε την τάση να παρασύρει τον αέρα να κινείται σε ανοδική πορεία παράλληλα με τα πλαϊνά τοιχώματα (Εικ. 80). Για πλάτη μεγαλύτερα του  $0.250m$  ( $2d$ ) ένα μέρος του όγκου του αέρα που διαρρέει την διατομή παρασύρεται στα πλαϊνά τοιχώματα αλλά και ένα μέρος του παγιδεύεται εντός του κλωβού. Στην Εικ. 80γ και στην Εικ. 80δ παρατηρείται το γεγονός ότι η ροή αν και στην αρχή κινείται παράλληλα με τα πλαϊνά τοιχώματα μετά από κάποιο ύψος αρχίζει να κινείται εντός του κλωβού.



Εικ. 80: Οριζόντιος στρόβιλος στο κάτω μέρος, (α)  $1d$ , (β)  $2d$ , (γ),  $4d$ , (δ)  $7d$

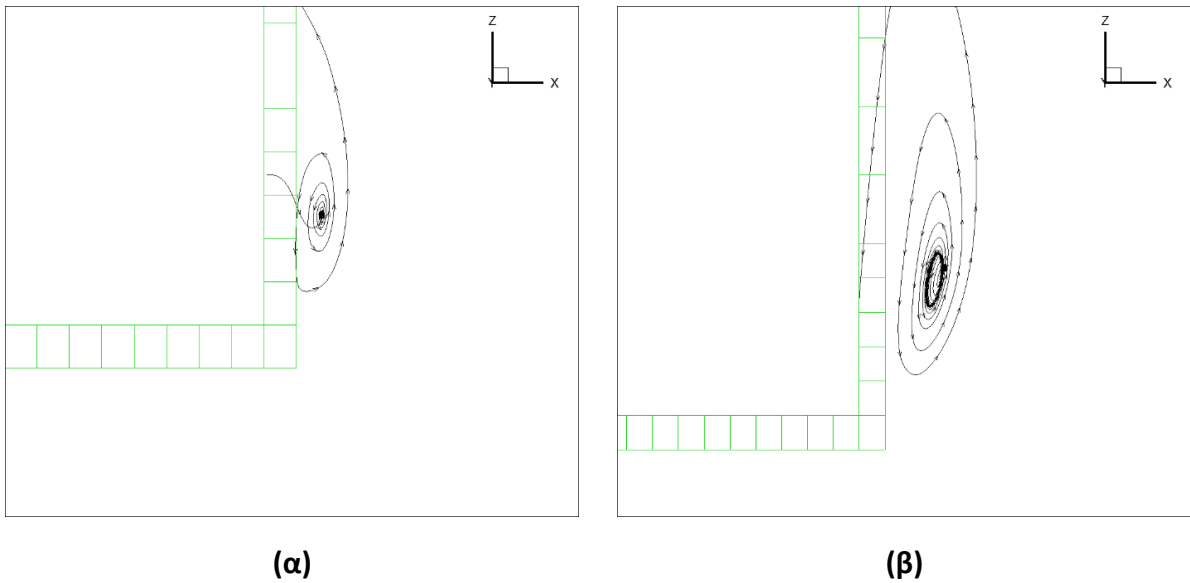
## 6.5 Διαφοροποίηση στροβίλου στο διακένου εισόδου

Σύμφωνα με την πειραματική στην περίπτωση όπου το πλάτος του διακένου αντιστοιχεί σε 0.125m (1d) δεν είναι εμφανής η ύπαρξη στροβίλου στην θέση άνω του διακένου εισόδου, κάτι το οποίο δεν συνέβαινε για τις υπόλοιπες γεωμετρίες στις οποίες ο στροβιλισμός της ροής ήταν ευδιάκριτος. Με την υπολογιστική επίλυση του προβλήματος μπορούμε να έχουμε καλύτερη εποπτεία σε κάποια σημεία του προβλήματος και με την αξιοποίησή της μας δύναται η δυνατότητα να παρατηρήσουμε έναν στροβιλισμό των ροϊκών γραμμών στην θέση αυτή. Παρόλα αυτά η δίνη που σχηματίζεται στην περίπτωση 1d δεν είναι τόσο ισχυρή όσο στην περίπτωση 2d και πιθανή αιτία για την μη διάκρισή του στην πειραματική μελέτη να υπήρξε αυτή. Στις επόμενες εικόνες θα παρασταθούν συγκριτικά οι στροβίλοι αυτοί από διάφορες οπτικές γωνίες για τις γεωμετρίες 1d και 2d. Στην περίπτωση 2d η καμπύλη η οποία σχηματίζεται από την δέσμη καπνού και αναπαριστά τον στροβίλο είναι εντονότερη από αυτή στην περίπτωση 1d.

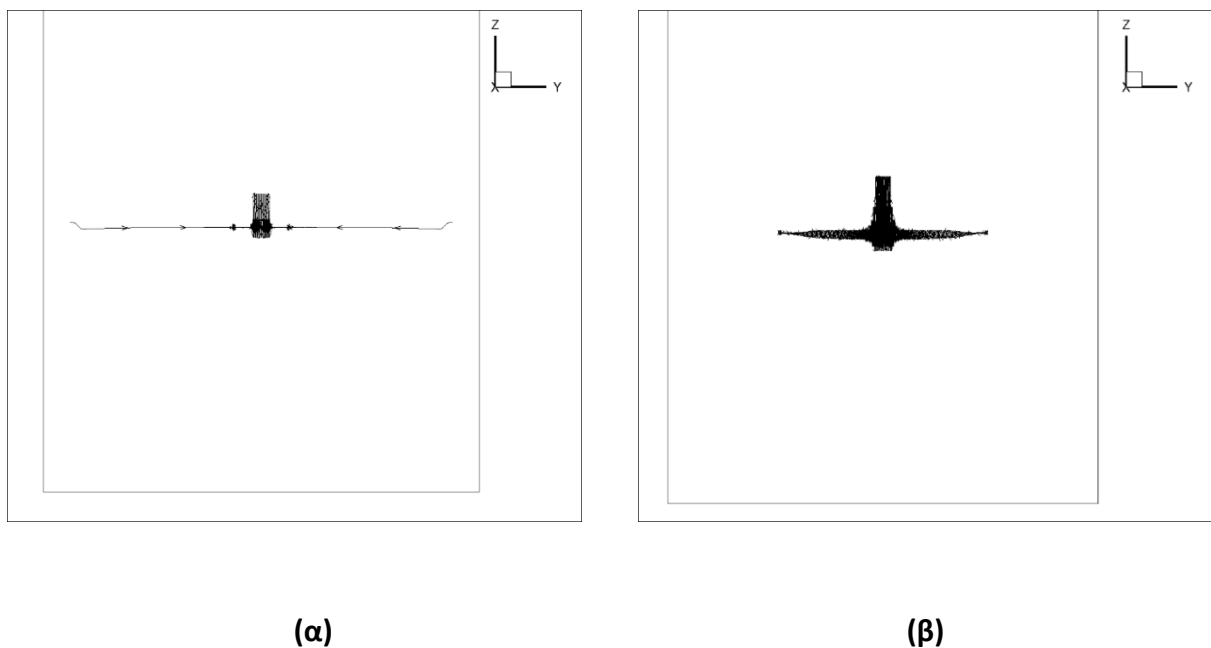


**Εικ. 81: Πειραματικά αποτελέσματα στροβίλου εισόδου σε πλάγια όψη (16), (α)1d, (β) 2d**

Για την απεικόνιση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων παρουσιάζονται αρχικά στον άξονα συμμετρίας οι γραμμές ροής στην εν λόγω περιοχή για τις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση του στροβίλου στην γεωμετρία πλάτους διακένου 0.25m η έκταση του είναι εμφανώς μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της γεωμετρίας 1d. Για τις γεωμετρίες 4d και 7d

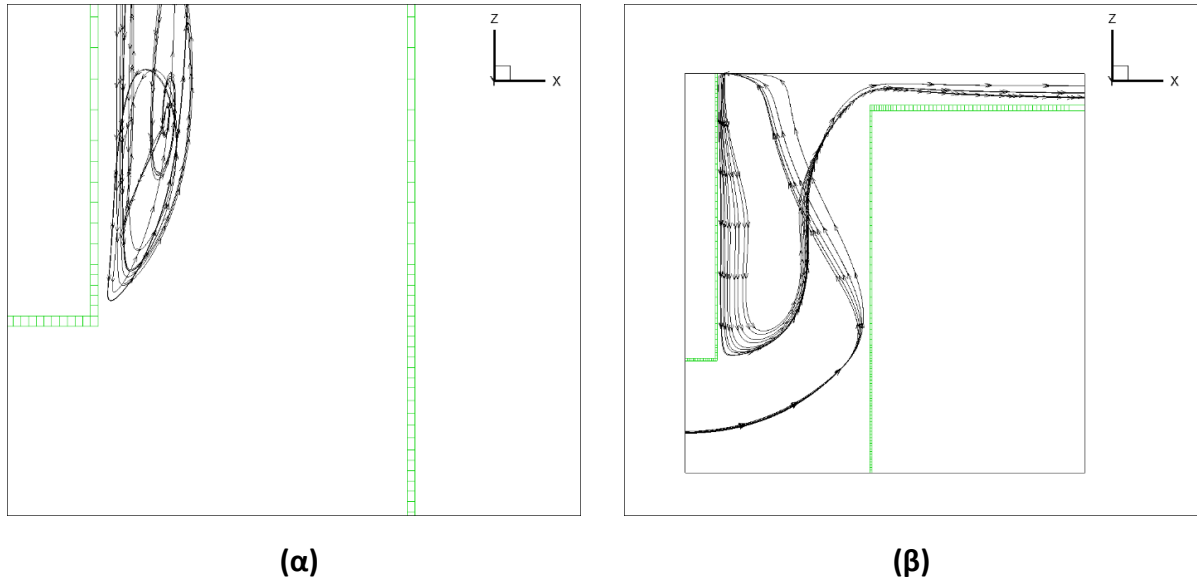


**Εικ. 82: Υπολογιστικά αποτελέσματα στροβίλου εισόδου σε πλάγια όψη, (α)1d, (β) 2d**



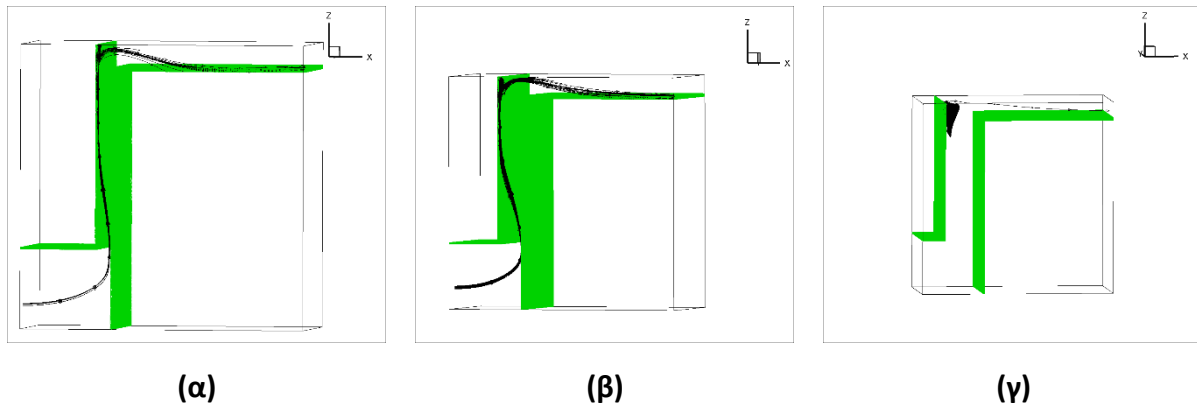
**Εικ. 83: Υπολογιστικά αποτελέσματα στροβίλου εισόδου σε πρόσοψη, (α)1d, (β) 2d**

Για τις γεωμετρίες 4d και 7d η μορφή του στροβίλου διαφέρει σε σχέση με τις 1,2 d. Ιδιαίτερα στην γεωμετρία 7d ο στρόβιλος έχει αρκετά μεγάλη έκταση, ενώ στην 4d η μορφολογία του παρουσιάζει κάποιες μικρές ομοιότητες με τους αντίστοιχους για την 1d και 2d. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι στρόβιλοι αυτοί για τις δύο γεωμετρίες με το μεγαλύτερο πλάτος κλωβού.

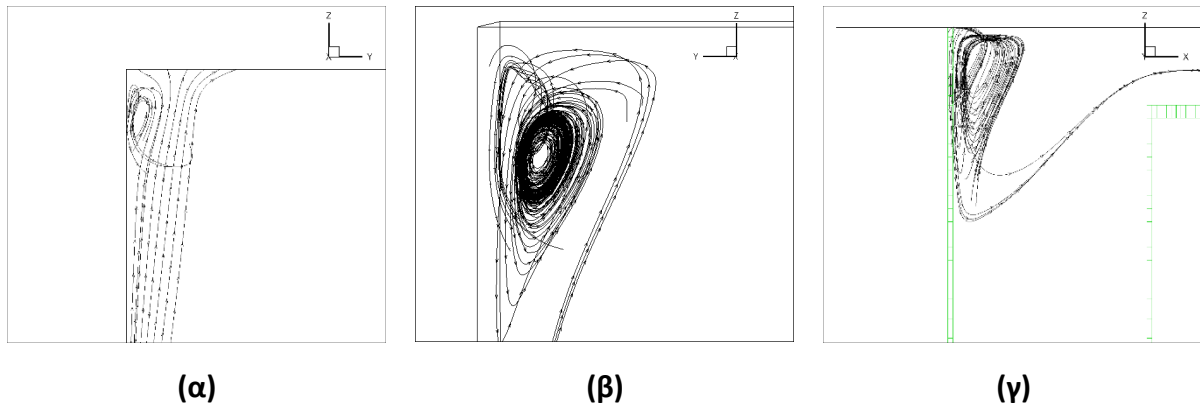


**Εικ. 84** Στρόβιλος άνω του διακένου εισόδου σε πλάγια όψη: (α) 4d, (β) 7d

Για τις γεωμετρίες πλάτους 1d, 2d, 4d παρατηρείται εμφάνιση στροβίλου στην άνω γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ του ανώτατου άκρου του υπολογιστικού χωρίου και της κάθετης σε αυτό στερεάς επιφάνειας, γυάλινη όψη, ο οποίος αναπτύσσεται κατά την φορά της ροής, παράλληλα στο άνω όριο. Στην Εικ. 86 η γεωμετρία παρουσιάζεται σε πρόσοψη για την καλύτερη απεικόνιση του προσανατολισμού του στροβίλου και στην Εικ. 85 παρουσιάζεται η γεωμετρία μαζί με τον στρόβιλο σε τρισδιάστατη απεικόνιση.



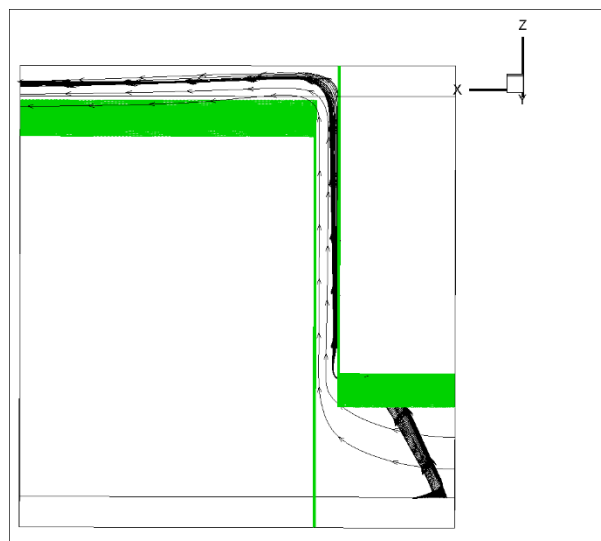
**Εικ. 85** Τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας και του στροβίλου στην άνω γωνία , (α)1d, (β)2d, (γ)4d



Εικ. 86 Προσανατολισμός στροβίλου στην άνω γωνία , (α)1d, (β)2d, (γ)4d

## 6.6 Κλίση της ροής

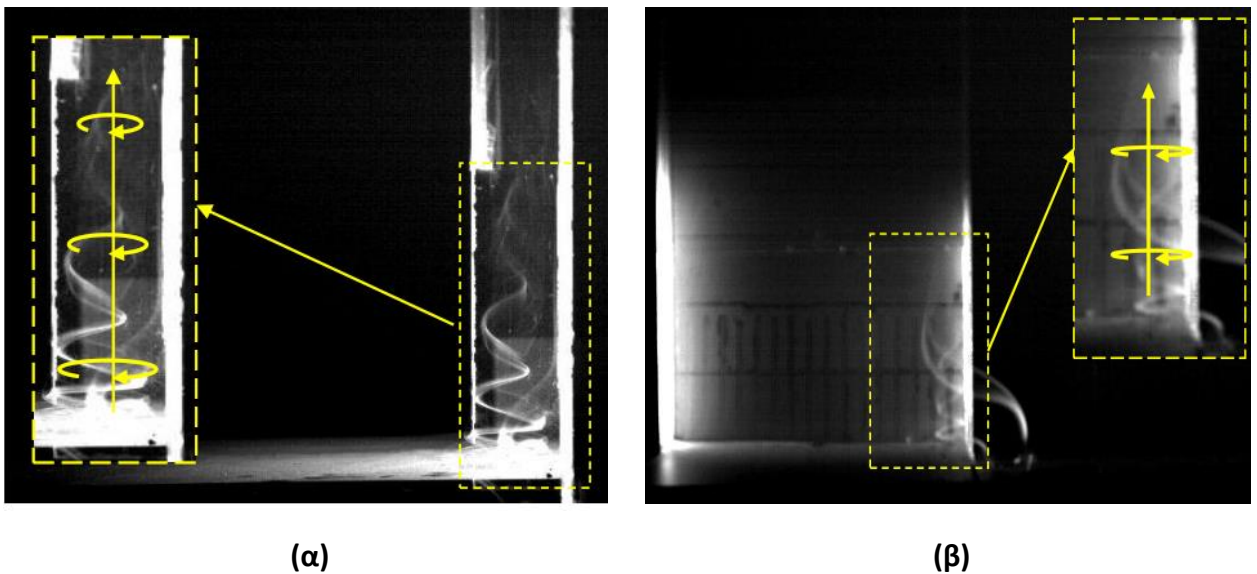
Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε στρόβιλος ο οποίος αναπτύσσεται κατακόρυφα στα πλαϊνά τοιχώματα εντός του κλωβού. Με την παρούσα υπολογιστική μελέτη ο κατακόρυφος στροβιλισμός της ροής εντοπίζεται στην είσοδο της ροής και όχι εντός του κλωβού. Παρόλα αυτά μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα τα οποία συγκρίνονται και με τα πειραματικά. Η σύγκριση θα περιέχει τις διαφορές τόσο στην διάμετρο του στροβίλου που σχηματίζεται, όσο και στην κλίση της ροής. Η οπτικοποίηση των στροβίλων θα γίνει με την χρήση ροϊκών γραμμών. Για καλύτερη εποπτεία του παρόντος θέματος παρουσιάζεται τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας στην οποία φαίνεται η θέση του στροβίλου και η φορά της ροής σε συνδυασμό με τα στερεά τοιχώματα (Εικ. 87).



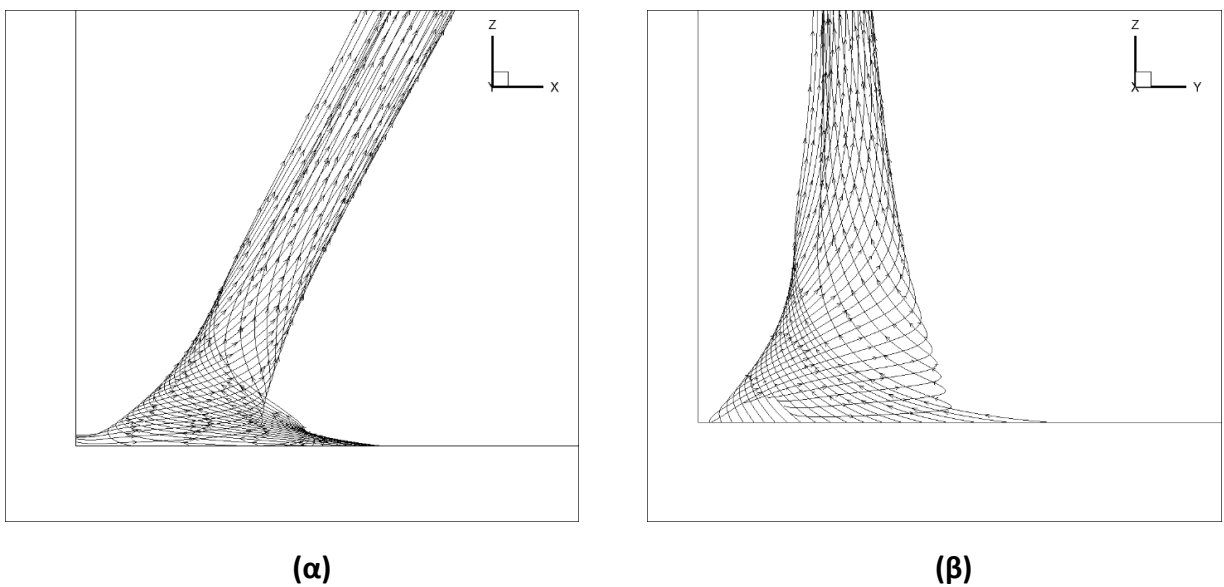
Εικ. 87 Φορά της ροής και θέση κατακόρυφου στροβίλου για όλες τις γεωμετρίες

### 6.6.1 Γεωμετρία 1d

Για την γεωμετρία πλάτους κλωβού 0.125m παρουσιάζονται αρχικά οι κάθετες δίνες οι οποίες αναπτύσσονται στα πλαϊνά τοιχώματα και προέρχονται από την πειραματική μελέτη της κατασκευής. Οι στρόβιλοι αυτοί αναπτύσσονται εντός του κλωβού στην πειραματική διάταξη ενώ με την υπολογιστική μελέτη παρουσιάζονται στην είσοδο της ροής στην εγκατάσταση. Το κοινό στοιχείο για τις δύο περιπτώσεις είναι πως οι κατακόρυφοι στρόβιλοι αναπτύσσονται στην είσοδο της κάθε γεωμετρίας. Στην επίλυση του πεδίου με υπολογιστικές μεθόδους γίνεται χρήση αγωγού εισόδου για την επίτευξη σύγκλισης της διαδικασίας.



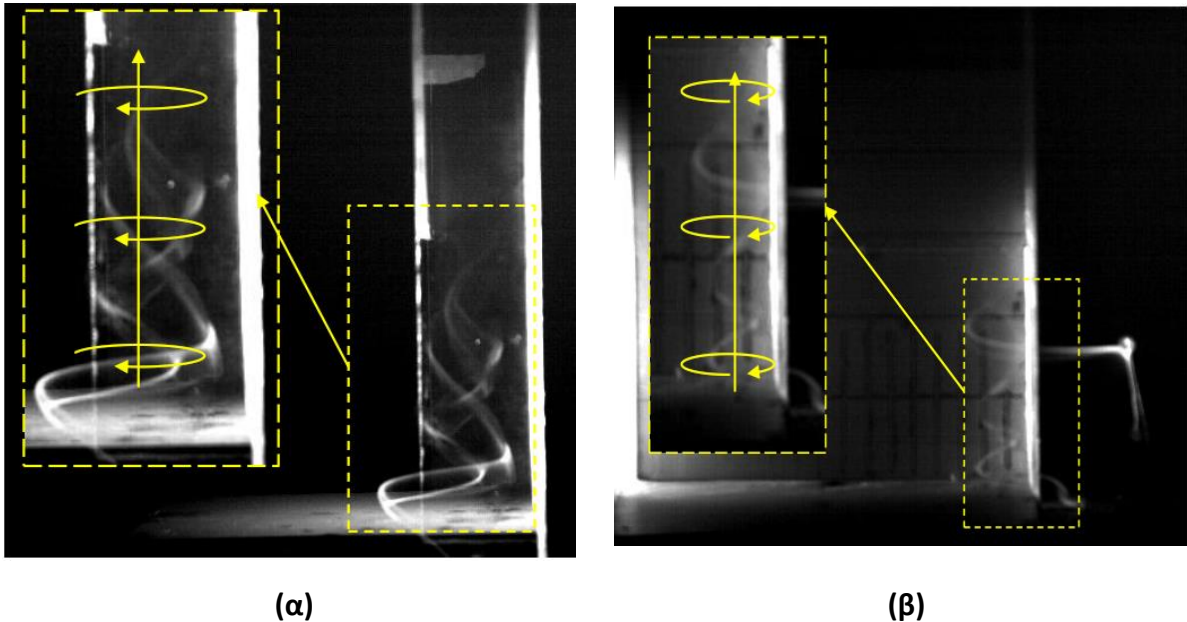
Εικ. 88:Γεωμετρία 1d πειραματικών αποτελεσμάτων (16) (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη



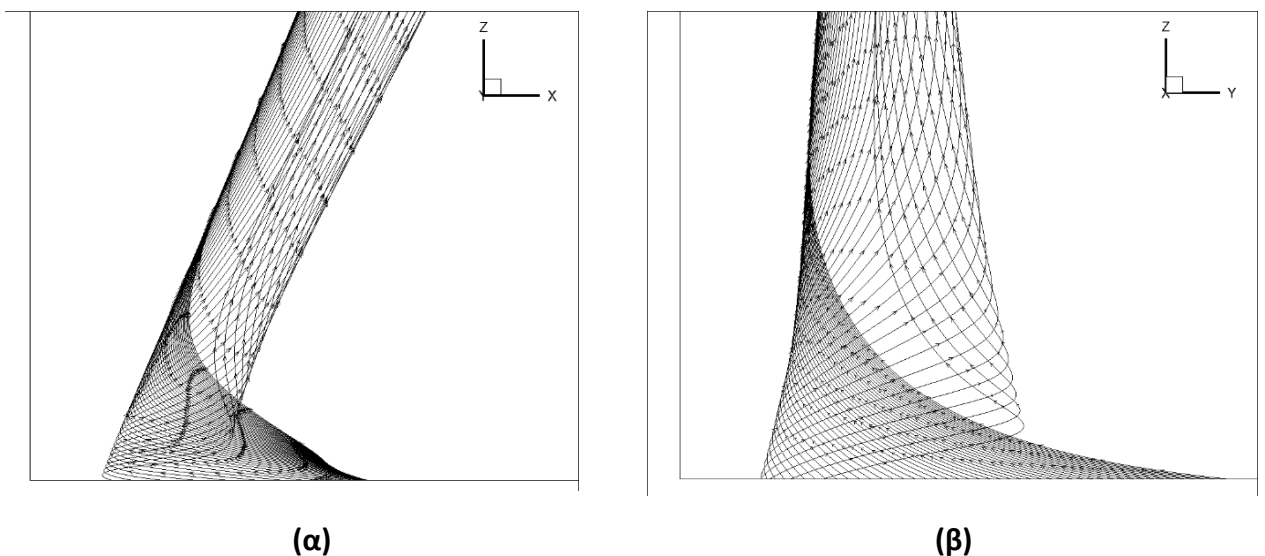


Εικ. 89: Γεωμετρία 1d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη

### 6.6.2 Γεωμετρία 2d

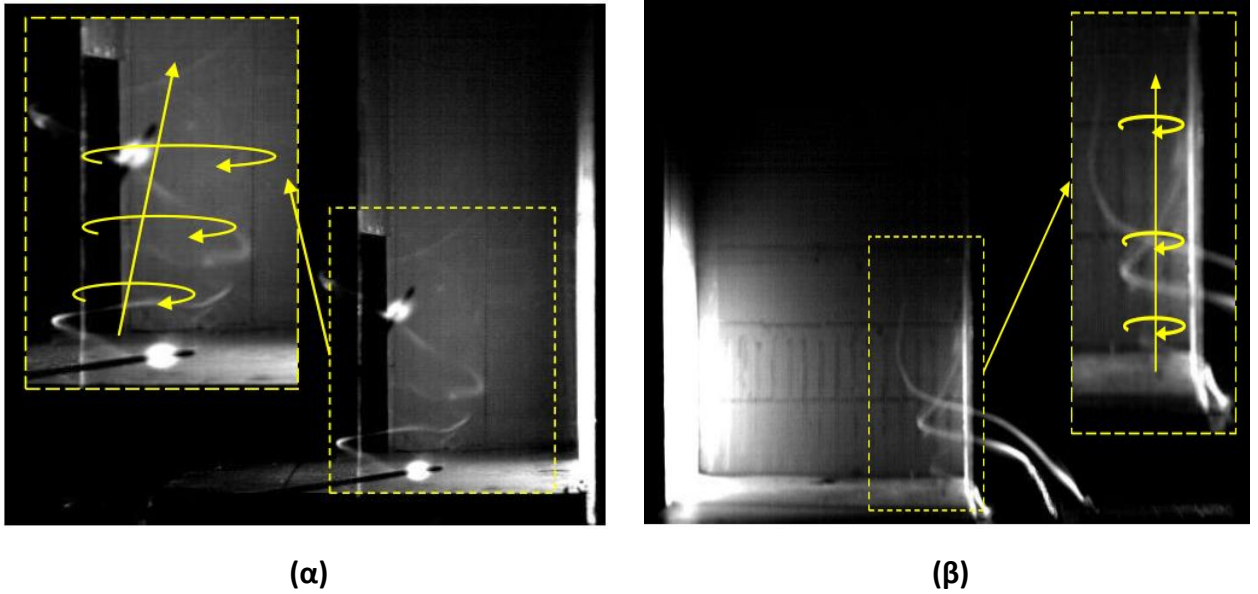


Εικ. 90: Γεωμετρία 2d πειραματικών αποτελεσμάτων (16) (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη

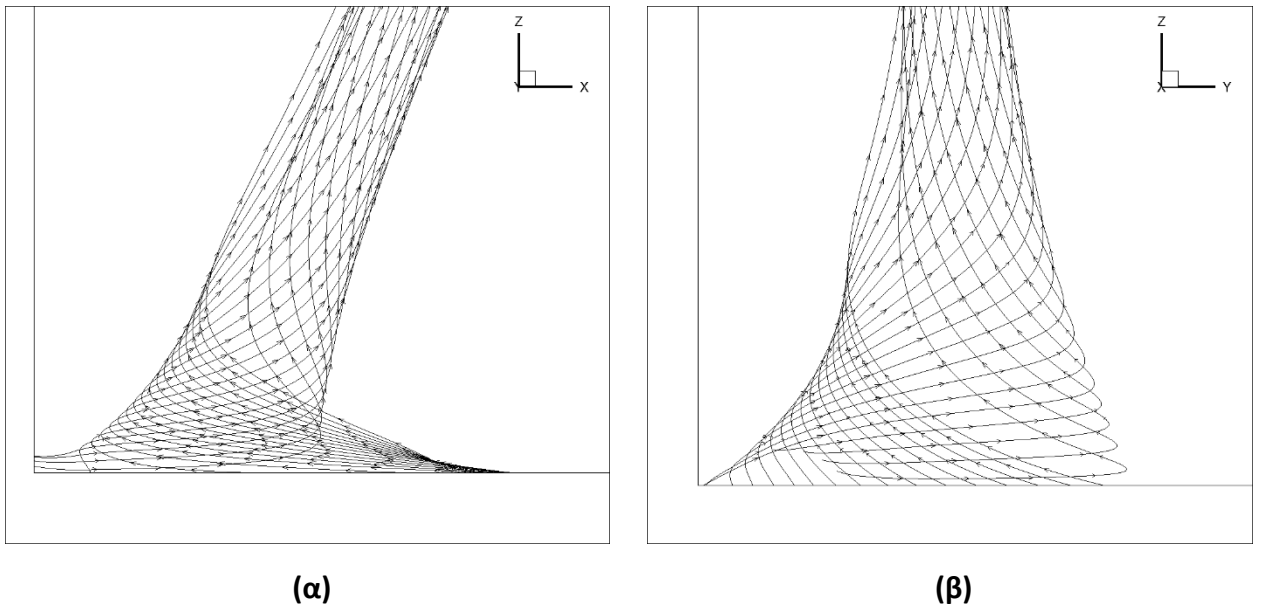


Εικ. 91: Γεωμετρία 2d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη

### 6.6.3 Γεωμετρία 4d

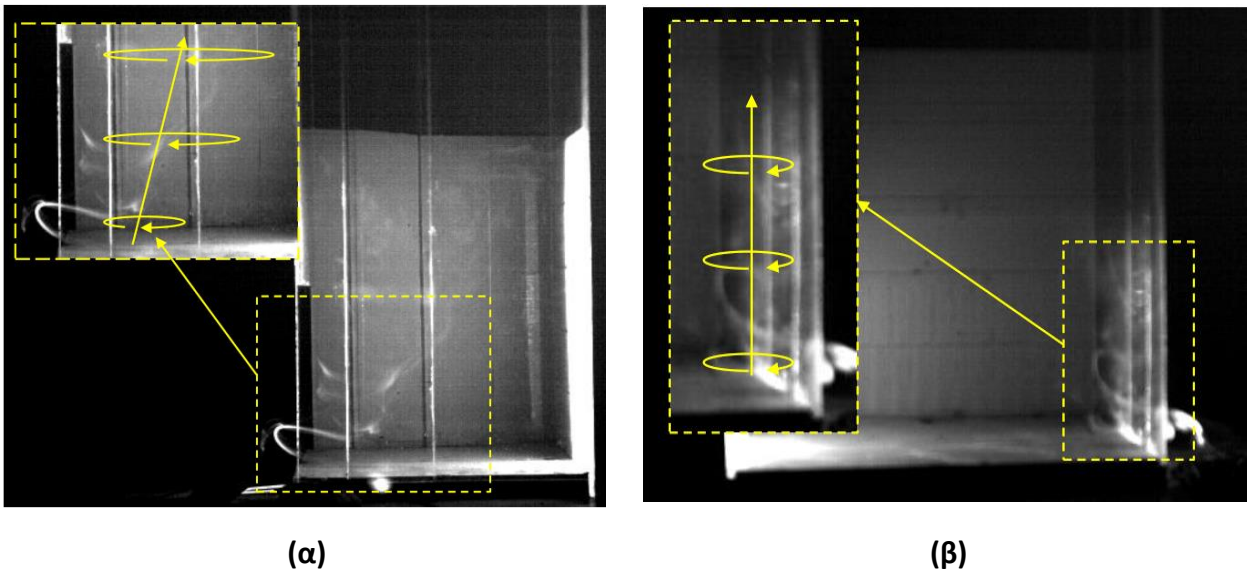


Εικ. 92: Γεωμετρία 4d πειραματικών αποτελεσμάτων (16), (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη

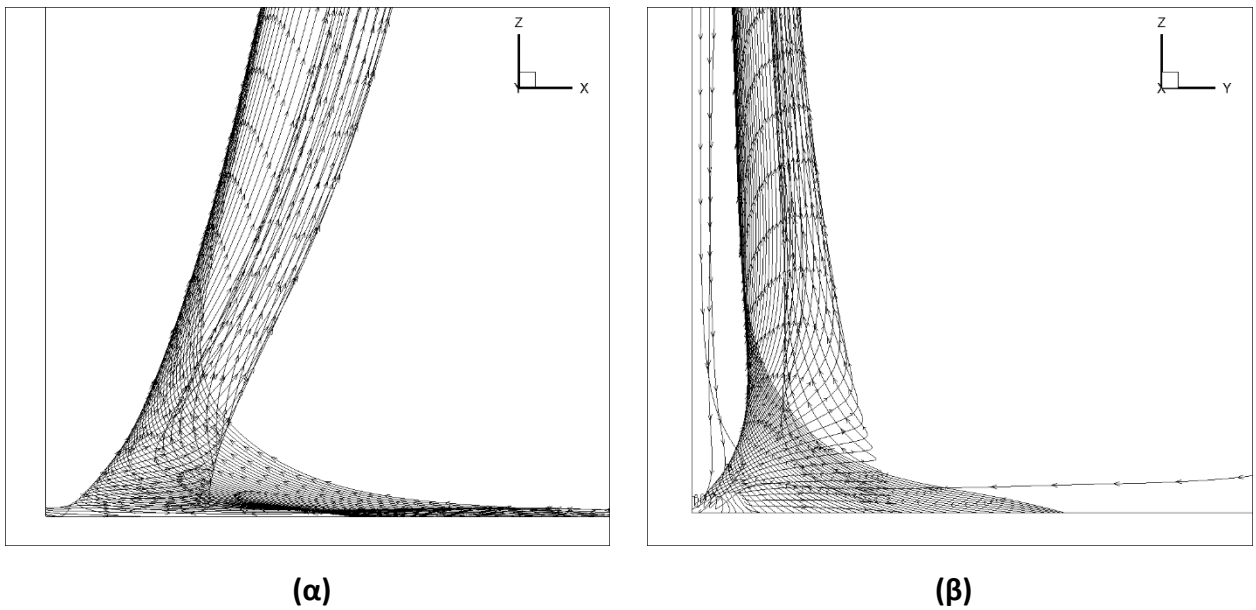


Εικ. 93: Γεωμετρία 4d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη

### 6.6.4 Γεωμετρία 7d

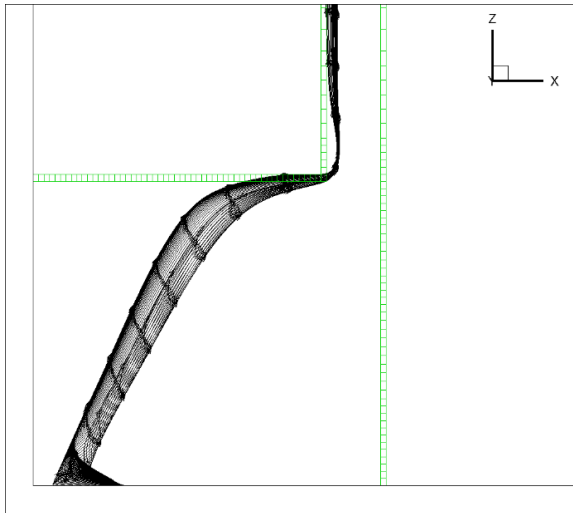


Εικ. 94: Γεωμετρία 7d πειραματικών αποτελεσμάτων (16), (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσψη

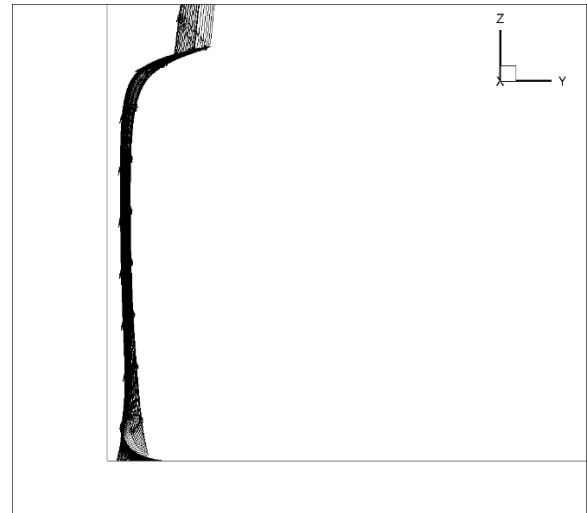


Εικ. 95: Γεωμετρία 7d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσψη

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα οι στρόβιλοι στις περιπτώσεις 1d, 2d αναπτύσσονται κατακόρυφα, όπως παρουσιάζεται και μέσα από τις Εικ. 88α Εικ. 90α. Με την υπολογιστική ανάλυση του φαινομένου οι στρόβιλοι όπως προαναφέρθηκε εμφανίζονται στην είσοδο της ροής στην γεωμετρία και όχι εντός του κλωβού. Στις Εικ. 96, Εικ. 97, Εικ. 98, Εικ. 99 θα παρουσιαστούν οι στρόβιλοι αυτοί για τις γεωμετρίες 1d, 2d, 4d, 7d αντίστοιχα.

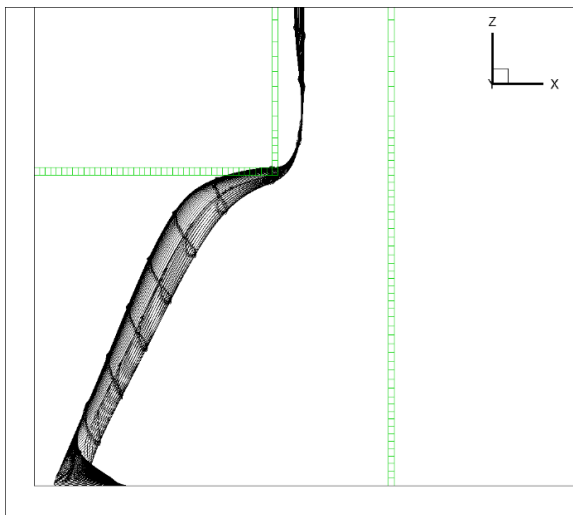


(α)

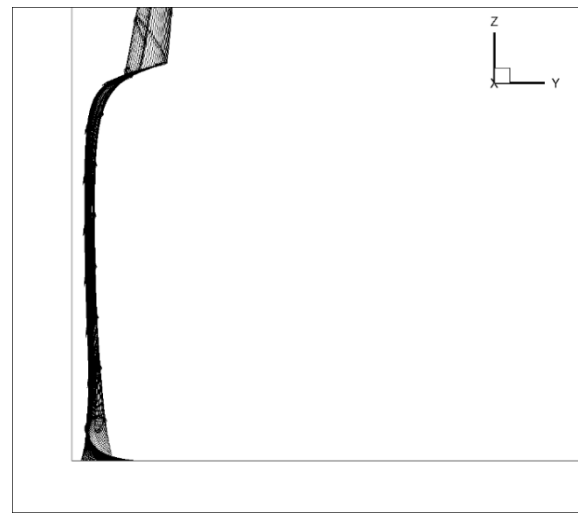


(β)

Εικ. 96: Στρόβιλος γεωμετρίας 1d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη

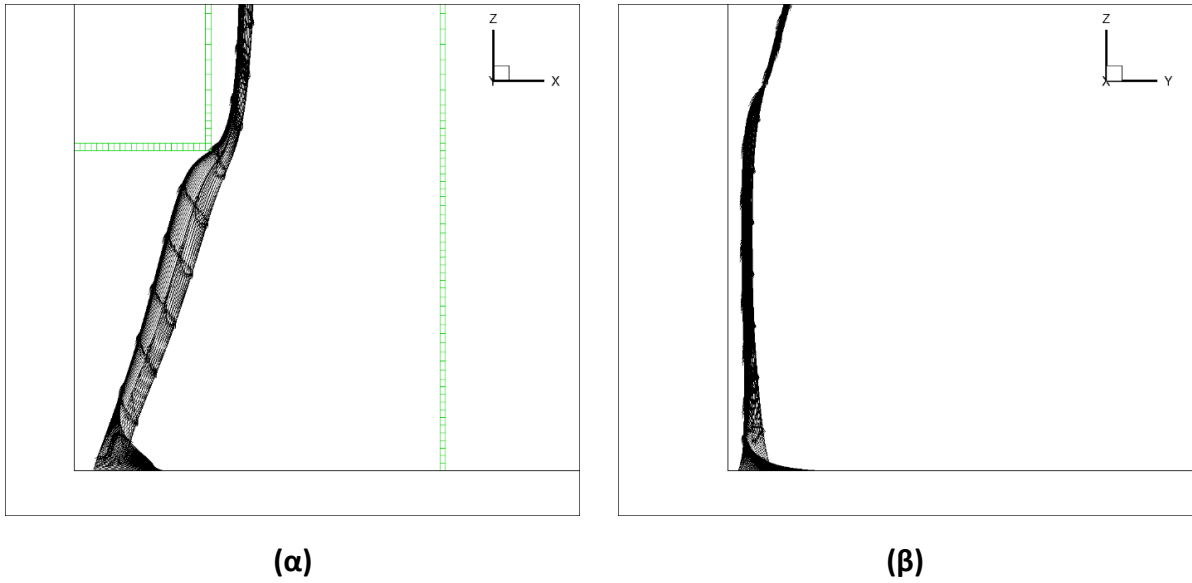


(α)

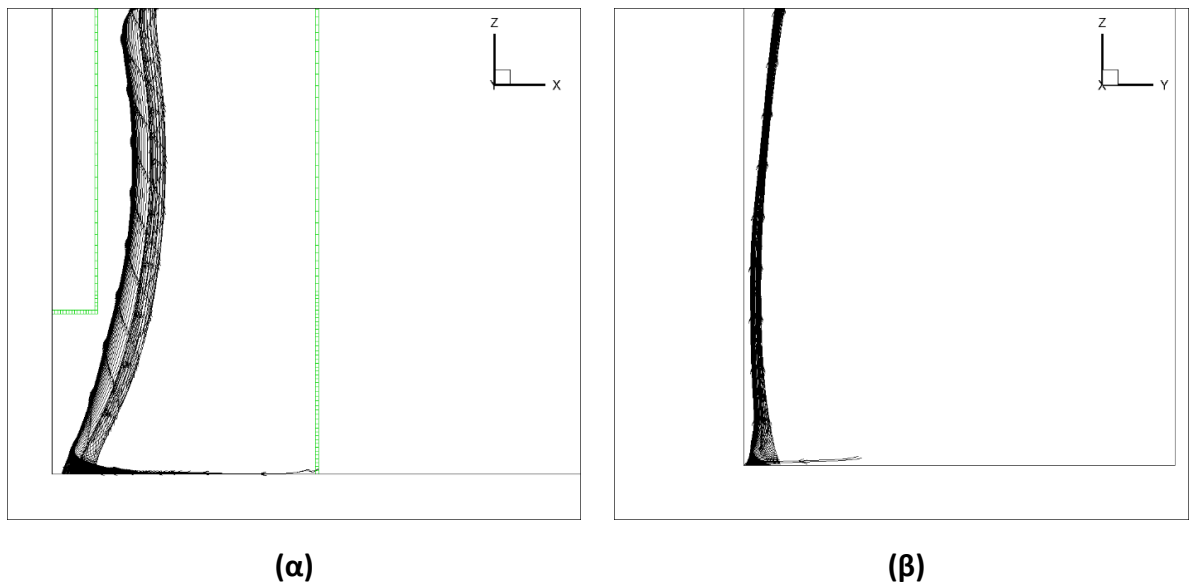


(β)

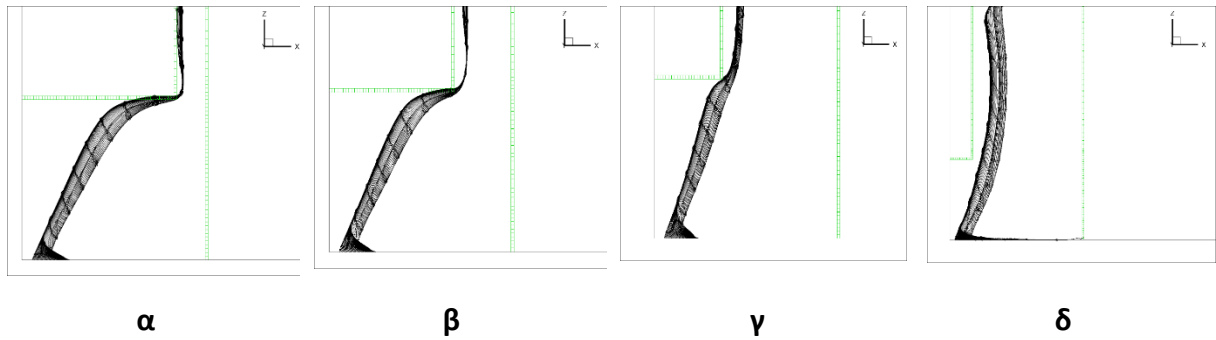
Εικ. 97: Στρόβιλος γεωμετρίας 2d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη



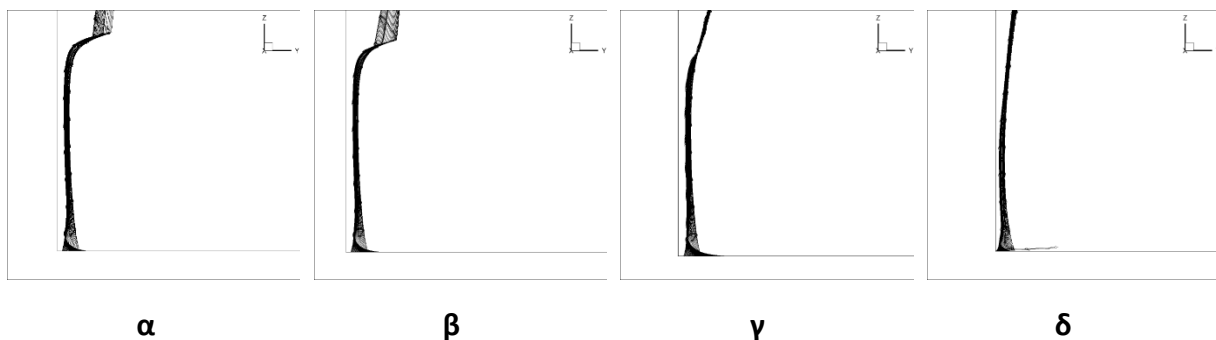
Εικ. 98: Στρόβιλος γεωμετρίας 4d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη



Εικ. 99: Στρόβιλος γεωμετρίας 7d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη

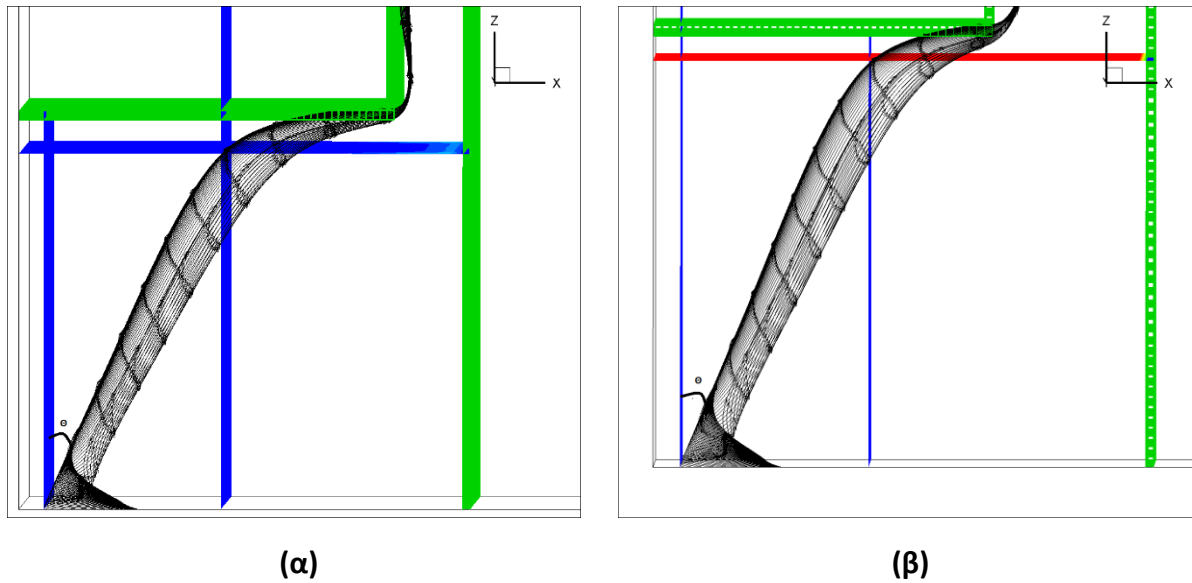


Εικ. 100: Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη , (α) 1d, (β) 2d, (γ) 4d, (δ)7d

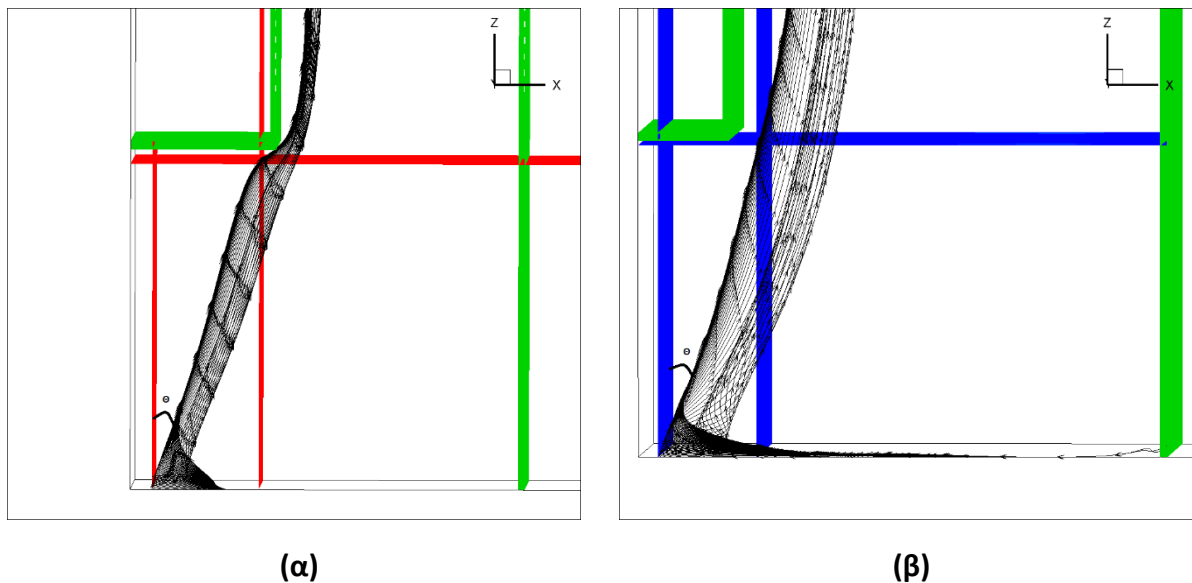


Εικ. 101: Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη , (α) 1d, (β) 2d, (γ) 4d, (δ)7d

Με βάση τις παραπάνω εικόνες (Εικ. 100 α-δ) παρατηρούμε πως καθώς το πλάτος του διακένου αυξάνεται ο στροβιλισμός της ροής τείνει να επεκτείνεται και εντός του διακένου σε ύψος άνω του  $Z=0.7m$ , το οποίο αποτελεί και το ύψος του διακένου εισόδου. Ειδικότερα στην τελευταία κατά σειρά περίπτωση, 7d. Η ανάλυση της μορφολογίας της ροής συνεχίζει απεικονίζοντας τις ροϊκές γραμμές οι οποίες αναπτύσσονται στα τοιχώματα στην είσοδο της ροής. Στην περίπτωση αυτή δίνεται έμφαση στην συνολική κατεύθυνση της ροής και όχι στην κλίση της κοντά στο δάπεδο. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι γραμμές ροής σε συνδυασμό με τα όρια του διακένου του κλωβού και του διακένου εισόδου. Με την χρήση βοηθητικών επιφανειών οι οποίες τοποθετούνται στις κατάλληλες θέσεις μπορεί να προσδιορισθεί η γωνία η οποία δημιουργείται μεταξύ της βοηθητικής επιφάνειας, η οποία βρίσκεται κάθετα στο οριζόντιο δάπεδο, και των ροϊκών γραμμών.



Εικ. 102: Κατεύθυνση της ροής στα πλαϊνά τοιχώματα, (α)1d, (β)2d



Εικ. 103: Κατεύθυνση της ροής στα πλαϊνά τοιχώματα, (α)4d, (β)7d

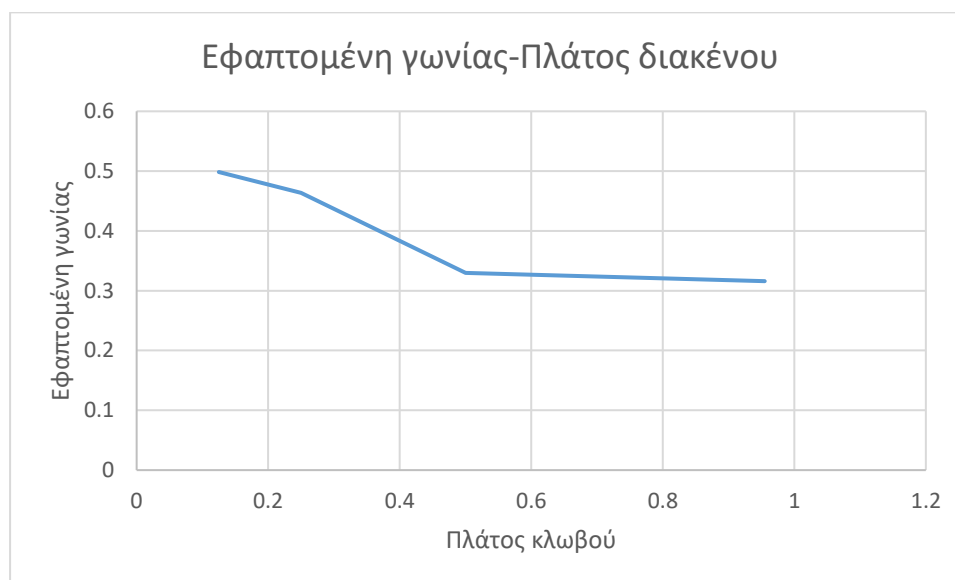
Από τις παραπάνω εικόνες εξάγεται το συμπέρασμα πως καθώς το πλάτος του κλωβού αυξάνεται η ροή τείνει να λαμβάνει μια κατακόρυφη πορεία παρά το γεγονός ότι στις περιπτώσεις 4d και 7d η κλίση της ροής είναι μεγαλύτερη στην πρώτη περίπτωση σε περιοχές κοντά στο δάπεδο της εγκατάστασης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θέσεις στις οποίες τοποθετούνται οι επιφάνειες σε κάθε γεωμετρία και η επαπτομένη της γωνίας η οποία σχηματίζεται. Η επαπτομένη υπολογίζεται ως το ημίγειο της απόστασης των δύο κατακόρυφων επιφανειών με το ύψος στο οποίο τοποθετείται η οριζόντια βοηθητική επιφάνεια.



**Πίνακας 19: Θέσεις βοηθητικών επιφανειών και εφαπτομένη γωνίας στροβίλου**

	1d	2d	4d	7d
Θέση πρώτης κατακόρυφης επιφάνειας	0.044	0.044	0.044	0.044
Θέση δεύτερης κατακόρυφης επιφάνειας	0.363	0.350	0.265	0.262
Θέση (ύψος) οριζόντιας επιφάνειας	0.640	0.660	0.670	0.690
Απόσταση κατακόρυφων επιφανειών	0.319	0.306	0.221	0.218
$\tan(\Theta)$	0.49844	0.46364	0.32985	0.31594

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται πως για μικρά πλάτη διακένου (1d, 2d) η γωνία η οποία σχηματίζεται είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν η οποία σχηματίζεται για τις περιπτώσεις 4d και 7d στις οποίες ο προσανατολισμός της ροής γίνεται ολοένα και πιο κατακόρυφος.

**Διάγραμμα 7: Εφαπτομένη γωνίας-Πλάτος διακένου**

## 6.7 Σύγκριση διαμέτρων κατακόρυφων στροβίλων

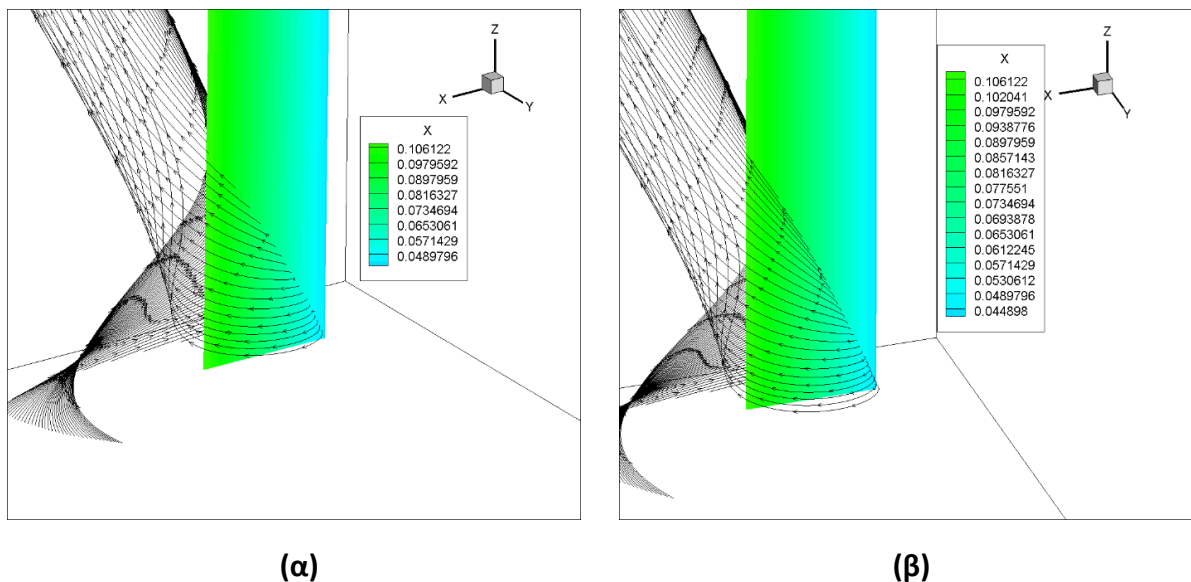
Επόμενο βήμα αποτελεί η σύγκριση της διαμέτρου του κατακόρυφου στροβίλου για τις τέσσερις περιπτώσεις που αναλύθηκαν. Η διάμετρος υπολογίστηκε με την χρήση της κατατομής της διεύθυνσης  $X$ . Με την κατάλληλη κλίμακα καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της διαμέτρου του στροβίλου. Η πειραματική ανάλυση υποδεικνύει αύξηση της διαμέτρου του κατακόρυφου στροβίλου σε σχέση με το πλάτος του διακένου και αυτό συνάδει και με τα υπολογιστικά αποτελέσματα (Διάγραμμα 8).



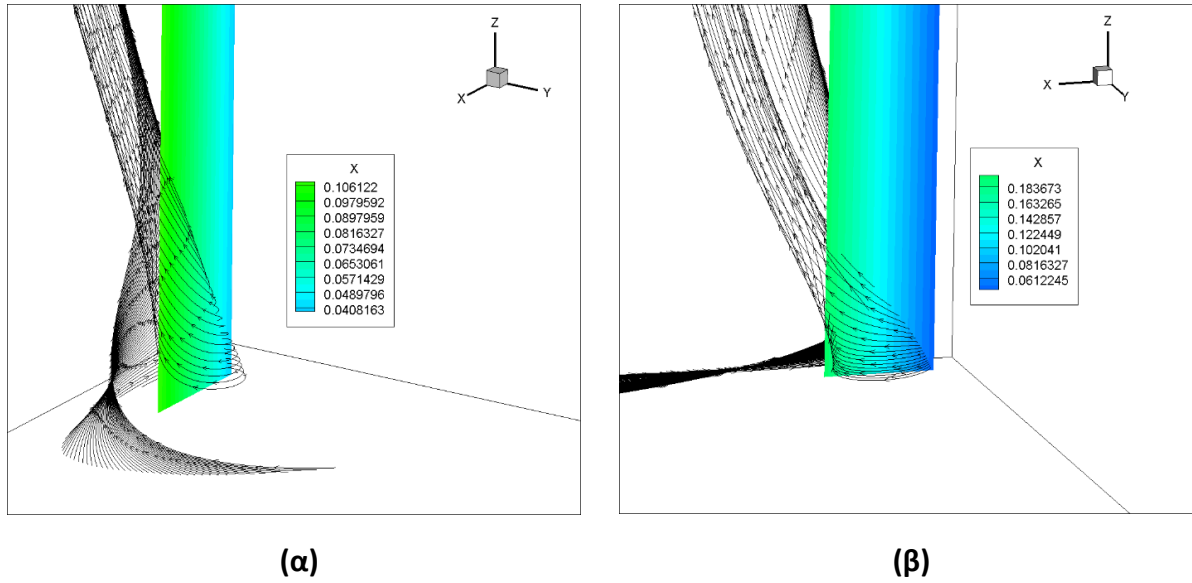
**Πίνακας 20: Διαστάσεις και διάμετρος κατακόρυφου στροβίλου**

	1d	2d	4d	7d
Πλάτος διακένου(m)	0.125	0.250	0.5	0.955
Διάμετρος στροβίλου(m)	0.066	0.066	0.07	0.156

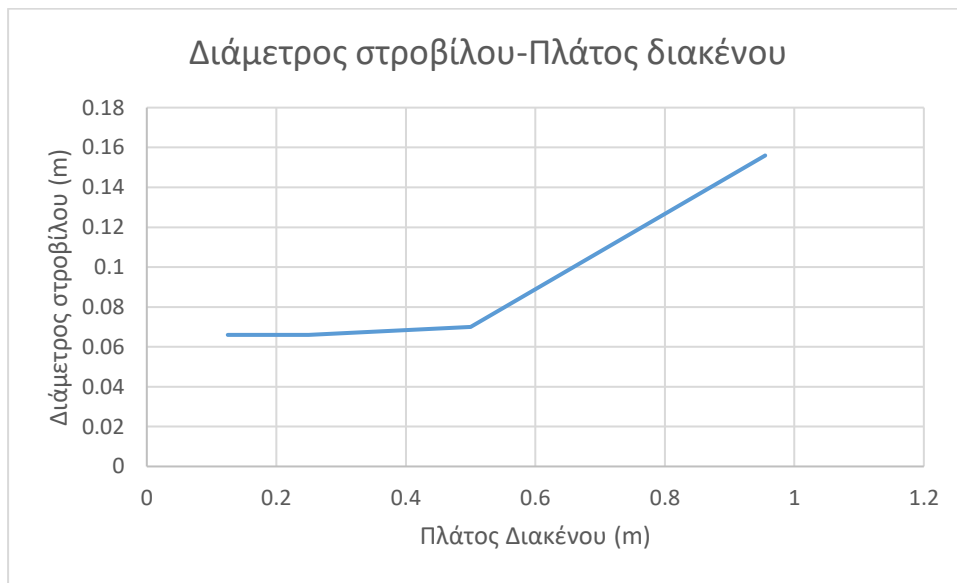
Στις παρακάτω εικόνες (Εικ. 104, Εικ. 105) παρουσιάζονται οι στροβίλοι σε συνδυασμό με την κατατομή της Χ διεύθυνσης για τις περιπτώσεις 1d, 2d, 4d, 7d. Η χρήση της κατατομής είναι βοηθητική για τον προσδιορισμό της διαμέτρου του κατακόρυφου στροβίλου. Για μικρό πλάτος κλωβού παρατηρείται το γεγονός πως η διάμετρος του κατακόρυφου στροβίλου δεν μεταβάλλεται έντονα κάτι το οποίο είναι εμφανές για τις περιπτώσεις 4d και 7d.



**Εικ. 104: Διάμετρος κατακόρυφου στροβίλου, (α)1d, (β) 2d**



Εικ. 105: Διάμετρος κατακόρυφου στροβίλου, (α)4d, (β) 7d



Διάγραμμα 8: Μεταβολή διαμέτρου στροβίλου συναρτήσει του πλάτους του κλωβού

## 7 Συμπεράσματα-Σχόλια

### 7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπούσε στην προσομοίωση της ροής αέρα σε δικέλυφη όψη κτηρίου. Η μελέτη η οποία έγινε ήταν παραμετρική ως προς το πλάτος του κλωβού, δηλαδή του “κενού” χώρου ανάμεσα στο εξωτερικό γυάλινο κέλυφος και της τοιχοποιίας του κτηρίου. Η επίλυση της ροής έγινε υπολογιστικά και τα αποτελέσματα οπτικοποιήθηκαν μέσω του Tec-plot 360. Τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από την υπολογιστική ανάλυση συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τον Ευάγγελο Τσιαπάλα (16). Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν αρχικά από δύο ξύλινες πλάκες οι οποίες αναπαριστούσαν τη βάση της κατασκευής (πάτωμα) και το άνω όριο (ταβάνι) και στην συνέχεια από πλάκες plexiglass οι οποίες αποτελούσαν την πρόσοψη, την πίσω όψη και τις πλαϊνές όψεις της κατασκευής. Για την υπολογιστική επίλυση του μοντέλου ακολουθήθηκαν οι ίδιες διαστάσεις υπό την κλίμακα 1/5 για την επίτευξη της γεωμετρικής ομοιότητας αλλά και για την δυναμική ομοιότητα ο αριθμός Reynolds μεταξύ των διάφορων περιπτώσεων ταυτιζόταν ανάμεσα στα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πτώση της μέσης πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου από την γεωμετρία καθώς αυξάνεται το πλάτος του κλωβού κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από την υπολογιστική επίλυση. Το συμπέρασμα δηλαδή που εξάγεται είναι η αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή της αδιάστατης πίεσης σε σχέση με το πλάτος του κλωβού. Στην συνέχεια τα αποτελέσματα επικεντρώνονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στροβίλων οι οποίοι αναπτύσσονται εντός του κλωβού. Για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν δημιουργείται ένας διαμήκης οριζόντιος στρόβιλος ο οποίος εντοπίζεται στην γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ του κάτω ορίου του υπολογιστικού χωρίου και της εξωτερικής τοιχοποιίας του κτηρίου. Η διάμετρος του εν λόγω στροβίλου αυξάνει με την αύξηση του πλάτους του κλωβού. Όσον αφορά στον διαμήκη οριζόντιο στρόβιλο αξίζει να σημειωθεί ότι οι γραμμές ροής οι οποίες δημιουργούνται ακολουθούν ανοδική πορεία από την στιγμή που προσκρούουν στα πλαϊνά τοιχώματα. Παρατηρήθηκε ότι για μικρότερα πλάτη διακένων η πορεία αυτή είναι σχεδόν παράλληλη στα τοιχώματα αυτά ενώ όσο αυξάνει το πλάτος αρχίζει να λαμβάνει μια κλίση. Στην συνέχεια τα αποτελέσματα του Ευάγγελου Τσιαπάλα (16) υποδεικνύουν πως για τις γεωμετρικές πλάτους κλωβού μεγαλύτερο από 0.25m εντοπίζεται στροβιλισμός της ροής στην γωνία μεταξύ της γυάλινης δικέλυφης όψης και του αγωγού εισόδου της ροής, δηλαδή στην άνω γωνία του διακένου εισόδου της ροής, κάτι το οποίο δεν εμφανίζεται σε μικρότερα πλάτη, δηλαδή για την γεωμετρία 1d. Με την υπολογιστική προσομοίωση της ροής και του Tec-plot 360 η οπτικοποίηση των ροϊκών γραμμών έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και παρατηρήθηκε ακόμα και για την γεωμετρία 1d στροβιλισμός της ροής στο αντίστοιχο σημείο. Η διαφοροποίηση μεταξύ της υπολογιστικού και του πειραματικού μοντέλου έγκειται στο γεγονός ότι για την επίτευξη της σύγκλισης της υπολογιστικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν στερεά όρια τα οποία λειτουργούν σαν αγωγός εισόδου, κατευθυντής της ροής, και με αυτό τον τρόπο οι κατακόρυφοι στρόβιλοι οι οποίοι αναπτύσσονται εντός του κλωβού στα πλαϊνά τοιχώματα της πειραματικής διάταξης μετατοπίζονται και εμφανίζονται στην είσοδο της ροής στο υπολογιστικό μοντέλο. Το αποτέλεσμα το οποίο προέκυψε είναι η αύξηση της της διαμέτρου

των κατακόρυφων δινών με την αύξηση του πλάτους του διακένου. Για τους εν λόγω στροβίλους καθίσταται αναγκαία η αναφορά στον προσανατολισμό της ροής. Με την αύξηση του πλάτους του κλωβού η ροή τείνει να λαμβάνει μια πιο κατακόρυφη πορεία και αυτό το συμπέρασμα εξάγεται από τον υπολογισμό της εφαιπτομένης της γωνίας η οποία σχηματίζεται μεταξύ μίας νοητής επιφάνειας κάθετη ως προς το δάπεδο η οποία τοποθετείται στην αρχή του στροβίλου και των ροϊκών γραμμών. Καταληκτικά όσον αφορά τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν αξίζει να γίνει και αναφορά και στους στροβίλους οι οποίοι αναπτύσσονται στο άνω τμήμα της γεωμετρίας. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε στρόβιλος στην γωνία η οποία σχηματίζει η εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου και του άνω ορίου του, δηλαδή στο σημείο στο οποίο η ροή αλλάζει κατεύθυνση και από κατακόρυφη γίνεται ξανά οριζόντια.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η χρήση γυάλινων δικέλυφων όψεων είναι μία καινοτομία η οποία έχει πολλά περιθώρια ανάπτυξης στο μέλλον. Για τον λόγο αυτό είναι εφικτό να γίνουν και περαιτέρω μελέτες τόσο στον προσανατολισμό της ροής αέρα εντός αυτή όσο και σε ενεργειακά θέματα των εγκαταστάσεων στα οποία δύναται να επιφέρει λύσεις και τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην μορφολογία της ροής με την μεταβλητή η οποία να αλλάζει ανά περίπτωση να είναι το πλάτος του κλωβού. Ενδιαφέρον ζήτημα θα αποτελούσε και η παραμετρική μελέτη ως προς το ύψος της κατασκευής, καθώς τα κτήρια τα οποία εφαρμόζεται δεν είναι συμβατικές πολυκατοικίες αλλά μεγάλα κτήρια. Ταυτόχρονα στην παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρθηκε το γεγονός ότι χρησιμοποιείται αγωγός εισόδου για την καλύτερη σύγκλιση των εξισώσεων. Έρευνα θα μπορούσε να γίνει για τον προσδιορισμό των καλύτερων δυνατών διαστάσεων του αγωγού αυτού και η προσαρμογή του σε πραγματικά μοντέλα κτηρίων. Ταυτόχρονα όσον αφορά στα ενεργειακά θέματα η ανάλυση του πεδίου θερμότητας θα παρουσίαζε αρκετό ενδιαφέρον καθώς και η μελέτη των μηχανισμών που μπορούν να τοποθετηθούν ώστε να γίνεται η βέλτιστη αξιοποίηση της ισχύος η οποία παράγεται από την ροή του αέρα και από την θερμότητα η οποία μπορεί να αξιοποιείται περαιτέρω. Σημαντικός παράγοντας ο οποίος μπορεί να επηρεάσει τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής είναι το κλίμα των περιοχών στις οποίες βρίσκονται τα κτήρια με γυάλινες δικέλυφες όψεις. Η μελέτη της γυάλινης δικέλυφης όψεις σε περιοχές που το κλίμα παρουσιάζει ιδιομορφίες. Υψηλά επίπεδα υγρασίας, υψηλές-χαμηλές θερμοκρασίες καθώς και αντοχή σε ισχυρούς ανέμους αποτελούν φαινόμενα τα οποία είναι πολυσύχναστα και η παραμετρική μελέτη της εγκατάστασης ως προς αυτά θα μπορούσε να μελετηθεί. Ο οικονομικός τομέας προφανώς αποτελεί και αυτός μείζον ζήτημα για την αξιολόγηση μία επένδυσης, εγκατάστασης στη συγκεκριμένη περίπτωση, και η οικονομική αξιολόγησή της σε βάθος χρόνου δύναται να δώσει αποτελέσματα για την αποδοτικότητά της. Τέλος όπως προαναφέρθηκε η εγκατάσταση αυτή χρησιμοποιείται σε κτήρια στα οποία απασχολείται ανθρώπινο δυναμικό. Η ανάλυση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας των εργαζομένων τέτοιου είδους εγκαταστάσεων θα μπορούσε να είναι ένας τομέας εξαγωγής συμπερασμάτων για τις γυάλινες δικέλυφες όψεις.

## 8 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ. 1: Δικέλυφη όψη σε όλο το ύψος του κτηρίου (3).....	12
Εικ. 2: Δικέλυφη όψη σε υποτμήματα του κτηρίου: (α) Κιβωτοειδούς παραθύρου, (β) Κιβωτοειδούς αγωγού, (γ) Διαδρόμου (3).....	12
Εικ. 3: (α) Εξωτερικής ανακυκλοφορίας, (β) Εσωτερικής ανακυκλοφορίας .....	13
Εικ. 4: (α) Εξωτερικού αερισμού, (β) Εσωτερικού αερισμού .....	13
Εικ. 5: Αποθήκευση αέρα .....	13
Εικ. 6 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ (11).....	16
Εικ. 7: Δικέλυφη όψη με την χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ εντός του κλωβού, PVB-DSF (12).....	17
Εικ. 8: (α) PV-DSF, (β) PV-IGU (14).....	18
Εικ. 9: Οριακό στρώμα γύρω από επίπεδη πλάκα άπειρου μήκους (18).....	24
Εικ. 10: Όγκος αναφοράς (20).....	32
Εικ. 11: Ορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλέγματος και θέσεις μεταβλητών στη βασική υπολογιστική κυψέλη (20).....	34
Εικ. 12: Αρίθμηση πλεγματικών γραμμών (20).....	36
Εικ. 13: Διαστάσεις υπολογιστικού μοντέλου .....	42
Εικ. 14: Υπολογιστικό πλέγμα σε πλάγια όψη .....	42
Εικ. 15: Υπολογιστικό πλέγμα σε πλάγια όψη, (α) στην γωνία εξόδου από το διάκενο, (β) στην γωνία εισόδου στο διάκενο .....	43
Εικ. 16: Στερεά τοιχώματα και επίπεδο συμμετρίας της γεωμετρίας.....	46
Εικ. 17: Κατανομές πίεσης, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος.....	47
Εικ. 18: Κατανομές μέτρου ταχύτητας, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος.....	47
Εικ. 19: Κατανομές μέτρου στροβιλότητας, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος.....	48
Εικ. 20: Κατανομές τυρβώδους κινητικής ενέργειας, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος.....	48
Εικ. 21: Κατανομές αδιάστατης πίεσης, (α) Περίπτωση αραιού πλέγματος, (β) Περίπτωση μέτρια πυκνού πλέγματος, (γ) Περίπτωση πυκνού πλέγματος.....	49
Εικ. 22: Διάταξη, (α) πειραματικό μοντέλο Ευάγγελου Τσιαπάλα (16), (β) πλάγια όψη πρότυπου μοντέλου Ουρδουμποζάνη (21), (γ) πλάγια όψη κλωβού Ουρδουμποζάνη (21).....	52
Εικ. 23: Περιγραφή της γεωμετρίας.....	58
Εικ. 24: Θέσεις στρόβιλων σε πλάγια όψη στην γεωμετρία.....	59
Εικ. 25: Διαμήκης οριζόντιος στρόβιλος πειραματικού μοντέλου (16).....	60
Εικ. 26: Διαμήκης στρόβιλος στην πίσω γωνία, (α) σε πρόσοψη, (β) τρισδιάστατος.....	60
Εικ. 27: Τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας, (α) Διαμήκης οριζόντιος στρόβιλος στην έξοδο, (β) Στρόβιλος στην άνω γωνία.....	61
Εικ. 28: (α) Διαμήκης οριζόντιος στρόβιλος στην έξοδο, (β) Στρόβιλος στην άνω γωνία.....	61
Εικ. 29: Μέτρο στροβιλότητας [1/sec] (α) στο πλαϊνό τοίχωμα, (β) στον άξονα συμμετρίας.....	62
Εικ. 30: Γραμμές ροής (α) από επίλυση κώδικα, (β) στο Ansys (21).....	63
Εικ. 31: Στρόβιλος και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] (α) στην άνω δίνη σε πρόσοψη, (β) στην κάτω δίνη σε πρόσοψη .....	64

Εικ. 32: Στρόβιλος και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] (α) στην άνω δίνη σε πλάγια όψη, (β) στην κάτω δίνη σε πλάγια όψη .....	64
Εικ. 33: Αδιάστατη πίεση στην είσοδο και στην έξοδο της δικέλυφης όψης .....	65
Εικ. 34: Μέτρο ταχύτητας (α) σε πλάγια όψη στο πλαϊνό τοίχωμα, (β) σε πλάγια όψη στον άξονα συμμετρίας .....	66
Εικ. 35: Περιγραφή της γεωμετρίας .....	67
Εικ. 36: Θέσεις στροβίλων στην γεωμετρία σε πλάγια όψη .....	68
Εικ. 37: Στρόβιλοι κατακόρυφου διακένου παρατηρούμενοι από πειραματική ανάλυση (16): (α) πλαϊνών τοιχωμάτων, (β) εισόδου της ροής, (γ) πίσω τοιχωμάτων .....	69
Εικ. 38 Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη παραγόμενοι από υπολογιστική διαδικασία σε τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας: (α) Στρόβιλος στην είσοδο της ροής πάνω από το διάκενο εισόδου, (β) Στρόβιλος στην πίσω γωνία .....	69
Εικ. 39 Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη παραγόμενοι από υπολογιστική διαδικασία σε πρόσοψη: (α) Στρόβιλος στην είσοδο της ροής πάνω από το διάκενο εισόδου, (β) Στρόβιλος στην πίσω γωνία .....	70
Εικ. 40 Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη παραγόμενοι από υπολογιστική διαδικασία σε πλάγια όψη: (α) Στρόβιλος στην είσοδο της ροής πάνω από το διάκενο εισόδου, (β) Στρόβιλος στην πίσω γωνία .....	70
Εικ. 41 Θέσεις στροβίλων σε τρισδιάστατη απεικόνιση: (α) Στρόβιλος στην γωνία, (β) Διαμήκης στρόβιλοι άνω διακένου .....	71
Εικ. 42 Στρόβιλοι σε δικέλυφη όψη στο άνω μέρος: (α) Στρόβιλος στην γωνία, (β) Διαμήκης στρόβιλοι άνω διακένου .....	71
Εικ. 43: Διατομές εισόδου και εξόδου από το διάκενο .....	72
Εικ. 44: Αδιάστατη πίεση στα διάκενα εισόδου και εξόδου .....	73
Εικ. 45: (α) Στρόβιλος διακένου εισόδου σε πρόσοψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (β) Στρόβιλος πίσω γωνίας σε πρόσοψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] .....	74
Εικ. 46: (α) Στρόβιλος διακένου εισόδου σε πλάγια όψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (β) Στρόβιλος πίσω γωνίας σε πλάγια όψη και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] .....	74
Εικ. 47: (α) Στρόβιλος στην γωνία πριν το διάκενο εξόδου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (β) στρόβιλος μετά το διάκενο εξόδου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] .....	75
Εικ. 48: Πλάγια όψη στροβίλου εξόδου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec] .....	75
Εικ. 49: (α) μέτρο ταχύτητας στο πλαϊνό τοίχωμα, (β) ) μέτρο ταχύτητας στον άξονα συμμετρίας .....	77
Εικ. 50: Περιγραφή γεωμετρίας .....	78
Εικ. 51: Θέσεις στροβίλων στη γεωμετρία .....	78
Εικ. 52: Μέτρο στροβιλότητας [1/sec] και στρόβιλος διακένου εισόδου, (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη στον άξονα συμμετρίας .....	79
Εικ. 53: Στρόβιλος πειραματικής διάταξης στο διακένου εισόδου (16), (α) πλάγια όψη, (β) πρόσοψη .....	79
Εικ. 54: Στρόβιλος πειραματικής διάταξης στην πίσω γωνία του κλωβού (16), (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη .....	80
Εικ. 55: Στρόβιλος κάτω γωνίας σε τρισδιάστατη απεικόνιση .....	80
Εικ. 56: Στρόβιλος πίσω γωνίας κλωβού και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη .....	81



Εικ. 57 Τρισδιάστατη απεικόνιση θέσεων στροβίλων: (α) Άνω γωνίας, (β) Οριζόντιου στροβίλου μετά την έξοδο από το διάκενο .....	82
Εικ. 58: Μέτρο στροβιλότητας [1/sec] και δίνες στο άνω τμήμα: (α) Στρόβιλος στην γωνία του άνω τμήματος, (β) Οριζόντιος στροβίλος μετά την έξοδο από το διάκενο.....	82
Εικ. 59: Κατατομές αδιάστατης πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο του κλωβού. ....	83
Εικ. 60: Περιγραφή γεωμετρίας. ....	84
Εικ. 61: Θέσεις στροβίλων στην γεωμετρία σε πλάγια όψη.....	84
Εικ. 62: Στρόβιλος στο πίσω μέρος του κλωβού (16), (α) σε πρόσοψη, (β) σε πλάγια όψη.....	85
Εικ. 63: Οριζόντιος διαμήκης στροβίλος στην κάτω πίσω γωνία σε τρισδιάστατη απεικόνιση.....	86
Εικ. 64: Στρόβιλος στο πίσω μέρος του κλωβού σε πρόσοψη, (α) χωρίς κατανομή στροβιλότητας, (β) με κατανομή στροβιλότητας [1/sec] .....	86
Εικ. 65: Στρόβιλος στο πίσω μέρος του κλωβού σε πλάγια όψη, (α) χωρίς κατανομή στροβιλότητας, (β) με κατανομή στροβιλότητας [1/sec] .....	87
Εικ. 66: Ροή εντός του κλωβού, (α) ANSYS CFX (21), (β) TEC PLOT 360.....	88
Εικ. 67: Στρόβιλος σε πλάγια όψη στον άξονα συμμετρίας και μέτρο στροβιλότητας [1/sec].	88
Εικ. 68: Στρόβιλος στο διάκενο εισόδου (16) , (α) πρόσοψη, (β) πλάγια όψη.....	89
Εικ. 69: Στρόβιλος στο διάκενο εξόδου σε πλάγια όψη, (α) χωρίς μέτρο στροβιλότητας, (β) με κατανομή του μέτρου στροβιλότητας [1/sec] .....	89
Εικ. 70: Κατατομές αδιάστατης πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο από τον κλωβό. ....	90
Εικ. 71: Κατατομή μέτρου ταχύτητας σε πλάγια όψης, (α) πλαϊνό τοίχωμα , (β) άξονα συμμετρίας.....	91
Εικ. 72: Οριζόντιοι στροβίλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16).....	94
Εικ. 73: Οριζόντιοι στροβίλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλα (16).....	95
Εικ. 74: Οριζόντιοι στροβίλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16).....	95
Εικ. 75: Οριζόντιοι στροβίλοι σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16).....	96
Εικ. 76: Διάμετρος οριζόντιων στροβίλων σε αναλογία με το πλάτος διακένου σε δικέλυφη όψη : (α) Παρούσα υπολογιστική ανάλυση, (β) Τσιαπάλας (16).....	96
Εικ. 77: Έκταση οριζόντιου διαμήκη στροβίλου στις γεωμετρίες, (α) 1d, (β) 2d, (γ) 4d, (δ) 7d.....	97
Εικ. 78: Τρισδιάστατη αναπαράσταση στροβίλου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (α) 1d, (β) 2d.....	97
Εικ. 79: Τρισδιάστατη αναπαράσταση στροβίλου και μέτρο στροβιλότητας [1/sec], (α) 4d, (β) 7d.....	98
Εικ. 80: Οριζόντιος στροβίλος στο κάτω μέρος, (α) 1d, (β) 2d, (γ) 4d, (δ) 7d.....	99
Εικ. 81: Πειραματικά αποτελέσματα στροβίλου εισόδου σε πλάγια όψη (16), (α)1d, (β) 2d.....	100
Εικ. 82: Υπολογιστικά αποτελέσματα στροβίλου εισόδου σε πλάγια όψη, (α)1d, (β) 2d.....	101
Εικ. 83: Υπολογιστικά αποτελέσματα στροβίλου εισόδου σε πρόσοψη, (α)1d, (β) 2d.....	101
Εικ. 84 Στρόβιλος άνω του διακένου εισόδου σε πλάγια όψη: (α) 4d, (β) 7d.....	102
Εικ. 85 Τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας και του στροβίλου στην άνω γωνία , (α)1d, (β)2d, (γ)4d.....	102
Εικ. 86 Προσανατολισμός στροβίλου στην άνω γωνία , (α)1d, (β)2d, (γ)4d.....	103

Εικ. 87 Φορά της ροής και θέση κατακόρυφου στρόβιλου για όλες τις γεωμετρίες.....	103
Εικ. 88:Γεωμετρία 1d πειραματικών αποτελεσμάτων (16) (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	104
Εικ. 89: Γεωμετρία 1d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	105
Εικ. 90: Γεωμετρία 2d πειραματικών αποτελεσμάτων (16) (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	105
Εικ. 91: Γεωμετρία 2d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	105
Εικ. 92: Γεωμετρία 4d πειραματικών αποτελεσμάτων (16), (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	106
Εικ. 93: Γεωμετρία 4d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	106
Εικ. 94: Γεωμετρία 7d πειραματικών αποτελεσμάτων (16), (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	107
Εικ. 95: Γεωμετρία 7d με επίλυση κώδικα (α) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (β) Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη.....	107
Εικ. 96: Στρόβιλος γεωμετρίας 1d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη .....	108
Εικ. 97: Στρόβιλος γεωμετρίας 2d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη .....	108
Εικ. 98: Στρόβιλος γεωμετρίας 4d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη .....	109
Εικ. 99: Στρόβιλος γεωμετρίας 7d, (α) σε πλάγια όψη, (β) σε πρόσοψη .....	109
Εικ. 100: Κατακόρυφος στρόβιλος σε πλάγια όψη, (α) 1d, (β) 2d, (γ) 4d, (δ)7d .....	110
Εικ. 101: Κατακόρυφος στρόβιλος σε πρόσοψη, (α) 1d, (β) 2d, (γ) 4d, (δ)7d .....	110
Εικ. 102: Κατεύθυνση της ροής στα πλαϊνά τοιχώματα, (α)1d, (β)2d .....	111
Εικ. 103: Κατεύθυνση της ροής στα πλαϊνά τοιχώματα, (α)4d, (β)7d .....	111
Εικ. 104: Διάμετρος κατακόρυφου στρόβιλου, (α)1d, (β) 2d .....	113
Εικ. 105: Διάμετρος κατακόρυφου στρόβιλου, (α)4d, (β) 7d .....	114



## 9 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τιμές του όρου πηγής (20).....	29
Πίνακας 2: Γραμμικοποιημένοι όροι πηγής (20) .....	32
Πίνακας 3: Βασικές διαστάσεις γεωμετρίας.....	41
Πίνακας 4: Διάταξη υπο-ζώνης εισόδου .....	43
Πίνακας 5: Διάταξη υπο-ζώνης εξόδου.....	44
Πίνακας 6: Διαστάσεις πλέγματος στις τρεις κατευθύνσεις και διαφορά πίεσης εισόδου εξόδου .....	44
Πίνακας 7: Διαστάσεις πλέγματος και πίεση αναφοράς.....	48
Πίνακας 8: Διαστάσεις πραγματικού μοντέλου (21) .....	52
Πίνακας 9: Πλάτη διακένων .....	53
Πίνακας 10: Ταχύτητα εισόδου, τυρβώδης κινητική ενέργεια, ρυθμός καταστροφής της τύρβης .....	57
Πίνακας 11: Διαστάσεις γεωμετρίας 1d.....	57
Πίνακας 12: Αρχικές τιμές προφίλ εισόδου .....	58
Πίνακας 13: Διαστάσεις γεωμετρίας 2d.....	66
Πίνακας 14: Αρχικές τιμές προφίλ ταχύτητας. ....	67
Πίνακας 15: Βασικές διαστάσεις γεωμετρίας.....	77
Πίνακας 16: Διαστάσεις γεωμετρίας 7d.....	83
Πίνακας 17: Αρχικές συνθήκες.....	84
Πίνακας 18: Βασικές παράμετροι γεωμετριών.....	92
Πίνακας 19: Θέσεις βοηθητικών επιφανειών και εφαπτομένη γωνίας στροβίλου .....	112
Πίνακας 20: Διαστάσεις και διάμετρος κατακόρυφου στροβίλου.....	113

## 10 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Πτώση πίεσης συναρτήσει του μεγέθους του πλέγματος .....	45
Διάγραμμα 2: Υπόλοιπα υπολογιστικών εξισώσεων σε λογαριθμική κλίμακα .....	50
Διάγραμμα 3: Υπόλοιπα εξισώσεων σε λογαριθμική κλίμακα.....	59
Διάγραμμα 4: Υπόλοιπα εξισώσεων σε λογαριθμική κλίμακα.....	68
Διάγραμμα 5: Μεταβολή μεγεθών συναρτήσει του πλάτους του διακένου .....	93
Διάγραμμα 6: Διαφορά αδιάστατης πίεσης συναρτήσει του πλάτους του διακένου .....	99
Διάγραμμα 7: Εφαπτομένη γωνίας-Πλάτος διακένου .....	112
Διάγραμμα 8: Μεταβολή διαμέτρου στροβίλου συναρτήσει του πλάτους του κλωβού .....	114

## 11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Shameri M, Alghoul M, Sopian K, Zain MFM, Elayeb O. Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011;15(3):1468-75.
2. Belgian Building Research Institute (BBRI). Source book for a better understanding of conceptual and operational aspects of active facades: Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services; 2002.
3. Χρυσομαλλίδου Ν, Καραούλης Α, Θεοδοσίου Θ. Θερμική Απόκριση Κτηρίων με Γυάλινη Δικέλυφη Όψη: Σύντομη Επισκόπηση. Πρακτικά Διεθνούς Εκθέσεως και Συνεδρίου για την Τεχνολογία Περιβάλλοντος; 3-6 Φεβρουαρίου 2005; Αθήνα.
4. Poirazis H. Double skin façades for office buildings. Lund University, Lund Institute of Technology, Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture; 2004 EBD-R--04/3.
5. Dickson A. Modelling double-skin façades [A thesis submitted for the Degree: MSc Energy Systems & the Environment]. Glasgow UK: University of Strathclyde; 2004.
6. Ahmed MM, Abel-Rahman AK, Ali AHH, Suzuki M. Double skin façade: the state of art on building energy efficiency. *Journal of Clean Energy Technologies*. 2016;4(1):84-9.
7. Bostancioglu E, Onder NP. Applying analytic hierarchy process to the evaluation of double skin façades. *Architectural Engineering and Design Management*. 2019;15(1):66-82.
8. Jiru TE, Tao Y-X, Haghighat F. Airflow and heat transfer in double skin facades. *Energy and Buildings*. 2011;43(10):2760-6.
9. Costanzo V, Yao R, Essah E, Shao L, Shahrestani M, Oliveira A, et al. A method of strategic evaluation of energy performance of Building Integrated Photovoltaic in the urban context. *Journal of cleaner production*. 2018;184:82-91.
10. Ioannidis Z, Buonomano A, Athienitis A, Stathopoulos T. Modeling of double skin façades integrating photovoltaic panels and automated roller shades: Analysis of the thermal and electrical performance. *Energy and Buildings*. 2017;154:618-32.
11. Xu C, Ma X, Francis Yu CW. Photovoltaic double-skin façade: A combination of active and passive utilizations of solar energy. SAGE Publications Sage UK: London, England; 2019.
12. Luo Y, Zhang L, Wang X, Xie L, Liu Z, Wu J, et al. A comparative study on thermal performance evaluation of a new double skin façade system integrated with photovoltaic blinds. *Applied energy*. 2017;199:281-93.
13. Fokaides PA, Kalogirou SA. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied energy*. 2011;88(12):4358-65.
14. Wang M, Peng J, Li N, Lu L, Ma T, Yang H. Assessment of energy performance of semi-transparent PV insulating glass units using a validated simulation model. *Energy*. 2016;112:538-48.
15. Luo Y, Zhang L, Liu Z, Xie L, Wang X, Wu J. Experimental study and performance evaluation of a PV-blind embedded double skin façade in winter season. *Energy*. 2018;165:326-42.
16. Τσιαπάλας Ε. Διερεύνηση Ρευστομηχανικών Φαινομένων σε Αεριζόμενες Δικέλυφες Όψεις Κτηρίων [Διπλωματική Εργασία]. Κοζάνη: Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας; 2011.
17. Τσαγγάρης Σ. Μηχανική των ρευστών. Αθήνα: Εκδόσεις Συμewν; 2005.

18. Bani-Hani EH, Assad MEH. Boundary-layer theory of fluid flow past a flat-plate: numerical solution using MATLAB. *International Journal of Computer Applications*. 2018;975:8887.
19. Μπεργελές Γ. Υπολογιστική Ρευστομηχανική. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών; 2006.
20. Μπούρης Δ. Υπολογιστικό Εργαλείο για την Αριθμητική Διερεύνηση Ρευστομηχανικών Προβλημάτων. In: Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, editor. Αθήνα 2013.
21. Ορδουμποζάνης Κ, Μπούρης Δ, Θεοδοσίου Θ. Παραμετρική μελέτη της επιρροής των κύριων γεωμετρικών παραγόντων σε δικέλυφη, φωτοβολταϊκή, υβριδικά αεριζόμενη όψη κτιρίου. Πανελλήνιο συνέδριο ΡΟΗ-2008 : «Ερευνητικές Δραστηριότητες στα Φαινόμενα Ροής Ρευστών στην Ελλάδα»; Κοζάνη 2008.