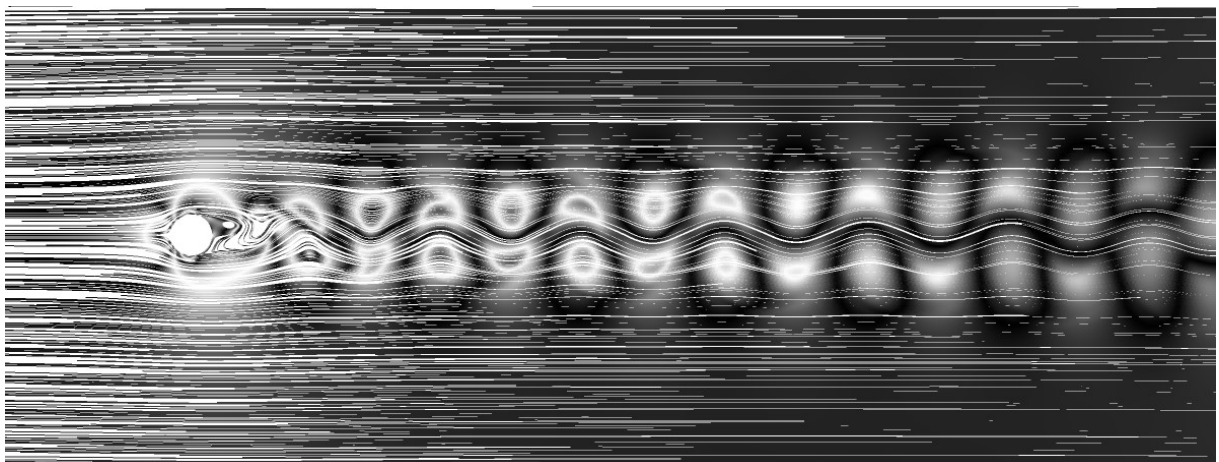




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΕΩΝ ΕΠΙ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Θεόδωρος Πότσης

ΕΜΚ ΔΕ 2019 6

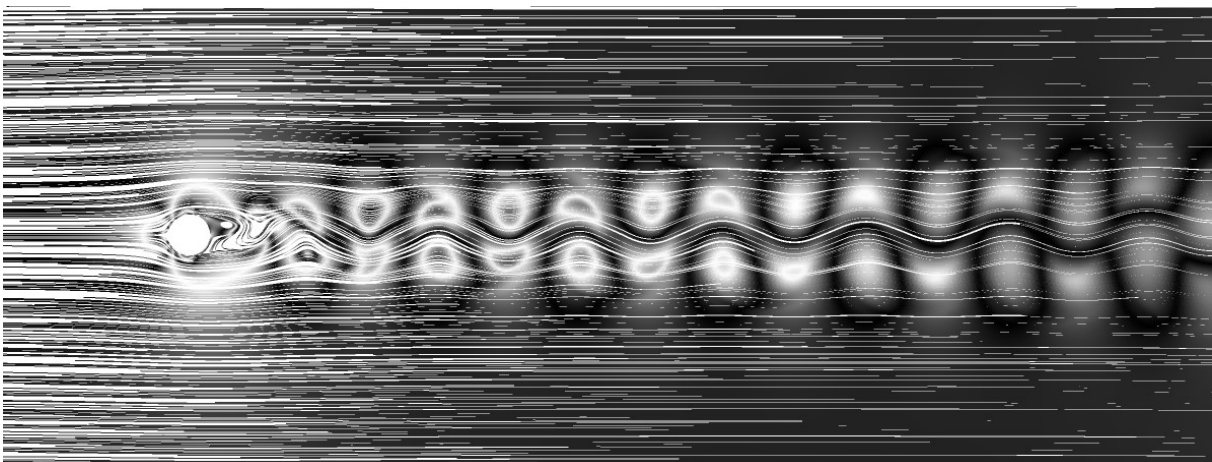
Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Άγγελος Καρβέλης, Υπ. Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΕΩΝ ΕΠΙ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Θεόδωρος Πότση

ΕΜΚ ΔΕ 2019 6

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Άγγελος Καρβέλης, Υπ. Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, 2019

Copyright © Θεόδωρος Πότση, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Theodore Potsis, 2019
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Θεόδωρος Πότσης (2019)

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019 6

Αριθμητική διερεύνηση ανεμοπιέσεων επί κυκλικών και τετραγωνικών εμποδίων
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Theodore Potsis (2019)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2019 6

Numerical investigation of wind loading on circular and square obstacles
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου ως προπτυχιακός φοιτητής στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Άγγελο Καρβέλη για την πολύτιμη βοήθεια του στην πραγματοποίηση της εργασίας και για τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου, χωρίς τις οποίες δεν θα μπορούσα να εντρυφήσω στην πολυπλοκότητα του φαινομένου. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή ΕΜΠ Χάρη Γαντέ που μου εμπιστεύτηκε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και με καθοδήγησε κατά την διάρκεια υλοποίησης του αλλά και για την αστείρευτη πηγή έμπνευσης και ορθολογισμού που αποτέλεσε στις συναντήσεις μας.

Την εργασία την αφιερώνω στον πατέρα μου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2019 6

Αριθμητική διερεύνηση ανεμοπιέσεων επί κυκλικών και τετραγωνικών εμποδίων Θεόδωρος Πότσης

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Άγγελος Καρβέλης, Υπ. Διδάκτορας ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση των αναπτυσσόμενων ανεμοπιέσεων επί κυκλικών και τετραγωνικών εμποδίων. Όταν στην ροή του ανέμου παρεμβάλλονται εμπόδια, τα οποία αποτελούν μια κατασκευή Πολιτικού Μηχανικού ή ένα δομικό μέλος της, η ανεμοπίεση που θα αναπτυχθεί ερμηνεύεται από το περιοδικό φαινόμενο της έγχυσης δινών (vortex shedding). Συγκεκριμένα δημιουργούνται δίνες στα σημεία αποκόλλησης της ροής εναλλάξ στην ομόρρους περιοχή του. Η ροή του ανέμου χαρακτηρίζεται ως μη μόνιμη ασυμπίεστη τυρβώδης ροή. Ο αριθμός Reynolds που χαρακτηρίζει την ροή συσχετίζεται με την τάξη μεγέθους της τύρβης.

Η θεωρία της ρευστομηχανικής αναφέρει ότι οι εξισώσεις URANS και RSTM εκφράζουν τα μεγέθη της ροής για κάθε χρονική στιγμή και για την επίλυση τους στρεφόμαστε σε αριθμητικές μεθόδους στα πλαίσια υπολογιστικών δυναμικών αναλύσεων ρευστομηχανικής. Από τις αναλύσεις προκύπτουν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων μελών ή των κατασκευών.

Στο πλαίσιο της εργασίας εξετάστηκαν για τα εμπόδια δύο περιπτώσεις γεωμετρικών σχημάτων, όπου η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης. Η διδιάστατη αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο λογισμικών (ANSYS και OpenFOAM), με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους καθώς επίσης και με τις προβλέψεις των κανονισμών υπολογισμού ανεμοπιέσεων και της βιβλιογραφίας. Για το κυκλικό εμπόδιο υλοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση για Re από $5 \cdot 10^5$ έως $2.2 \cdot 10^6$, ενώ για το τετραγωνικό εμπόδιο για Re από $2.2 \cdot 10^5$ έως $5 \cdot 10^5$. Από την διερεύνηση προκύπτουν συμπεράσματα για τη χρήση των λογισμικών καθώς και τις διαφορές μελών/κατασκευών με καμπύλα τμήματα ή αιχμηρές γωνίες.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2019 6

Numerical investigation of wind loading on circular and square obstacles
Theodore Potsis

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.
Co-supervisor: Aggelos Karvelis, PhD Candidate N.T.U.A

ABSTRACT

In the present study a numerical investigation of wind loading on circular and square obstacles has been conducted. When structural members or structures stand in the way of the wind flow a periodic phenomenon called vortex shedding occurs, which postulates that vortex will appear at points of detachment of the flow in the wake region of the obstacles. The wind is considered an unsteady incompressible turbulent flow and the Reynolds number relates with the magnitude of the turbulence.

The theory of flow mechanics considers that URANS and RSTM equations express the significant values of the flow and in order to solve them we apply computational methods within Computational Fluid Dynamics. From these analyses we manage to compute the aerodynamics features of individual structural members or buildings.

The study investigates two geometrical shapes where the flow is considered turbulent. The two-dimensional simulations were carried out in two softwares (ANSYS and OpenFOAM), in order to compare the results between them and also with wind loading regulations and experimental results found in the international bibliography. For the circular obstacle the Reynolds number has a range from $5 \cdot 10^5$ to $2.2 \cdot 10^6$, while for the square obstacle it varies from $2.2 \cdot 10^5$ to $5 \cdot 10^5$. The study provides an outline about the use of the softwares and also about the differences between members/structures with curved sections and those with sharp edges.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.2	EN1991-1-4	2
1.2.1	Κυκλικός Κύλινδρος	5
1.2.2	Τετραγωνικός Κύλινδρος	7
1.2.3	Φαινόμενα αεροελαστικότητας	7
1.3	Πειράματα αεροδυναμικής σήραγγας	8
1.4	Διεθνής βιβλιογραφία για τις ανεμοπιέσεις	10
2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ	11
2.1	Θεωρία ρευστομηχανικής	11
2.1.1	Οι εξισώσεις Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes για διδιάστατο πεδίο	11
2.1.2	Μοντελοποίηση της τύρβης μέσω του k- ω SST	12
2.1.3	Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά	14
2.1.3.1	Συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης	14
2.1.3.2	Συντελεστής ανύψωσης	15
2.1.3.3	Ο αριθμός Strouhal	15
2.1.3.4	Συντελεστής πίεσης	16
2.2	Αστρόβιλη ροή	16
2.3	Από την θεωρητική στην υπολογιστική ρευστομηχανική	17
2.3.1	Finite Volume Method	17
2.3.2	Συνθήκες σύγκλισης	17
2.3.3	Υπολογιστικό πλέγμα	18
2.3.4	Χρονικό βήμα ανάλυσης	18
2.3.5	Συνοριακές συνθήκες	18
2.3.5.1	Συνοριακές συνθήκες ταχύτητας	19
2.3.5.2	Συνοριακές συνθήκες πίεσης	19
2.3.5.3	Συνοριακές συνθήκες χαρακτηριστικών της τύρβης	19
2.3.6	Αρχικές συνθήκες	19
2.3.7	Οι αλγόριθμοι SIMPLE και PISO	20
2.3.8	Αλγόριθμοι επίλυσης μεγεθών	20
2.3.9	Σχήματα διακριτοποίησης	20
3	ΚΥΚΛΙΚΟ ΕΜΠΟΔΙΟ	23
3.1	Εισαγωγή στην προσομοίωση	23
3.2	Προσομοίωση για $Re=2.2 \cdot 10^6$	24
3.2.1	Υπολογιστικό πλέγμα	24

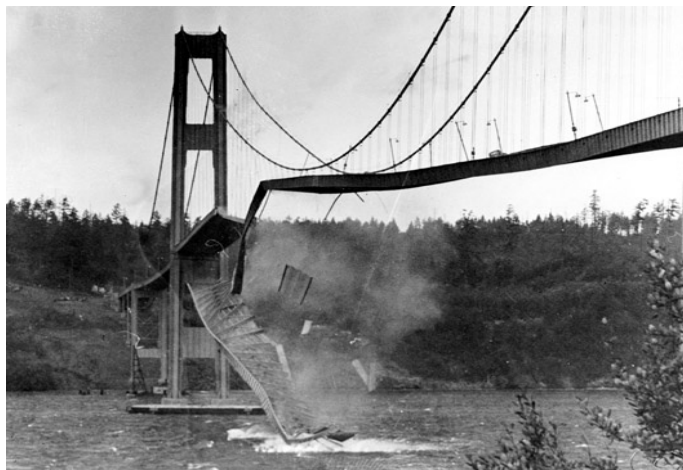
3.2.2	Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS	25
3.2.3	Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του OpenFOAM.....	28
3.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών.....	31
3.2.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και πειραματικές μετρήσεις.....	33
3.3	Προσομοίωση για $Re=5 \cdot 10^5$	35
3.3.1	Υπολογιστικό πλέγμα.....	35
3.3.2	Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS	35
3.3.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και πειραματικά δεδομένα	38
4	ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΕΜΠΟΔΙΟ.....	41
4.1	Εισαγωγή στην προσομοίωση.....	41
4.2	Προσομοίωση για $Re=2.2 \cdot 10^5$	43
4.2.1	Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS	43
4.2.2	Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του OpenFOAM.....	46
4.2.3	Σύγκριση των δύο λογισμικών.....	49
4.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και πειραματικά δεδομένα	51
4.3	Προσομοίωση για $Re=5 \cdot 10^5$	52
4.3.1	Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS	52
4.3.2	Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του OpenFOAM.....	54
4.3.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών.....	56
4.3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και με πειραματικά δεδομένα	59
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61
5.1	Περίληψη.....	61
5.2	Γενικά συμπεράσματα	61
5.2.1	Σύγκριση ανάμεσα στα λογισμικά	61
5.2.2	Διαφορές λόγω της γεωμετρίας του εμποδίου	62
5.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	63
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	65
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75

1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ

1.1 Εισαγωγή

Ο άνεμος είναι ένα φυσικό φαινόμενο που περιβάλλει οποιαδήποτε κατασκευή πραγματοποιεί ένας Πολιτικός Μηχανικός και επιδρά σε αυτήν πολλές φορές με καταστροφικές συνέπειες. Για την εξασφάλιση των κατασκευών έναντι κατάρρευσης καθώς και της απρόσκοπτης υπερδιαστασιολόγησης προκύπτει η ανάγκη του ορθότερου προσδιορισμού των ανεμοπιέσεων.

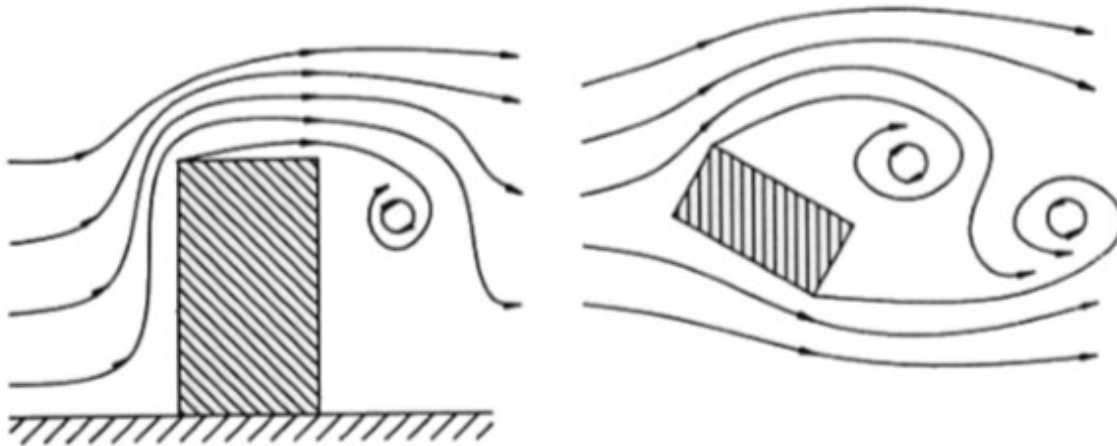
Ο άνεμος αποτελεί μια χρονικά μεταβαλλόμενη φόρτιση η οποία μπορεί να είναι κρίσιμη για εύκαμπτους στατικούς φορείς. Ως εύκαμπτος φορέας μπορεί να εννοηθεί ένα ψηλό κτίριο, μια ανεμογεννήτρια, μια γέφυρα και γενικότερα κατασκευές οι οποίες είναι ευάλωτες σε περιοδικές διεγέρσεις λόγω μεγάλου μήκους σε συνδυασμό με μικρό βάρος. Ένα κλασσικό παράδειγμα είναι η κατάρρευση της γέφυρας Tacoma Narrows που συνέβη το 1940 με μια ταχύτητα ανέμου μόλις 19 m/s και απεικονίζεται στο Σχήμα 1-1 [12].



Σχήμα 1-1: Κατάρρευση της γέφυρας Tacoma Narrows λόγω ανεμοπιέσεων [12]

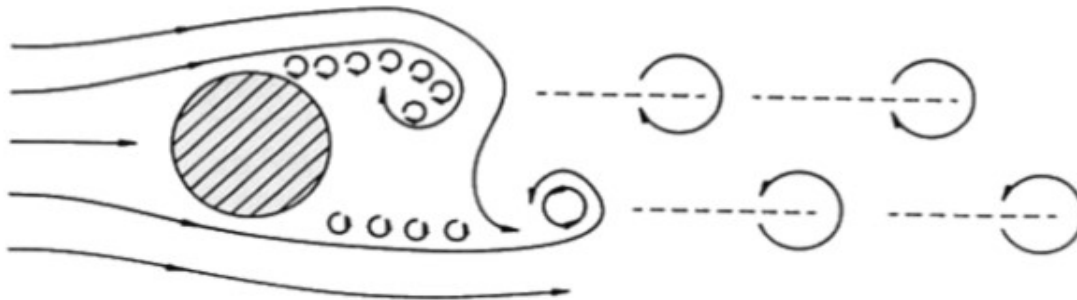
Η δυναμική παράμετρος της ανεμοφόρτισης είναι αρκετά σημαντική για τον σχεδιασμό μιας τέτοιας κατασκευής και μια δυναμική ανάλυση ρευστομηχανικής απαιτείται για να αποφευχθεί η υπερδιαστασιολόγηση που δεν αποτρέπει την δυναμική διέγερση και αυξάνει το κόστος και το ίδιο βάρος.

Όταν στην ροή του ανέμου παρεμβάλλονται εμπόδια, όπως μέλη ή κτιριακές κατασκευές, τότε δημιουργούνται στροβιλισμοί ομόρους του εμποδίου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-2. Οι δίνες που θα δημιουργηθούν σχετίζονται με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του εμποδίου και οφείλονται για την μεταβολή των πιέσεων σε αυτό.



Σχήμα 1-2: Ροή γύρω από κατασκευή [1]

Σύμφωνα με το παραπάνω φαινόμενο, οι δίνες θα γεννηθούν σε σημεία αποκόλλησης εναλλάξ ομόρους του εμποδίου με μια καθορισμένη συχνότητα για κάθε ταχύτητα ανέμου (Σχήμα 1-3). Εάν αυτή η συχνότητα ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής θα προκληθεί συντονισμός ο οποίος μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για ένα στατικό σύστημα. Ακόμη σημαντικό είναι ότι και αν δεν έχουμε συντονισμό, αυτή η περιοδική διέγερση προκαλεί κόπωση στα εκάστοτε μέλη και ταλαντώσεις οι οποίες μπορεί να είναι κρίσιμες για τους ελέγχους λειτουργικότητας.



Σχήμα 1-3: Δημιουργία δινών στην υπήνεμη πλευρά [1]

Η παραπάνω διέγερση προκαλείται στην διεύθυνση κάθετα στον άνεμο. Στον άξονα της διεύθυνσης του ανέμου οι δυνάμεις είναι περιοδικές αλλά με πολύ μικρότερη διακύμανση και δεν προκαλούν τόσο έντονες ταλαντώσεις κατά μήκος του εμποδίου μιας και οι δίνες που εντείνουν το φαινόμενο ουσιαστικά δρουν στην κάθετη διεύθυνση.

1.2 EN1991-1-4

Στον EN 1991-1-4 [2] περιγράφεται μια εκτενής αναφορά στην πρόβλεψη και τον ασφαλή σχεδιασμό κατασκευών έναντι ανεμοπιέσεων. Παρατίθενται κάποιοι βασικοί ορισμοί:

-θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου ορίζεται ως η μέση ταχύτητα ανέμου διάρκειας 10 λεπτών, με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0.02, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου, σε ύψος 10 m πάνω από επίπεδη ανοιχτή περιοχή εδάφους και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του υψομέτρου (εάν απαιτείται).

-βασική ταχύτητα ανέμου είναι η θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου τροποποιημένη προκειμένου να λάβει υπόψη τη διεύθυνση του θεωρούμενου ανέμου και την εποχή (εάν απαιτείται).

-μέση ταχύτητα ανέμου είναι η βασική ταχύτητα ανέμου τροποποιημένη προκειμένου να λάβει υπόψη την επίδραση της τραχύτητας του εδάφους και την τοπογραφία.

-συντελεστής πίεσης: Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης δίνουν την επίδραση του ανέμου στις εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων. Οι συντελεστές εσωτερικής πίεσης δίνουν την επίδραση του ανέμου στις εσωτερικές επιφάνειες των κτιρίων. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης διακρίνονται σε καθολικούς και τοπικούς συντελεστές. Οι τοπικοί συντελεστές δίνουν τους συντελεστές πίεσης για φορτιζόμενες επιφάνειες 1 m² ή μικρότερες π.χ. για το σχεδιασμό μικρών στοιχείων και συνδέσμων. Οι καθολικοί συντελεστές δίνουν τους συντελεστές πίεσης για φορτιζόμενες επιφάνειες μεγαλύτερες από 10 m². Οι συντελεστές τελικής πίεσης δίνουν τη συνισταμένη δράση του ανέμου σε μια κατασκευή, σε δομικό στοιχείο ή τμήμα, ανά μονάδα επιφάνειας.

-συντελεστής δύναμης: οι συντελεστές δύναμης δίνουν τη συνολική επίδραση του ανέμου σε μια κατασκευή, δομικό στοιχείο ή τμήμα συνολικά, συμπεριλαμβανομένης της τριβής, εάν ρητά δεν εξαιρείται.

Αρχικά, υπολογίζεται η θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Στην συνέχεια μέσω της Εξ. (1-1) υπολογίζεται η βασική ταχύτητα ανέμου, όπου c_{dir} είναι ο συντελεστής διεύθυνσης με προτεινόμενη τιμή 1 και c_{season} είναι ο εποχιακός συντελεστής με προτεινόμενη τιμή 1.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (1-1)$$

Από την βασική ταχύτητα ανέμου υπολογίζεται από την Εξ. (1-2) η μέση ταχύτητα ανέμου, για το υψόμετρο ενδιαφέροντος z , όπου $c_r(z)$ είναι ο συντελεστής τραχύτητας που λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της μέσης ταχύτητας ανέμου στη θέση της κατασκευής λόγω του ύψους πάνω από το έδαφος και της τραχύτητας του εδάφους της προσήνεμης περιοχής στη θεωρούμενη διεύθυνση του ανέμου και $c_0(z)$ είναι ο συντελεστής ανάγλυφου που λαμβάνει υπόψη την μορφολογία του εδάφους που περιβάλλει την κατασκευή.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (1-2)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η ένταση στροβιλισμού I_v σε ύψος z που λαμβάνει υπόψη την πρόσθετη ένταση στο εμπόδιο λόγω των δινών που δημιουργούνται κατά την εξέλιξη στο φαινόμενο. Ορίζεται ως η τυπική απόκλιση του στροβιλισμού που φαίνεται στην Εξ. (1-5) διαιρούμενη με τη μέση ταχύτητα του ανέμου, Εξ. (1-3), (1-4).

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (1-3)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min} \quad (1-4)$$

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (1-5)$$

Όπου k_1 είναι ο συντελεστής στροβιλισμού που ορίζεται από το Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας με προτεινόμενη τιμή του $k_1=1.0$, c_0 είναι ο συντελεστής ανάγλυφου του εδάφους, z_0 είναι το μήκος τραχύτητας.

Από τα παραπάνω μεγέθη ο μελετητής καλείται να υπολογίζει την πίεση της ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$ σύμφωνα με την Εξ. (1-6) όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθυελλών, $c_e(z)$ είναι ο συντελεστής έκθεσης που δίνεται στην Εξ. (1-7) και q_b είναι η βασική πίεση που δίνεται στην Εξ. (1-8).

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (1-6)$$

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (1-7)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (1-8)$$

Η παραπάνω τιμή της πίεσης αιχμής εφαρμόζεται στατικά στις επιφάνειες που μας ενδιαφέρει και βρίσκουμε τα εξωτερικά εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται. Αυτή η λογική ακολουθείται κατά κόρων από τους μηχανικούς της πράξης και πράγματι φαίνεται ότι για τα συνήθη οικοδομικά αλλά και για φορείς με σχετικά απλή γεωμετρία λειτουργεί με ακρίβεια. Σημαντικό όμως είναι ότι αυτή η λογική είναι προσεγγιστική και δεν μπορεί να είναι όσο ακριβής είναι μια δυναμική ανάλυση. Επιπλέον, είναι πολύ πιθανό κάνοντας την παραδοχή ότι εφαρμόζοντας τον άνεμο στατικά θα είμαστε εξασφαλισμένοι απέναντι στην αστοχία, συχνά οδηγούμαστε σε άχαρη αύξηση των διατομών και σε γενικότερη υπερδιαστασιολόγηση της κατασκευής. Στην συνέχεια ο EN1991-1-4 αναφέρει την μέθοδο υπολογισμού των πιέσεων του ανέμου με μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως προκύπτουν από συντελεστές πίεσης και δύναμης που λαμβάνουμε από δυναμικές αναλύσεις ρευστών.

Η πίεση του ανέμου που δρα στις εξωτερικές επιφάνειες, w_e , ορίζεται στην Εξ. (1-9) όπου $q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής, z_e είναι το ύψος αναφοράς και c_{pe} είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης. Αντίστοιχα, ο υπολογισμός της εσωτερικής πίεσης δίνεται από την Εξ. (1-10) με z_i το ύψος αναφοράς και c_{pi} τον συντελεστή εσωτερικής πίεσης.

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (1-9)$$

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (1-10)$$

Η δύναμη του ανέμου που δρα σε μία κατασκευή ή σε τμήμα της προσδιορίζεται από την Εξ. (1-11) όπου $c_s c_d$ είναι ο συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής, c_f είναι ο συντελεστής δύναμης για την κατασκευή ή το στοιχείο της κατασκευής, $q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής, η οποία ορίζεται στην Εξ. (1-6), για ύψος αναφοράς z_e και A_{ref} είναι η επιφάνεια αναφοράς της κατασκευής ή στοιχείου της κατασκευής.

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (1-11)$$

Ο EN1991-1-4 δίνει τιμές για τους συντελεστές πίεσης και δύναμης για κατασκευές ή δομικά στοιχεία όπως πρίσματα, κυλίνδρους, στέγες, πινακίδες σήμανσης, επίπεδες και δικτυωτές κατασκευές κλπ. Αυτές οι τιμές περιλαμβάνουν και την επιρροή της τριβής.

Μια σημαντική παράμετρος των παραπάνω συντελεστών αλλά και του φαινομένου γενικότερα, είναι ο αριθμός Reynolds (Re) της ροής που ορίζεται από την Εξ. (1-12) και μας περιγράφει το μέγεθος της τύρβης που θα πραγματοποιηθεί στην ροή. Στην Εξ. (1-12) ως b ορίζεται η διάμετρος του εμποδίου κάθετα στην ροή, ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα ($\nu = \mu/\rho = 14.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) και $v(z_e)$ είναι η ταχύτητα αιχμής του ανέμου όπως φαίνεται στην Εξ. (1-13).

$$\text{Re} = \frac{v(z_e) \cdot b}{\nu} \quad (1-12)$$

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z_e)}{\rho}} \quad (1-13)$$

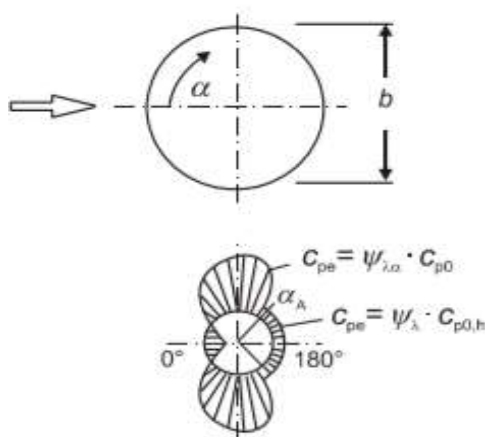
Όπως φαίνεται στην Εξ. (1-12) ο αριθμός Reynolds εξαρτάται άμεσα από την γεωμετρία και την ταχύτητα αιχμής του ανέμου. Στην συγκεκριμένη εργασία έχει δοθεί έμφαση σε εμπόδια κυλινδρικού κυκλικής και τετραγωνικής μορφής και στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εξωτερικοί συντελεστές πίεσης και δύναμης σύμφωνα με τον EN1991-1-4.

1.2.1 Κυκλικός Κύλινδρος

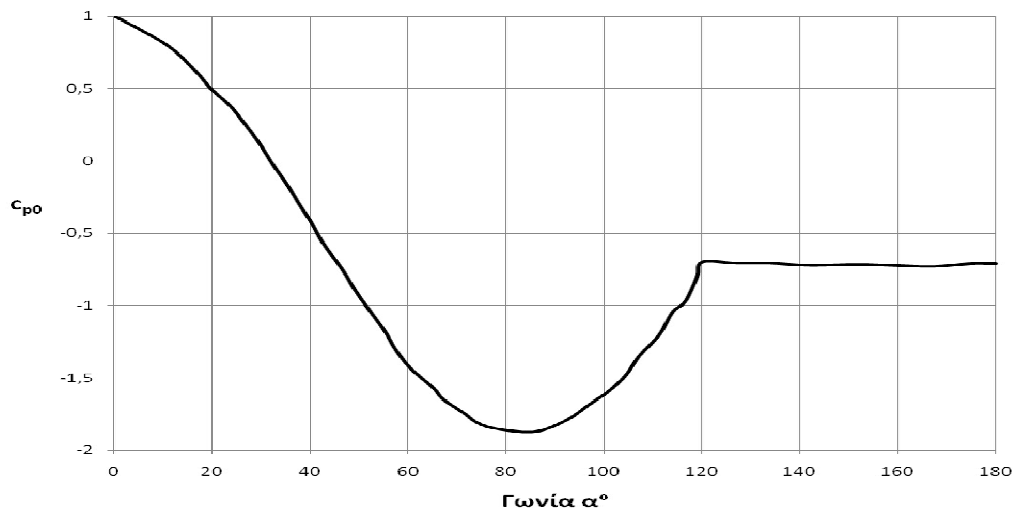
Οι συντελεστές πίεσης προσδιορίζονται από την Εξ. (1-14) όπου $c_{p,0}$ είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης χωρίς ροή ελευθέρων άκρων και $\psi_{\lambda\alpha}$ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων.

$$c_{pe} = c_{p0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \quad (1-14)$$

Ο συντελεστής πίεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1- 5 αντιστοιχεί σε $\text{Re} = 2.2 \cdot 10^6$ και στο Σχήμα 1-4 φαίνεται η γωνία α και η αντίστοιχη κατανομή των πιέσεων στον κυκλικό κύλινδρο. Ως $c_{p0,\min}$ ορίζεται η ελάχιστη τιμή του διαγράμματος του συντελεστή, ως $c_{p0,h}$ η τιμή του συντελεστή της βασικής πίεσης που πραγματοποιείται μετά την αποκόλληση της ροής. Ως α_{\min} ορίζεται η γωνία που αντιστοιχεί στην ελάχιστη πίεση και ως α_A ορίζεται η γωνία αποκόλλησης της ροής. Τα αριθμητικά στοιχεία απεικονίζονται πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 1-1.



Σχήμα 1-4: Γωνία α και κατανομή των πιέσεων στον κυκλικό κύλινδρο [2]



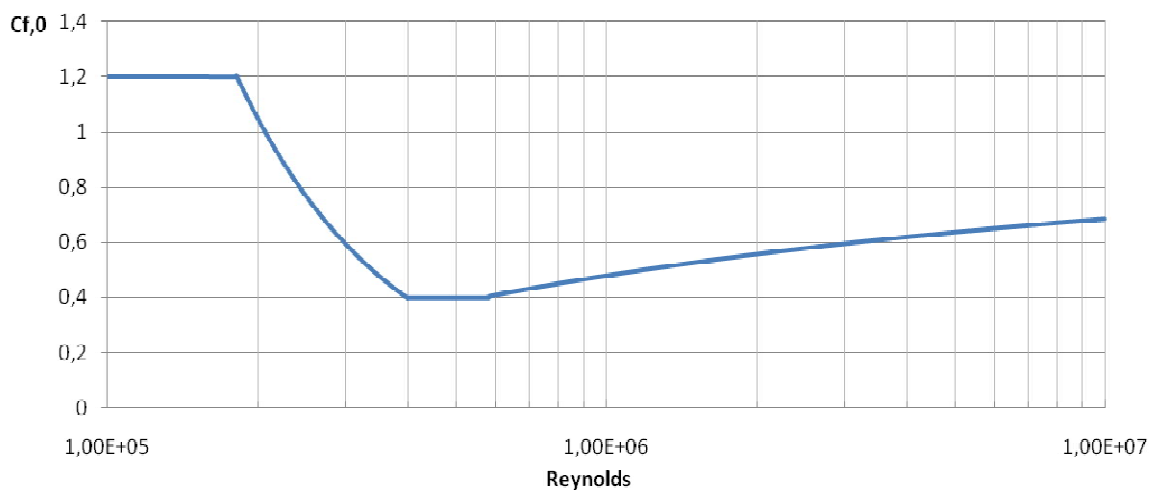
Σχήμα 1- 5: Συντελεστής πίεσης χωρίς ροή ελεύθερων άκρων συναρτήσει της γωνίας α σε μοίρες.

Πίνακας 1-1: Αριθμητικά στοιχεία διαγράμματος συντελεστή πίεσης

$\alpha_{\min} (^{\circ})$	$C_{p0,\min}$	$\alpha_{\Lambda} (^{\circ})$	$C_{p0,h}$
80	-1.9	120	-0.7

Ο συντελεστής δύναμης c_f υπολογίζεται από την Εξ.(1- 15) όπου $c_{f,0}$ είναι ο συντελεστής δύναμης κυλίνδρων χωρίς ροή ελευθέρων άκρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-6 και ψ_{λ} είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων.

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_{\lambda} \quad (1- 15)$$

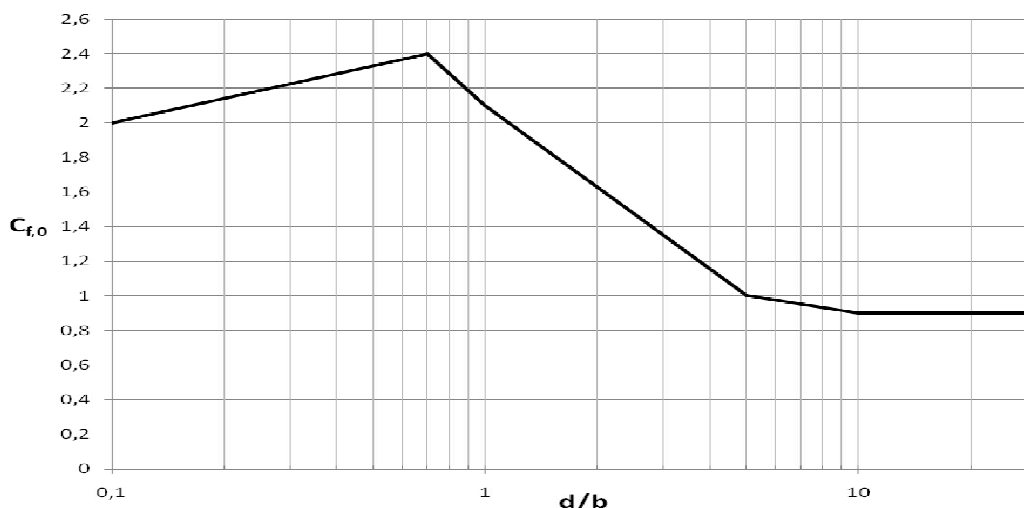


Σχήμα 1-6: Συντελεστής δύναμης κυκλικών κυλίνδρων χωρίς ροή ελευθέρων άκρων συναρτήσει του αριθμού Reynolds

1.2.2 Τετραγωνικός Κύλινδρος

Ο συντελεστής δύναμης c_f δομικών στοιχείων ορθογωνικής διατομής, όπου το φορτίο του ανέμου προσπίπτει κάθετα σε μια πλευρά, θα προσδιορίζεται από την Εξ. (1-16). Ο $c_{f,0}$ είναι συντελεστής δύναμης ορθογωνικών διατομών με αιχμηρές γωνίες και χωρίς ροή ελευθέρων άκρων όπως δίνεται στο Σχήμα 1-7 σε συνάρτηση με τον λόγο των πλευρών του ορθογωνίου με b την διάσταση κάθετα στην ροή. Ο όρος ψ_f είναι ο μειωτικός συντελεστής για τετραγωνικές διατομές με στρογγυλεμένες γωνίες και ο ψ_λ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων για στοιχεία με ροή ελευθέρων άκρων.

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda \quad (1-16)$$



Σχήμα 1-7: Συντελεστής δύναμης ορθογωνικών διατομών με αιχμηρές γωνίες και χωρίς ροή ελευθέρων άκρων συναρτήσει του λόγου των πλευρών του ορθογωνίου.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του συντελεστή πίεσης για τετραγωνικούς κυλίνδρους θα γίνει με αντίστοιχες προτεινόμενες τιμές για κατακόρυφους τοίχους που ορίζονται στα πλαίσια του EN1991-1-4.

1.2.3 Φαινόμενα αεροελαστικότητας

Σε πολλές περιπτώσεις οι Πολιτικοί Μηχανικοί ασχολούνται με εύκαμπτα μέλη/κατασκευές που επηρεάζονται έντονα από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ανέμου. Ως εύκαμπτη κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί το καλώδιο ή το τόξο μιας γέφυρας, ο πυλώνας μια ανεμογεννήτριας, μια ψηλή καμινάδα ή ένας ουρανοξύστης που είναι στατικά συστήματα τα οποία επηρεάζονται έντονα λόγω δυναμικών διεγέρσεων με ενδεχόμενο κατάρρευσης. Σε αυτά μας ενδιαφέρει περισσότερο να εξασφαλίσουμε ότι οι δυνάμεις κάθετα στον άνεμο που δημιουργούν περιοδική διέγερση προκαλούν αποδεκτές μετατοπίσεις. Σε αυτά τα έργα η δυναμική ανάλυση είναι αναγκαία ώστε να συγκρίνουμε την συχνότητα διέγερσης με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

Στην πραγματικότητα αυτό που συμβαίνει κατά την ταλάντωση ενός μέλους/κατασκευής λόγω του ανέμου καλύπτεται από την θεωρία της αεροελαστικότητας για στροβιλώδης διεγέρσεις η οποία αναφέρεται στο παράρτημα E του EN1991-1-4.

Η συχνότητα της στροβιλώδους διέγερσης συνδέεται άμεσα με την συχνότητα εναλλαγής των δυνάμεων εναλλάξ στις πλευρές του μέλους/κατασκευής και με την κατανομή των δυνάμεων κάθετα στην διεύθυνση του ανέμου. Άλλωστε αυτές οι δυνάμεις θα είναι υπεύθυνες για την περιοδική διέγερση που θα πραγματοποιηθεί και τον ενδεχόμενο συντονισμό. Η παραπάνω συχνότητα εξάγεται από το

διάγραμμα του συντελεστή πλευρικής δύναμης και αντιστοιχεί στην συχνότητα της επιβαλλόμενης εξωτερικής δύναμης.

1.3 Πειράματα αεροδυναμικής σήραγγας

Ως Πολιτικοί Μηχανικοί δεν μας ενδιαφέρει τόσο να εντρυφήσουμε στο πολύπλοκο αυτό φαινόμενο αλλά να βρούμε ένα τρόπο ώστε να πραγματοποιούμε δυναμικές αναλύσεις ρευστομηχανικής σε κατασκευές με ακριβή αποτελέσματα ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι ο σχεδιασμός μας θα είναι επιτυχημένος. Φυσικά για να γίνει αυτό απαιτούνται γνώσεις ρευστών η θεωρία των οποίων θα παρουσιαστεί στην συνέχεια αλλά η πρακτική πλευρά του προβλήματος έχει περισσότερο ενδιαφέρον.

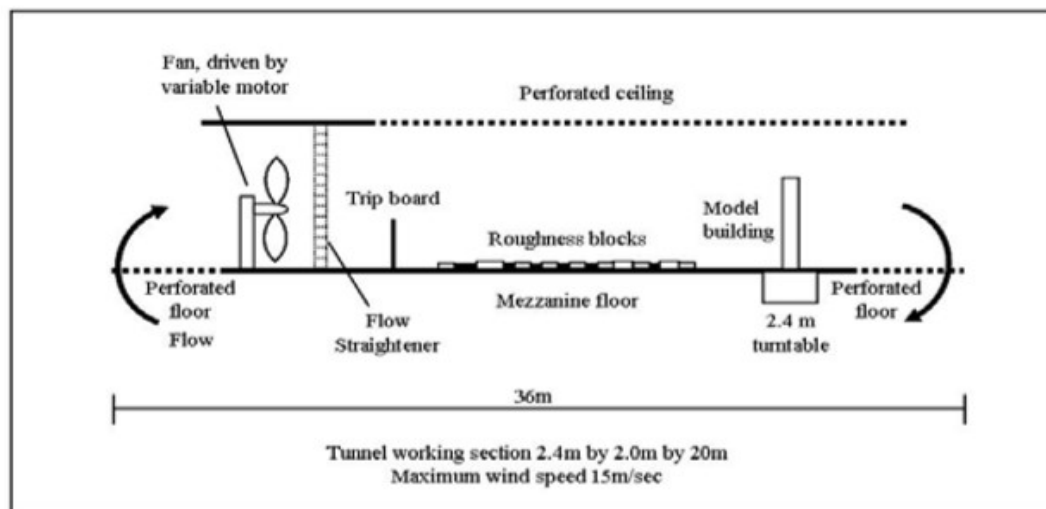
Για την εξακρίβωση των αποτελεσμάτων έχει αναπτυχθεί η λογική των πειραματικών μετρήσεων σε αεροδυναμικές σήραγγες (Wind Tunnel Testing). Η σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία όλο και περισσότερο κλίνει προς την λύση αυτή για τον υπολογισμό των ανεμοπιέσεων σε εύκαμπτες κατασκευές. Συχνά μοντελοποιείται σε μια κλίμακα και ο περιβάλλον χώρος την κατασκευής που μας ενδιαφέρει και με πειραματικές μετρήσεις προκύπτουν αποτελέσματα για τις πιέσεις που αναπτύσσονται. Για παράδειγμα σε πόλεις με αρκετούς ουρανοξύστες ένα τέτοιο πείραμα προσπαθεί να προσομοιάσει τις πραγματικές συνθήκες ως προς την γεωμετρία γύρω από την νέα κατασκευή και δημιουργούνται μοντέλα σε κλίμακα όλων των γειτονικών κτιρίων. Τα πειράματα πραγματοποιούνται για ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων και το μοντέλο είναι τοποθετημένο σε ένα βάθρο το οποίο μπορεί να περιστρέφεται ώστε να γίνει έλεγχος και για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης ανέμου. Στα Σχήμα 1-8 και Σχήμα 1-9 παρουσιάζονται εικόνες από τέτοια πειράματα και στο Σχήμα 1-10 η τυπική διάταξη μια αεροδυναμικής σήραγγας.



Σχήμα 1-8: Φωτογραφία αεροδυναμικής σήραγγας στο Monach University, Australia.[1]



Σχήμα 1-9: Φωτογραφία αεροδυναμικής σήραγγας στο Monach University, Australia.[1]



Σχήμα 1-10: Τυπική διάταξη αεροδυναμικής σήραγγας.[1]

Για να διατηρηθεί το φυσικό νόημα του προβλήματος όταν επιβάλλουμε μια κλίμακα στο προσομοίωμα η απαίτηση είναι να παραμένει ίδιος ο αριθμός Strouhal ανάμεσα στην πραγματική γεωμετρία και σε αυτήν του πειραματικού μοντέλου και προφανώς ο ίδιος αριθμός Reynolds. Έτσι για δεδομένη γεωμετρία στον πειραματικό χώρο υπολογίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα εισόδου στην σήραγγα και πραγματοποιούνται μετρήσεις. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων σε αεροδυναμικές σήραγγες είναι οι συντελεστές πίεσης και δύναμης που αναπτύσσονται κατά την εξέλιξη της ροής γύρω από το εμπόδιο.

Αυτά τα πειράματα όμως είναι αρκετά ακριβά και απαιτούν μια ολόκληρη διαδικασία την οποία προσπαθούμε να αποφύγουμε μέσα από την υπολογιστική δύναμη του σύγχρονου κόσμου. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες σε προγράμματα και πλέον ο μηχανικός είναι σίγουρος ότι μπορεί να πάρει με μεγάλη ακρίβεια αποτελέσματα ίδια με αυτά ενός πειράματος σε αεροδυναμική σήραγγα με ένα προσομοίωμα σε ένα λογισμικό Δυναμικής Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics).

1.4 Διεθνής βιβλιογραφία για τις ανεμοπιέσεις

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστούν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υπολογιστική διαδικασία της παρούσας έρευνας.

Ο CICIND [7] είναι ένας διεθνής κανονισμός με οδηγίες για τον σχεδιασμό βιομηχανικών υψηλών καμινάδων με λογική παρόμοια με αυτή του EN1991-1-4, χωρίς να αναφέρει εάν οι προτάσεις προκύπτουν από πειράματα αεροδυναμική σήραγγας ή υπολογιστικών αναλύσεων. Αναφέρεται στις ανεμοπιέσεις που αναπτύσσονται σε κυκλικά εμπόδια για ένα μεγάλο εύρος αριθμών Re και παρουσιάζει προτάσεις για του αεροδυναμικούς συντελεστές που παρατηρούνται στην κάθε ροή.

Το 1969 ο οργανισμός NASA [8] οδηγήθηκε σε μια σειρά πειραματικών μετρήσεων των ανεμοπιέσεων σε εμπόδια κυκλικής μορφής. Η τεχνική αναφορά περιγράφει τους συντελεστές δύναμης και πίεσης που αναπτύσσονται για $Re=1.8 \cdot 10^6$ και χρησιμοποιείται για την σύγκριση των αποτελεσμάτων με την προσομοίωση για $Re=2.2 \cdot 10^6$

Την ίδια χρονική περίοδο ο National Advisory Committee for Aeronautics [9] πραγματοποίησε πειράματα σε μια γκάμα από γεωμετρικά εμπόδια για ένα εύρος αριθμών Re, με σκοπό τον προσδιορισμό των αντίστοιχων συντελεστών δύναμης C_d και τον αριθμό St. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην τεχνική έκθεση γίνεται αναφορά για κυκλικά και τετραγωνικά εμπόδια για τους αριθμούς Re που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα και οι προτάσεις του συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Για εμπόδια με τετραγωνική γεωμετρία τα πειράματα που είναι διαθέσιμα στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται σε αριθμούς Reynolds μικρότερους από $2 \cdot 10^5$. Όπως ήδη αναφέρθηκε σε ένα τετραγωνικό εμπόδιο οι συντελεστές δύναμης και ανύψωσης είναι ανεξάρτητοι από τον αριθμό Reynolds και έχει ενδιαφέρον να ερευνησουμε εάν ισχύει το ίδιο και για τον συντελεστή της πίεσης. Έτσι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε γίνεται με πειράματα του Lee [10] που αναφέρονται σε $Re=1.74 \cdot 10^5$.

2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην φυσική και την αντίστοιχη μαθηματική ερμηνεία, που εδραιώνει το φαινόμενο που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.1. Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στην υπολογιστική διαδικασία που ακολουθείται για την πραγματοποίηση των υπολογιστικών δυναμικών αναλύσεων ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics).

2.1 Θεωρία ρευστομηχανικής

2.1.1 Οι εξισώσεις Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes για διδιάστατο πεδίο

Η ροή γύρω από ένα εμπόδιο, το οποίο αποτελεί ένα μέλος ή μια κτιριακή κατασκευή, στην πραγματικότητα είναι μια τυρβώδης μη μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού. Ένα τέτοιο φαινόμενο υπακούει σε αρχές διατήρησης μάζας και ορμής. Η διατήρηση της μάζας στην πραγματικότητα μας επιβεβαιώνει ότι θα υπάρχει συνέχεια στην ροή, δηλαδή όση ποσότητα ρευστού εισέρχεται τόση θα πρέπει να εξέρχεται από έναν ορισμένο όγκο αναφοράς, ο οποίος θα είναι τα κελιά του πλέγματος του υπολογιστικού χώρου. Η Εξ. (2-1) είναι γνωστή ως εξίσωση συνέχειας και η Εξ. (2-2) ως εξίσωση ορμής σε διδιάστατο πεδίο, όπου u_i είναι η ταχύτητα στην διεύθυνση i , ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, v η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα και p είναι η πίεση.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}, \text{ όπου } i = 1, 2 \quad (2-2)$$

Για ταχύτητες μικρότερες από 0,3·Mach δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στην πυκνότητα και η παραδοχή του ανέμου ως ασυμπίεστο ρευστό χαρακτηρίζεται ως λογική (όπου Mach είναι η ταχύτητα του ήχου με τιμή 340 m/s σε συνθήκες δωματίου) [3].

Το φαινόμενο της έγχυσης δινών (vortex shedding) που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.1, είναι καθαρά εξαρτημένο από τον χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε διαφορετική χρονική στιγμή θα υπάρχουν αλλαγές στην ταχύτητα και την πίεση που αναπτύσσεται στο τοίχωμα του εμποδίου.

Επομένως, η ροή χαρακτηρίζεται ως μη μόνιμη αφού ο χρονικός παράγοντας στις εξισώσεις ορμής δεν θα είναι μηδενικός.

Η ύπαρξη τύρβης ή μη, είναι χαρακτηριστικό της ροής και εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds που αναπτύσσεται. Σύμφωνα με την Εξ. (1-12) το b θα μπορούσε να είναι το μήκος της πρόσοψης ενός κτιρίου ή η διάσταση ενός μέλους, ενώ οι ταχύτητες αιχμής που παρατηρούνται έχουν τέτοιο εύρος ώστε το γινόμενο των δύο να καταλήγει συνήθως σε Re μεγαλύτερους από 10^5 . Άλλωστε και στον EN1991-1-4 ο χαμηλότερος Re για τον οποίο γίνεται αναφορά είναι 10^5 . Επομένως, για αυτής της τάξης Re είμαστε σίγουροι ότι η ροή θα χαρακτηρίζεται από έντονη τύρβη που θα είναι υπεύθυνη για τις δίνες που θα γεννηθούν και θα έχουν ένα μεγάλο εύρος μηκών.

Αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό της ροής περιπλέκει τα πράγματα αρκετά. Λόγω της τύρβης παρατηρείται ισχυρή ανάμιξη του ανέμου, ενίσχυση και τυχαιότητα διαταραχών οι οποίες αλληλεπιδρούν με τις γύρω τους με αποτέλεσμα η ροή να γίνεται χαστική και μη επαναλαμβανόμενη. Η λογική για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν να τα ορίζουμε με έναν στατιστικό τρόπο, ως άθροισμα μια μέσης τιμής και μια τιμής διαταραχής. Έτσι γράφοντας τα μεγέθη σύμφωνα με την Εξ. (2-3) καταλήγουμε στην Εξ. (2-4) που ονομάζεται Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes, όπου οι όροι $(-\overline{u'_i u'_j})$ είναι οι τάσεις Reynolds. Ο πρώτος όρος εκφράζει την χρονική εξάρτηση του προβλήματος, ο δεύτερος είναι όρος μεταφοράς, ο τρίτος όρος πίεσης, ο τέταρτος όρος τάσεων λόγω μοριακής διάχυσης και ο τελευταίος όρος τάσεων Reynolds.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad p = \bar{p} + p' \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (2-4)$$

Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει σχετικά εύκολα είναι πως χρειαζόμαστε κι άλλες εξισώσεις για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τα προφίλ ταχυτήτων, πιέσεων και τις τάσεις Reynolds (7 άγνωστοι και 3 εξισώσεις). Λογικό επόμενο είναι αυτές οι εξισώσεις να αφορούν μεγέθη που χαρακτηρίζουν την τύρβη. Η Εξ. (2-5) είναι γνωστή ως παραδοχή του Boussinesq και μας ορίζει ένα νέο πολύ σημαντικό μέγεθος που θα αποτελέσει το κλειδί για την απάντηση στο πρόβλημα.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_i^j \quad (2-5)$$

Οι όροι των τάσεων Reynolds, με αυτήν την παραδοχή, εκφράζονται συναρτήσει των κλίσεων των ταχυτήτων επί μιας αδρανειακής ποσότητας, όπως και οι όροι της μοριακής διάχυσης. Αυτή είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα του ρευστού ν_t (eddy viscosity) η οποία αντικαθιστά, ως άγνωστος, τις τάσεις Reynolds στην Εξ. (2-4).

2.1.2 Μοντελοποίηση της τύρβης μέσω του k- ω SST

Η μοντελοποίηση της τύρβης ανάγεται στον υπολογισμό της τυρβώδης συνεκτικότητας του ρευστού σε κάθε θέση του πεδίου. Για να υλοποιηθεί αυτός ο υπολογισμός αρχικά παρατηρούμε τι προκαλεί η τύρβη στην μέση ροή. Η τύρβη ουσιαστικά απορροφά κινητική ενέργεια την οποία καταστρέφει, παράγει κινητική ενέργεια λόγω διάτμησης και αυξάνει τον ρυθμό μεταφοράς της μάζας, ορμής και της ενέργειας στην κάθετη κατεύθυνση μέσω του φαινομένου της διάχυσης. Το μοντέλο που θα αναπτυχθεί στην συνέχεια και χρησιμοποιήθηκε στις υπολογιστικές αναλύσεις, ανήκει στην οικογένεια

των Reynolds Stress Turbulent Models (RSTM) και ονομάζεται k- ω SST. Δηλαδή προσθέτει άλλες δύο μερικές διαφορικές εξισώσεις στο σύστημα, το οποίο πλέον είναι επιλύσιμο, μέσω των συνιστωσών της κινητικής ενέργειας της τύρβης (k) και του ρυθμού της απόσβεσης/καταστροφής της τύρβης (ω). Οι εξισώσεις αυτές παρουσιάζονται στην Εξ. (2-6) και Εξ. (2-7) αντίστοιχα [4]. Ο όρος $G_{k,\omega}$ εκφράζει την παραγωγή της τύρβης και ο όρος $Y_{k,\omega}$ εκφράζει την απόσβεση της τύρβης στις δύο εξισώσεις. Ο όρος D_ω αποτελεί και την διαφορά του Standard k- ω μοντέλου από το Shear Stress και εκφράζει την διάχυση στην κάθετη διεύθυνση. Η Εξ. (2-8) είναι προσεγγιστική και δείχνει τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο η τυρβώδης συνεκτικότητα σε κάθε θέση του πεδίου και για κάθε χρονική στιγμή μέσω των όρων k και ω . Η πραγματική τιμή του ν_t διαιρείται με μία υπολογιστική ποσότητα η οποία δεν θεωρείται σκόπιμο να παρουσιαστεί στα πλαίσια του κεφαλαίου.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(ku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(\omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (2-7)$$

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (2-8)$$

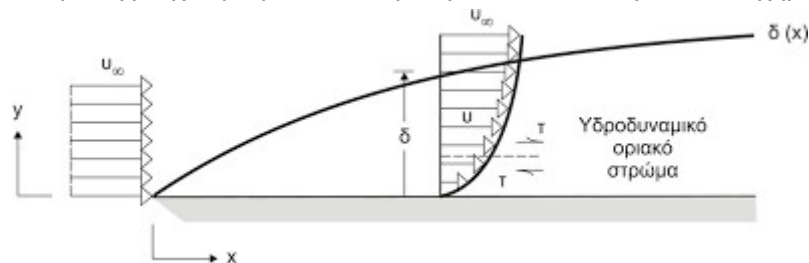
Υπάρχουν δύο εκδοχές με τις οποίες μπορούν να εφαρμοστούν τα μοντέλα τύρβης. Τα Low-Re μοντέλα επιτρέπουν την ολοκλήρωση, δηλαδή την λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων μέχρι το σταθερό όριο του τοίχου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια αυξημένη απαίτηση ως προς την πυκνωση του πλέγματος κοντά στο τοίχωμα, γεγονός που οδηγεί σε αρκετά αυξημένο υπολογιστικό κόστος και δεν προτιμήθηκε στην παρούσα διερεύνηση. Εν αντιθέσει, τα High-Re μοντέλα τύρβης χρησιμοποιούν ειδικές συναρτήσεις, γνωστές ως Wall Functions, για τον υπολογισμό των μεγεθών της τύρβης κοντά στον τοίχο μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος. Είναι φανερό ότι το υπολογιστικό πλέγμα θα μας ορίσει την εκδοχή του μοντέλου τύρβης και στην πραγματικότητα το πρώτο υπολογιστικό κελί το οποίο ονομάζουμε P. Για να εφαρμόσουμε ένα High-Re μοντέλο θα πρέπει ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

-Το κελί P να ανήκει στην λογαριθμική περιοχή του οριακού στρώματος

-Η διατμητική τάση του τοίχου είναι η τάση Reynolds $-\overline{u_1' u_2'}$

-Η παραγωγή της τύρβης θα πρέπει να είναι ίση με την απόσβεση της τύρβης στο στερεό τοίχωμα

Ως οριακό στρώμα ορίζουμε την περιοχή γύρω από το τοίχωμα στην οποία η ταχύτητα είναι μικρότερη από την ταχύτητα του πεδίου U_∞ , λόγω της ανάγκης ικανοποίησης της φυσικής συνθήκης που επιβάλλει τον μηδενισμό της ταχύτητας στο σταθερό όριο και απεικονίζεται στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1: Το οριακό στρώμα σε επίπεδη πλάκα

Έτσι ορίζουμε μια νέα μεταβλητή y^+ που ορίζει την αδιάστατη απόσταση από το στερεό τοίχωμα και δίνεται στην Εξ. (2-9), όπου u_τ είναι η ταχύτητα τριβής, τ_w είναι η διατμητική τάση στο τοίχωμα και y είναι η απόσταση του κελιού P από το στερεό όριο, και εκφράζει την επάρκεια του υπολογιστικού

πλέγματος κοντά στο τοίχωμα. Η απαίτηση του κελιού P να βρίσκεται στην λογαριθμική περιοχή του οριακού στρώματος εκφράζεται μέσω της Εξ. (2-10), όπου κ είναι η σταθερά von Karman με τιμή 0.41 και E μια εμπειρική σταθερά.

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}, \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2-9)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2-10)$$

Η μεταβλητή y^+ είναι από τα βασικότερα κριτήρια επιλογής κατάλληλου πλέγματος το οποίο απαιτείται για την σύγκλιση των λύσεων των διαφορικών εξισώσεων σε κάθε χρονική στιγμή.

2.1.3 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά

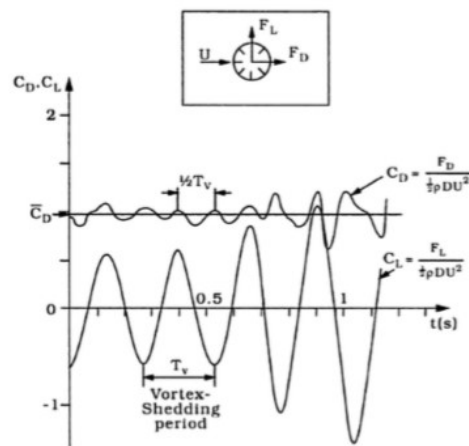
Η θεωρία που περιγράφηκε στις ενότητες 2.1.1 και 2.1.2 έχει ως στόχο την μελέτη της ροής κοντά στο στερεό τοίχωμα, στο οποίο μας ενδιαφέρει να εφαρμόσουμε τις ανεμοπιέσεις για τους ελέγχους στην οριακή κατάσταση αστοχίας ή την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας. Το αποτέλεσμα της ροής είναι δυνάμεις κατά την διαμήκη και εγκάρσια έννοια που προκαλούν πιέσεις στην επιφάνεια της κατασκευής ή του μέλους. Τα μεγέθη που περιγράφονται σε αυτή την ενότητα προκύπτουν από τον υπολογισμό των τάσεων στο στερεό τοίχωμα με επίλυση του συστήματος των εξισώσεων URANS και των εξισώσεων της τύρβης. Είναι το αποτέλεσμα των υπολογιστικών αναλύσεων ρευστομηχανικής και ο λόγος που τις κάνει μια ακριβέστερη μέθοδο υπολογισμού των ανεμοπιέσεων σε αντίθεση με μία προσεγγιστική παραδοχή, όπως αυτή της αστρόβιλης ροής, που παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.2.

2.1.3.1 Συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης C_d εκφράζεται μέσω της Εξ. (2-11), όπου F_d είναι η δύναμη στην διαμήκη διεύθυνση, A είναι το χαρακτηριστικό εμβαδόν εφαρμογής της και U_∞ είναι η ταχύτητα του πεδίου μακριά από το στερεό τοίχωμα που ταυτίζεται με την ταχύτητα αιχμής και εισόδου στο προσομοίωμα.

$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho A U_\infty^2} \quad (2-11)$$

Ο C_d μας ενημερώνει για τον τρόπο με τον οποίο θα δράσουν οι δυνάμεις του ανέμου στην διεύθυνση εφαρμογής του. Στο Σχήμα 2-2 απεικονίζεται μια τυπική χρονιοστορία του συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης για ροή γύρω από κυκλικό κύλινδρο.



Σχήμα 2-2: Ενδεικτικά διαγράμματα συντελεστή δύναμης και ανύψωσης [5]

Στις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν προτιμάται η ονομασία του ως C_d , ενώ στον EN1991-1-4 ονομάζεται $C_{f,0}$.

2.1.3.2 Συντελεστής ανύψωσης

Ο συντελεστής ανύψωσης C_l εκφράζεται μέσω της Εξ. (2-12), όπου F_l είναι η δύναμη κατά την εγκάρσια έννοια, και προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα δράσουν οι δυνάμεις στην εγκάρσια διεύθυνση του ανέμου. Από την χρονοιστορία του συντελεστή παρατηρούμε ότι διακυμαίνεται από αρνητικές σε θετικές τιμές με μέση τιμή το μηδέν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2 για το χαρακτηριστικό παράδειγμα του κυκλικού κυλίνδρου. Το φαινόμενο της αεροελαστικότητας στο οποίο μπορεί να καταλήξει η φόρτιση της εγκάρσια δύναμης αντιμετωπίζεται με ειδικές μεθόδους απόσβεσης και δεν αποτελεί κομμάτι της παρούσας έρευνας. Ακόμη, σε αρκετά έγγραφα της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφέρονται οι τιμές της Root Mean Square τιμής του, που ονομάζεται $C_{l,rms}$ (Εξ. (2-13)) η οποία επίσης υπολογίζεται και συγκρίνεται με τις αντίστοιχες προτάσεις.

$$C_l = \frac{F_l}{0.5 \rho A U_\infty^2} \quad (2-12)$$

$$C_{l,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_{l,i}^2}{n}} \quad (2-13)$$

2.1.3.3 Ο αριθμός Strouhal

Ο αριθμός Strouhal εκφράζεται στην Εξ. (2-14) όπου n είναι η συχνότητα της πλευρικής διέγερσης και εξάγεται από το διάγραμμα του συντελεστή πλευρικής δύναμης, b είναι η διάσταση του εμποδίου κάθετα στην διεύθυνση του ανέμου και U είναι η ταχύτητα αιχμής, όπως ορίστηκε στην Εξ. (1-13).

$$St = \frac{n \cdot b}{U} \quad (2-14)$$

Αποτελεί μια ακόμη παράμετρο που καθορίζει την ορθότητα των υπολογιστικών προσομοιωμάτων και το φυσικό του νόημα συνδέεται με την περίοδο διέγερσης της δυναμικής δύναμης ανύψωσης η οποία αδιαστατοποιείται ώστε να είναι συγκρίσιμη για διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες ταχύτητας εισόδου και διαφορετικές διαστάσεις, ομοίων γεωμετρικά, εμποδίων.

2.1.3.4 Συντελεστής πίεσης

Ο συντελεστής πίεσης C_p δίνεται από την Εξ. (2-15), όπου p_0 είναι μια χαρακτηριστική πίεση που ορίζεται από τον χρήστη, και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής της πίεσης που εφαρμόζεται σε ένα μέλος ή στην κατασκευή. Τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιωμάτων συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα που προτείνονται στη βιβλιογραφία και τις προσεγγίσεις του EN1991-1-4.

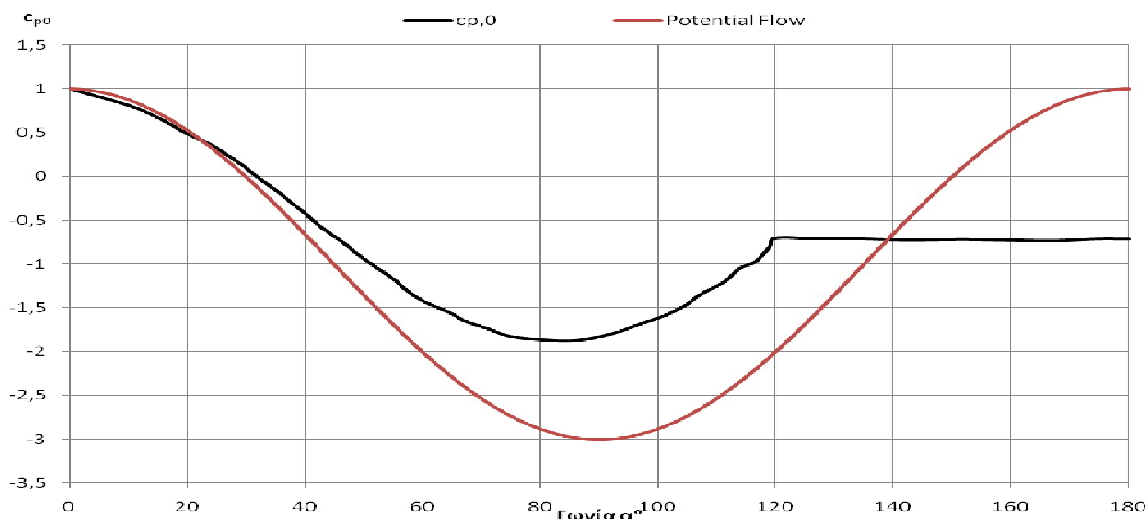
$$C_p = \frac{(p - p_0)}{0.5\rho U_\infty^2} \quad (2-15)$$

2.2 Αστρόβιλη ροή

Η θεωρία της αστρόβιλης ροής (potential flow) χρησιμοποιείται από αρκετά εμπορικά προγράμματα που δίνουν την δυνατότητα υπολογισμού των ανεμοπιέσεων σε έργα Πολιτικού Μηχανικού. Η βασική παραδοχή που κάνει αυτή η θεωρία είναι ότι η ροή είναι ατριβής και ως αποτέλεσμα δεν θα δημιουργηθούν διαμητικές τάσεις στον στερεό τοίχωμα της κατασκευής ή του μέλους. Οι εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ανεμοπιέσεων είναι η Εξ. (2-16) γνωστή ως εξίσωση Bernoulli και η εξίσωση συνέχειας (Εξ. (2-1)), ενώ η χρονική εξάρτηση αμελείται από την διαδικασία επίλυσης. Το αποτέλεσμα της επίλυσης για το παράδειγμα ενός κυκλικού εμποδίου δίνεται στην Εξ. (2-17) και στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται ο συντελεστής πίεσης που προκύπτει σε σχέση με τον συντελεστή πίεσης σε μία πραγματική ροή που στην οποία έχει ληφθεί υπόψη η τριβή.

$$p_i = \frac{1}{2}\rho U_i^2 \quad (2-16)$$

$$C_p = \frac{(p - p_0)}{0.5\rho U_\infty^2} = 1 - 4\sin^2(a) \quad (2-17)$$



Σχήμα 2-3: Σύγκριση συντελεστή πίεσης της Potential Flow σε σχέση με πραγματική ροή

Η φαινομενικά απλή αυτή παραδοχή έχει ως συνέπεια να μην λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της έγχυσης δινών και της αποκόλλησης της ροής που θα πραγματοποιηθεί. Ακόμη η ατριβής ροή σημαίνει ότι οι δυνάμεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση είναι σταθερές και έτσι αμελείται η δυναμική φόρτιση

που προκαλεί ο άνεμος και ο αναγκαίος σχεδιασμός απέναντι σε ενδεχόμενο συντονισμό. Σαν διαδικασία υπολογισμού των ανεμοπιέσεων κρίνεται ανεπαρκής, εφόσον οδηγεί σε εφαρμογή αρκετά μεγαλύτερων πιέσεων και δεν δίνει σημαντικές πληροφορίες για την ροή οι οποίες είναι ζωτικές για τον ορθό σχεδιασμό μια κατασκευής ή μέλους.

2.3 Από την θεωρητική στην υπολογιστική ρευστομηχανική

Η αποτελεσματική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την τυρβώδης μη ομοιόμορφη ροή ενός ασυμπίεστου ρευστού έχει προβληματίσει την επιστημονική κοινότητα και αποτελεί εδώ και αρκετές δεκαετίες αντικείμενο μελέτης. Εξαιτίας τη δυσκολίας που υπάρχει στην επίλυση των URANS και των RSTM στρεφόμεστε σε αριθμητικές μεθόδους με την χρήση της σύγχρονης υπολογιστικής δύναμης.

2.3.1 Finite Volume Method

Η μέθοδος που ακολουθούν τα περισσότερα υπολογιστικά εργαλεία της σύγχρονης εποχής και χρησιμοποιήθηκε για της αναλύσεις που θα παρουσιαστούν ονομάζεται Finite Volume Method. Η λογική της είναι ότι διαιρείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό όγκων το πεδίο στο οποίο πραγματοποιείται η ροή του ρευστού, όπου σε κάθε έναν απαιτείται να ισχύουν οι αρχές της διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας. Αυτοί οι πεπερασμένοι όγκοι στην πραγματικότητα αποτελούν τα κελιά του υπολογιστικού μας πλέγματος.

2.3.2 Συνθήκες σύγκλισης

Η αριθμητική μέθοδος που ακολουθείται είναι μια επαναληπτική διαδικασία για κάθε χρονική στιγμή. Σε κάθε επανάληψη ο αλγόριθμος δίνει μια τιμή στο μέγεθος που θέλει να υπολογίσει είτε αυτό είναι η ταχύτητα είτε η πίεση είτε τα μεγέθη της τύρβης. Για να ελέγξουμε εάν το μοντέλο μας συμμορφώνεται στις φυσικές συνθήκες σε κάθε μια από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις θέτουμε έναν όρο που λέγεται residual. Ο residual της κάθε εξίσωσης στην πραγματικότητα μας ενημερώνει για το αν η τιμή που έχει οριστεί από τον αλγόριθμο στην συγκεκριμένη επανάληψη είναι κοντά στην τιμή που ορίζει η λύση της μερικής διαφορικής, δηλαδή την τιμή που ψάχνουμε. Όταν ο residual πέσει σε μια τιμή που μας φαίνεται λογική και ορίζεται από τον χρήστη η επανάληψη σταματάει και η τιμή αποθηκεύεται. Λογικό είναι ότι σε κάθε επανάληψη θέλουμε να ρίχνουμε τους residuals των εξισώσεων τόσο ώστε η λύση να είναι πρακτικά σωστή. Εάν δεν συμβαίνει αυτό σημαίνει ότι μοντέλο δεν υπακούει στους νόμους της φυσικής που διέπουν το πρόβλημα. Όσο μεγαλύτερη απαίτηση δίνει ο χρήστης ως προς τον residual τόσο πιο σίγουρος είναι για την λύση που δίνει η επαναληπτική διαδικασία αλλά και τόσο δυσκολότερα το μοντέλο φτάνει στην σύγκλιση σε κάθε χρονική στιγμή, γιατί μπορεί να απαιτηθεί ένας τεράστιος αριθμός επαναλήψεων μέχρι να συμβεί αυτό. Η μεγάλη απαίτηση ως προς τον residual εκφράζεται με την απαίτηση να φτάνει σε αρκετά μικρή τιμή.

Σε κάθε χρονική στιγμή αυτό που επιθυμούμε είναι η σύγκλιση όλων των εξισώσεων του συστήματος. Αυτό είναι αρκετά δύσκολο ειδικά στις πρώτες χρονικές στιγμές μιας και δεν έχει εξελιχτεί το φαινόμενο και το μοντέλο χρειάζεται κάποιες επαναλήψεις συνήθως για να καλιμπηραριστεί σύμφωνα με τις αρχικές συνθήκες που έχουμε επιβάλλει. Είναι σημαντικό ότι η σύγκλιση μέσω του ελέγχου των residuals δεν σημαίνει απαραίτητα ότι τα αποτελέσματα θα είναι σωστά, αλλά ότι είναι αριθμητικά ορθά, δηλαδή ότι η αριθμητική ανάλυση έχει πετύχει. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να έχουμε ένα ορθό μοντέλο από φυσική άποψη και παρουσιάζονται στην συνέχεια.

2.3.3 Υπολογιστικό πλέγμα

Το υπολογιστικό πλέγμα είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν μια δυναμική ανάλυση ρευστομηχανικής. Κάθε υπολογιστικό κελί ανταλλάσσει πληροφορίες με τα γειτονικά του οι οποίες αφορούν χωρικές και χρονικές μεταβολές των μεγεθών της ροής. Το μέγεθος των κελιών σχετίζεται με την δυνατότητα να μεταφέρουν με ακρίβεια πληροφορίες με απότομες μεταβολές, όπως αυτές που παρατηρούνται στο φαινόμενο. Έτσι, γίνεται μια προσπάθεια πύκνωσης του υπολογιστικού πλέγματος για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις μιας τυρβώδης μη ομοιόμορφης ροής.

Η πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος ισοδυναμεί με αύξηση του υπολογιστικού κόστους, αφού θα πρέπει να λυθούν περισσότερες εξισώσεις και μεταφερθούν περισσότερες πληροφορίες στο πεδίο. Για να βελτιστοποιηθεί το υπολογιστικό κόστος ακολουθείται μια σταδιακή πύκνωση του πλέγματος μέχρι τα αποτελέσματα να σταθεροποιηθούν.

Κάποιοι παράμετροι που βοηθούν για το στήσιμο ενός ορθού πλέγματος με σκοπό την επίλυση μη ομοιόμορφων τυρβωδών ροών με High-Re μοντέλο τύρβης είναι:

- Η ύπαρξη ορθογωνικών κελιών και όχι τριγωνικών.
- Ο λόγος των πλευρών των κελιών να μην μεταβάλλεται απότομα μέσα στο πλέγμα.
- Η μεγάλη πλευρά του κάθε κελιού να βρίσκεται κάθετα στο δάνυσμα της ταχύτητας εισόδου.
- Το πλέγμα να είναι δομημένο ώστε να είναι ευκολότερες οι στοχευόμενες παραμετρικές αλλαγές.
- Μακριά από το εμπόδιο το πλέγμα μπορεί να είναι αραιότερο ώστε να μειωθεί το συνολικό υπολογιστικό κόστος.
- Το y^+ που ορίστηκε στην Εξ. (2-9) να βρίσκεται στο πεδίο τιμών [30,300] [4]

2.3.4 Χρονικό βήμα ανάλυσης

Το χρονικό βήμα των επαναλήψεων είναι ένας βασικός παράγοντας για την σύγκλιση των αριθμητικών μοντέλων σε ζητήματα ρευστομηχανικής. Για μη ομοιόμορφες ροές έχει οριστεί από την επιστημονική κοινότητα μια παράμετρος εν ονόματι Courant-Friedrichs-Lewy ή Courant Number ή CFL εν συντομία, που δίνεται στην Εξ. (2-18), όπου u είναι η ταχύτητα εισόδου στο μοντέλο, Δt είναι το χρονικό βήμα της ανάλυσης και Δx είναι το μήκος του πεπερασμένου στοιχείου για τον οποίο υπολογίζεται. Η προτεινόμενη τιμή του είναι να είναι μικρότερος του 1 και ίσως λίγο μεγαλύτερος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αλγορίθμων. [4]

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (2-18)$$

Ο CFL είναι μια εμπειρική παράμετρος που μας ορίζει πόσο θα πρέπει να είναι το χρονικό βήμα της ανάλυσης, ώστε να υπάρχει φυσικό νόημα στο μοντέλο, ανάλογα με την ταχύτητα εισόδου και το μήκος των κελιών. Φυσικά το πιο χαρακτηριστικό μήκος από όλα είναι το μήκος του πρώτου κελιού μιας και αυτό είναι το μικρότερο του πλέγματος, λόγω πύκνωσης, και θα δίνει τον μεγαλύτερο CFL τον οποίο θα πρέπει να συμμορφώσουμε με αλλαγή του χρονικού βήματος.

2.3.5 Συνοριακές συνθήκες

Κάθε τμήμα που απαρτίζει ένα υπολογιστικό μοντέλο θα πρέπει να υπακούει σε ορισμένες φυσικές συνθήκες ταχύτητας, πίεσης και τυρβωδών χαρακτηριστικών. Αυτές ονομάζονται συνοριακές αφού εφαρμόζονται σε όρια του πεδίου, εκεί δηλαδή όπου αλλάζει η κατάσταση της ροής, τα οποία είναι η είσοδος, η έξοδος και το στερεό τοίχωμα. Στο υπόλοιπο πεδίο τα μεγέθη υπολογίζονται σύμφωνα με την υπολογιστική διαδικασία.

2.3.5.1 Συνοριακές συνθήκες ταχύτητας

Η πιο βασική συνοριακή συνθήκη της ταχύτητας είναι αυτή που απαιτεί η ταχύτητα στο στερεό τοίχωμα να είναι μηδενική (No-Slip condition). Στην είσοδο του μοντέλου συνοριακή συνθήκη αποτελεί η ταχύτητα εισόδου που ορίζεται από τον χρήστη και για τις αναλύσεις ενός Πολιτικού Μηχανικού είναι η ταχύτητα αιχμής. Στην έξοδο του μοντέλου η συνθήκη είναι $\nabla U = 0$.

2.3.5.2 Συνοριακές συνθήκες πίεσης

Η πίεση στην έξοδο του μοντέλου ορίζεται από τον χρήστη και οποιαδήποτε τιμή είναι ανεκτή. Αυτό ισχύει γιατί ουσιαστικά ενδιαφερόμαστε για την μεταβολή της πίεσης σε κάθε θέση και όχι για την τιμή της. Στην είσοδο και στο στερεό τοίχωμα η συνοριακή συνθήκη είναι $\nabla p = 0$.

2.3.5.3 Συνοριακές συνθήκες χαρακτηριστικών της τύρβης

Η βασική συνοριακή συνθήκη είναι η Wall Function που θα επιλεγεί στο στερεό τοίχωμα για να υπολογίσει την αλλαγή της κινητικής ενέργειας και της απόσβεσης της τύρβης. Στην είσοδο και την έξοδο ως συνοριακές συνθήκες επιλέγονται οι τιμές των αρχικών συνθηκών με την παραδοχή ότι δεν μεταβάλλονται σε αυτά τα τμήματα κατά την εξέλιξη του φαινομένου.

2.3.6 Αρχικές συνθήκες

Τα υπολογιστικά μοντέλα απαιτούν από τον χρήστη να ορίσει τι συμβαίνει στο πεδίο την χρονική στιγμή μηδέν από όπου θα ξεκινήσουν να υπολογίζουν τις μεταβολές των μεγεθών και τις νέες τιμές τους. Για την ταχύτητα και την πίεση τα πράγματα είναι απλά αφού για την μεν ορίζεται η ταχύτητα εισόδου σε όλο το πεδίο ενώ για την δε μπορεί να οριστεί ξανά οποιαδήποτε τιμή, σύμφωνα με την παράγραφο 2.3.5.2. Σε ένα φαινόμενο μη ομοιόμορφης τυρβώδους ροής οι αρχικές συνθήκες των χαρακτηριστικών της τύρβης αποτελούν ζήτημα διερεύνησης και εξαρτώνται από την ένταση της τύρβης (I) που αναμένεται να δημιουργηθεί. Η ένταση της τύρβης δίνεται στην Εξ. (2-19) όπου u' είναι η ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των διαταραχών της ταχύτητας και u_{avg} είναι η ταχύτητα της μέσης ροής, που ταυτίζεται με την ταχύτητα εισόδου. Στις Εξ. (2-20), (2-21) και (2-22) δίνονται οι προτεινόμενες αρχικές τιμές της κινητικής ενέργειας, της απόσβεσης της τύρβης και της τυρβώδους συνεκτικότητας αντίστοιχα.

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(\text{Re})^{-1/8} \quad (2-19)$$

$$k = \frac{3}{2}(u_{avg} I)^2 \quad (2-20)$$

$$\omega = \frac{k}{\nu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (2-21)$$

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (2-22)$$

Όπως ήδη έχει περιγραφεί η τύρβη είναι ένα καθαρά χαώδες φαινόμενο και η Εξ. (2-19) είναι εμπειρική. Οπότε συχνά είναι σκόπιμη η παραμετρική αλλαγή της έντασης της τύρβης και κατ'επέκταση των αρχικών συνθηκών των k, ω και ν_t ώστε να ελέγξουμε εάν επιτυγχάνεται μια γρηγορότερη σύγκλιση.

2.3.7 Οι αλγόριθμοι SIMPLE και PISO

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η επίλυση προβλημάτων δυναμικής υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι μια εφαρμογή μαθηματικής αριθμητικής ανάλυσης για την οποία απαιτείται η επιλογή ενός αλγορίθμου. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα και είναι ευρέως διαδεδομένοι στον κόσμο του CFD είναι ο SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) και ο PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators), ο οποίος βασίζεται στον πρώτο με κάποιες αλλαγές.

Ο αλγόριθμος PISO ορίζει την επαναληπτική διαδικασία ως εξής [6]:

1. Ορισμός των συνοριακών συνθηκών.
2. Επίλυση της διακριτοποιημένης εξίσωσης ορμής για τον υπολογισμό του πεδίου ταχυτήτων.
3. Υπολογισμός των παροχών στις πλευρές των στοιχείων.
4. Επίλυση της εξίσωσης της πίεσης.
5. Διόρθωση των παροχών στις πλευρές των στοιχείων.
6. Διόρθωση των ταχυτήτων σύμφωνα με νέο πεδίο πιέσεων.
7. Ενημέρωση των συνοριακών συνθηκών.
8. Επανάληψη από το βήμα 3.
9. Αύξηση του χρονικού βήματος και επανάληψη από το βήμα 1.

Η διαφορά του SIMPLE ως προς τον PISO είναι ότι δεν πραγματοποιεί το βήμα 8 και έτσι οι νέες ταχύτητες και παροχές δεν ικανοποιούν την εξίσωση ορμής μετά την εύρεση των πιέσεων και απαιτείται μεγάλος αριθμός επαναλήψεων μέχρι να έχουμε ισορροπία όλων των παραμέτρων. Μια ακόμη βελτίωση που παρατηρείται στον PISO αφορά πλέγματα που απαρτίζονται από πεπερασμένα στοιχεία με απότομες κλίσεις [4].

Σαν αποτέλεσμα ο PISO φαίνεται να συγκλίνει πιο γρήγορα ειδικότερα για προβλήματα που είναι εξαρτημένα από τον χρόνο, όπως η ροή του ανέμου. Για την παρούσα έρευνα οι δύο αλγόριθμοι αποτέλεσαν μέρος των παραμετρικών αλλαγών και ο PISO πράγματι κρίθηκε πιο αποτελεσματικός απέναντι στις απαιτήσεις του φαινομένου.

2.3.8 Αλγόριθμοι επίλυσης μεγεθών

Οι αλγόριθμοι επίλυσης που επιλέγονται ουσιαστικά είναι υπορουτίνες που καθορίζουν ποία θα είναι η επόμενη τιμή που θα δοκιμαστεί κατά την διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων. Δεν θεωρείται σκόπιμη η περαιτέρω αναφορά τους στα πλαίσια της παρούσας έρευνας. Τα προγράμματα στο εμπόριο δίνουν μια μεγάλη γκάμα επιλογών που λειτούργησαν ως παραμετρικές αλλαγές στις αναλύσεις.

2.3.9 Σχήματα διακριτοποίησης

Η λογική των προγραμμάτων που αναφέρεται η παρούσα έρευνα είναι cell-centered. Αυτό σημαίνει ότι η λύση του συστήματος των μερικών διαφορικών εξισώσεων δίνει για κάθε πεπερασμένο στοιχείο αποτελέσματα στο κέντρο του. Αυτά τα αποτελέσματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ίδιων μεγεθών σε γειτονικά στοιχεία. Έτσι, απαιτείται μια διαδικασία σύμφωνα με την οποία θα εκφραστούν οι τιμές στο κέντρο σε σχέση με τις τιμές στις πλευρές του κάθε στοιχείου. Αυτό θα ήταν αρκετά απλό εάν οι εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ήταν αλγεβρικές. Στην περίπτωση της τυρβώδους μη ομοιόμορφης ασυμπίεστης ροής οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές, πεπλεγμένες, μερικές διαφορικές 2^{ης} τάξης και απαιτείται ο ορισμός συναρτήσεων που πραγματοποιούν αυτή την διαδικασία. Αυτές οι συναρτήσεις ονομάζονται σχήματα διακριτοποίησης.

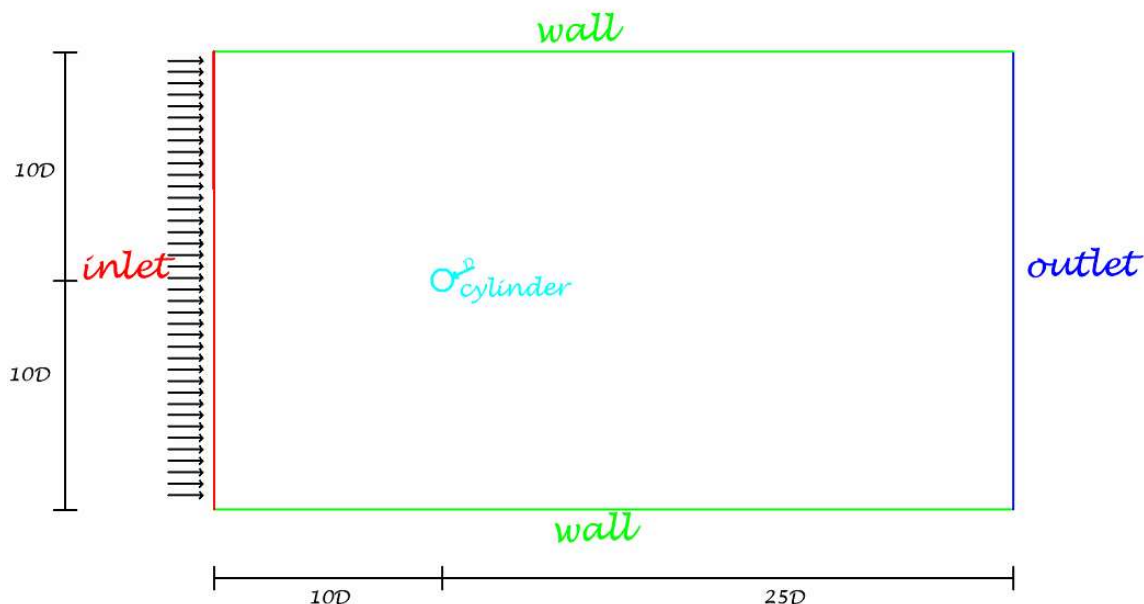
Η λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων γίνεται με ολοκλήρωση τους και αυτό συνεπάγει πως ο κάθε επιλύτης θα πρέπει να γνωρίζει με τι να εξισώσει κάθε ολοκλήρωμα είτε αυτό έχει χρονική παραγωγή είτε όρο Laplacian είτε Gradient είτε Divergence. Γενικά, για μη ομοιόμορφες ροές τα σχήματα διακριτοποίησης δεύτερης τάξης έχουν αποδειχθεί περισσότερο ακριβή και χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια για κυκλικά και τετραγωνικά εμπόδια.

3 ΚΥΚΛΙΚΟ ΕΜΠΟΔΙΟ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μοντέλων που διερευνήθηκαν για τον υπολογισμό των ανεμοπιέσεων σε εμπόδια κυκλικής γεωμετρίας. Αρχικά, θα γίνει μια αναφορά στην διαδικασία που ακολουθήθηκε και στην συνέχεια μια πιο λεπτομερής αναφορά στα αποτελέσματα των πιο αξιόπιστων μοντέλων σύμφωνα με την βιβλιογραφία, στο περιβάλλον του ANSYS και του OpenFOAM. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι συγκρίσεις με τις προβλέψεις του EN1991-1-4 και με πειραματικές μετρήσεις.

3.1 Εισαγωγή στην προσομοίωση

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για $Re=2.2 \cdot 10^6$ και $Re=5 \cdot 10^5$ και τα υπολογιστικά μοντέλα ακολουθούν την γεωμετρία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1: Γεωμετρία προσομοιωμάτων

Για τον σαφή υπολογισμό των ανεμοπιέσεων σε κυκλικό εμπόδιο αρχικά δοκιμάστηκαν στο λογισμικό του ANSYS παραμετρικές αλλαγές ως προς τον αλγόριθμο, τον συνολικό αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων, την αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα y^+ , την δομή και τον αριθμό των πεπερασμένων

στοιχείων της πύκνωσης και θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα δύο ακριβέστερα, ένα για κάθε αριθμό Reynolds. Στην συνέχεια για $Re=2.2 \cdot 10^6$ το πιο αξιόπιστο μοντέλο σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα και τον EN1991-1-4 επιλέχθηκε για σύγκριση με το λογισμικό OpenFOAM.

Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων, ο αλγόριθμος και το μοντέλο τύρβης, η μέγιστη τιμή του y^+ και του CFL στο υπολογιστικό πεδίο στα οποία κατέληξε η παραμετρική διαδικασία και θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων

Re	Πλέγμα	Αλγόριθμος, Μοντέλο τύρβης	y^+	CFL
$2.2 \cdot 10^6$	384000	PISO, k- ω SST	102	0.6
$5 \cdot 10^5$	420000	PISO, k- ω SST	150	0.72

Η ταχύτητα εισαγωγής στα προσομοιώματα αντιστοιχεί στην ταχύτητα αιχμής που υπολογίζεται από την αντίστοιχη πίεσης αιχμής, όπως ορίζεται στην Εξ. (1-13) από τον EN1991-1-4.

Το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε είναι το k- ω SST, έχει γίνει υπόθεση έντασης τύρβης $I=3\%$ και λόγος τυρβώδης προς κινηματική συνεκτικότητα ίσος με 3. Οι τιμές των αρχικών συνθηκών που επιλέχθηκαν στα δύο λογισμικά ορίστηκαν βάση των εξισώσεων στην υποενότητα 2.3.6. Για τα προσομοιώματα που θα παρουσιαστούν επιλέχθηκε ο αλγόριθμος PISO με σχήματα διακριτοποίησης δευτέρου βαθμού και με αλγόριθμους επίλυσης PRESTO για την πίεση και QUICK για την ορμή, την κινητική ενέργεια της τύρβης και την απόσβεση της τύρβης.

Για να έχει νόημα η σύγκριση των δύο λογισμικών θα πρέπει τα προσομοιώματα να έχουν ίδιο υπολογιστικό πλέγμα και ίδιες αρχικές συνθήκες. Για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των αριθμητικών αναλύσεων έγινε προσπάθεια διατήρησης των ίδιων παραμέτρων, όσο αυτό ήταν δυνατό. Μια παράμετρος που δεν είναι ίδια στα δύο λογισμικά είναι ο αλγόριθμος επίλυσης της πίεσης επειδή ο PRESTO δεν είναι διαθέσιμος στο OpenFOAM. Αντί για αυτόν επιλέχθηκε ο GAMG ο οποίος είναι ο καταλληλότερος σύμφωνα με τις φυσικές απαιτήσεις του φαινομένου.

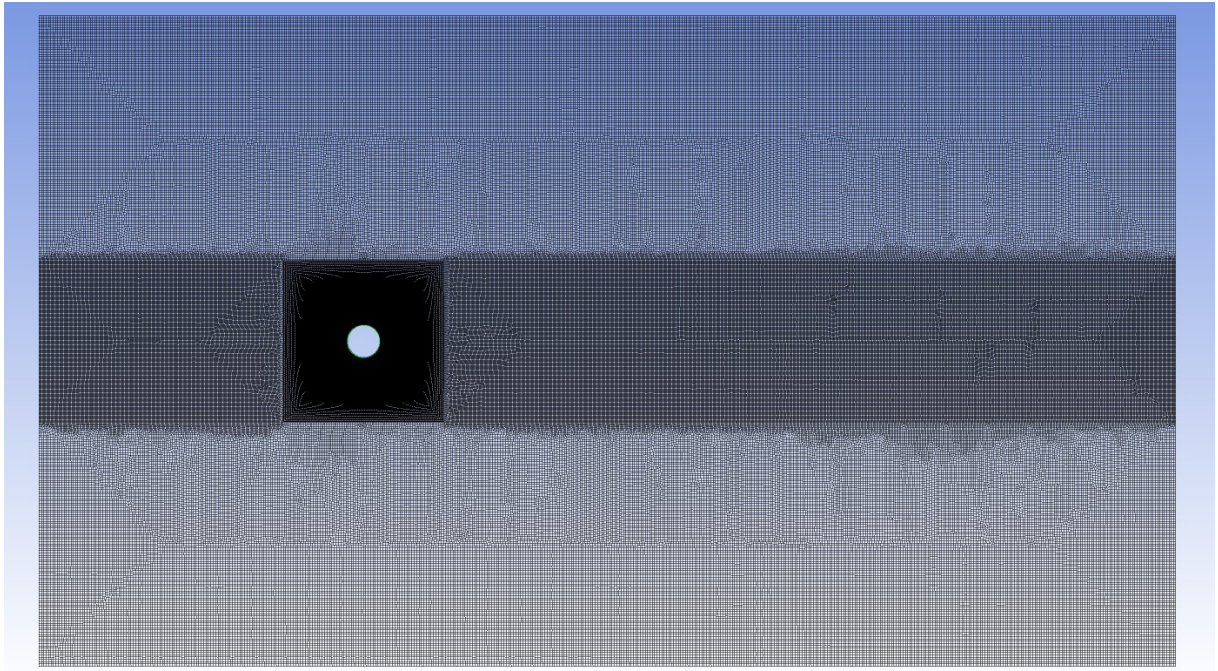
Οι πιέσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια του εμποδίου μεταβάλλονται ανάλογα με το που δρουν πιο έντονα οι δίνες που αναπτύσσονται στο πεδίο και παρουσιάζονται για τον επάνω μισό μέρος του κυκλικού εμποδίου ($0^\circ < \alpha < 180^\circ$), αφού το φαινόμενο είναι περιοδικό και στην πραγματικότητα ότι συμβαίνει στο άνω μισό του εμποδίου για δεδομένη χρονική στιγμή αντίστοιχα θα συμβαίνει στο κάτω μισό με το πέρασ του χρόνου της ημιπεριόδου. Ο συντελεστής πίεσης κατά μήκους του ημικυκλίου έχει νόημα να παρουσιαστεί για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές. Μία όταν οι δίνες δρουν εντονότερα στο επάνω μισό του εμποδίου όπου οι πιέσεις θα έχουν την μέγιστη τιμή και αναφέρεται ως $C_{p,upr}$, μια όταν οι δίνες δρουν στο μέσο της ομόρρους περιοχής με τις πιέσεις να είναι σχεδόν ίσες στα δύο ημικύκλια και αναφέρεται ως $C_{p,mid}$ και μία όταν αυτές δρουν στο κάτω μέρος του εμποδίου, όπου οι πιέσεις λαμβάνουν την ελάχιστη τιμή και αναφέρεται ως $C_{p,down}$.

3.2 Προσομοίωση για $Re=2.2 \cdot 10^6$

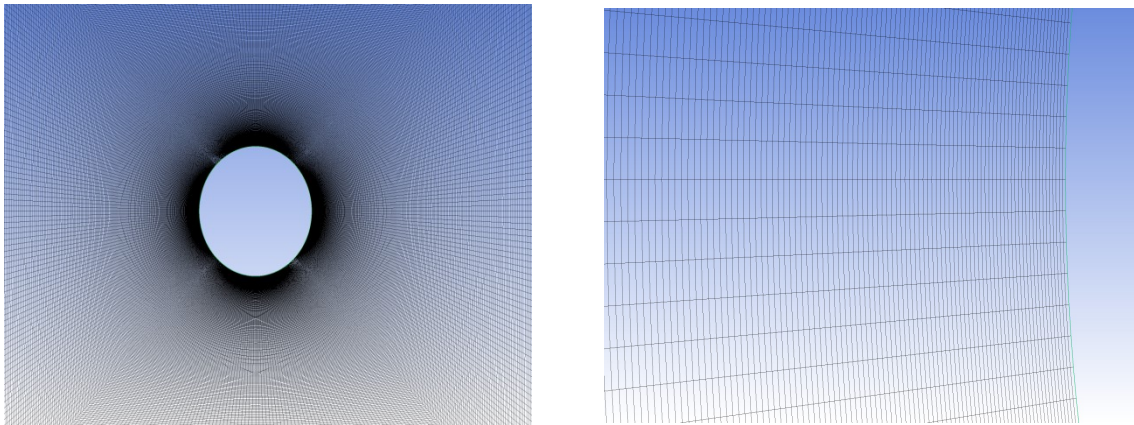
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν εικόνες του υπολογιστικού πλέγματος και τα αποτελέσματα του προσομοιώματος που παρουσίασε καλύτερη συμφωνία με την βιβλιογραφία για $Re=2.2 \cdot 10^6$.

3.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Στο Σχήμα 3-2 και στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται η δομή του υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση.



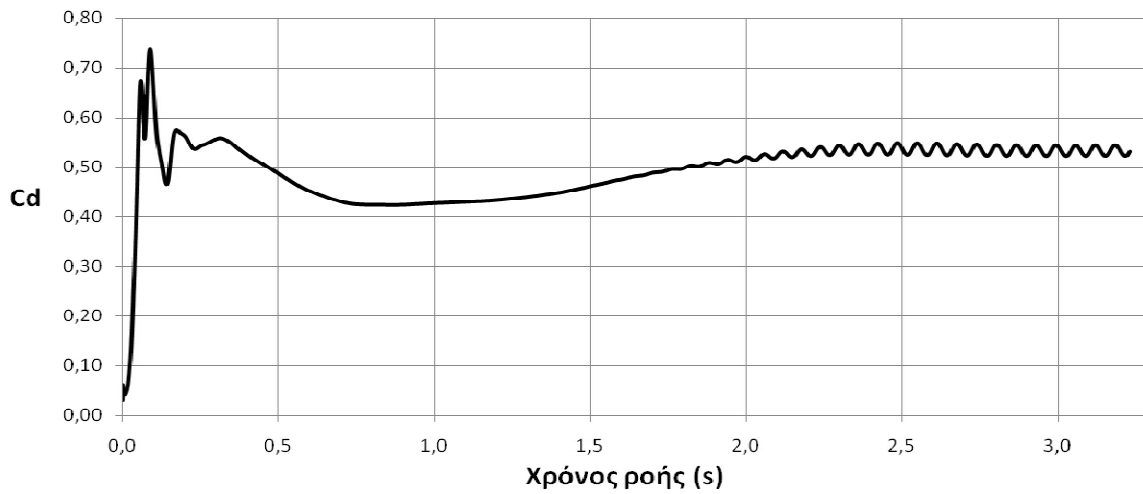
Σχήμα 3-2: Εικόνα υπολογιστικού πλέγματος



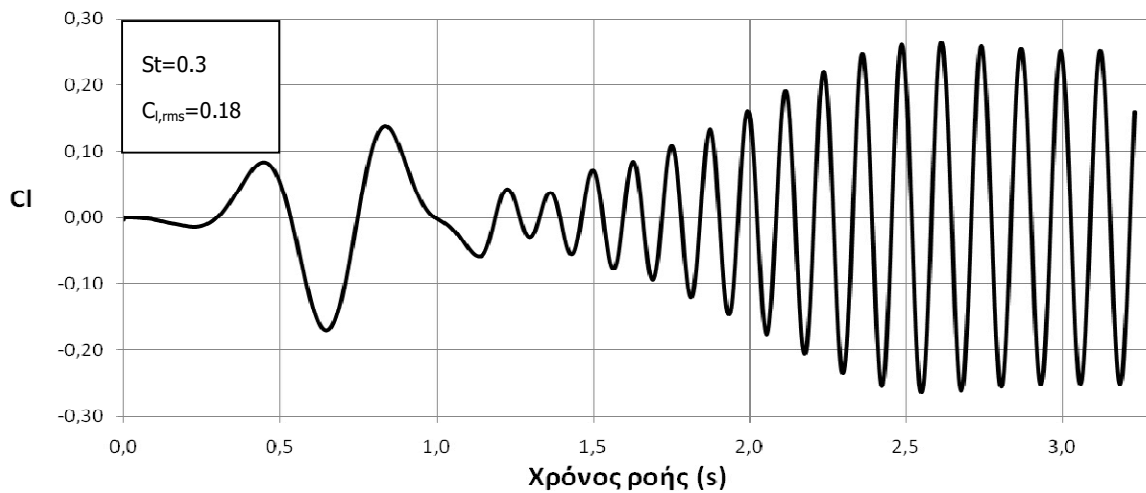
Σχήμα 3-3: Εικόνα υπολογιστικού πλέγματος κοντά στο στερεό τοίχωμα

3.2.2 Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS

Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης C_d και στο Σχήμα 3-5 ο συντελεστής ανύψωσης C_l που προέκυψαν, σε σχέση με τον χρόνο στον οποίο πραγματοποιείται η ροή.

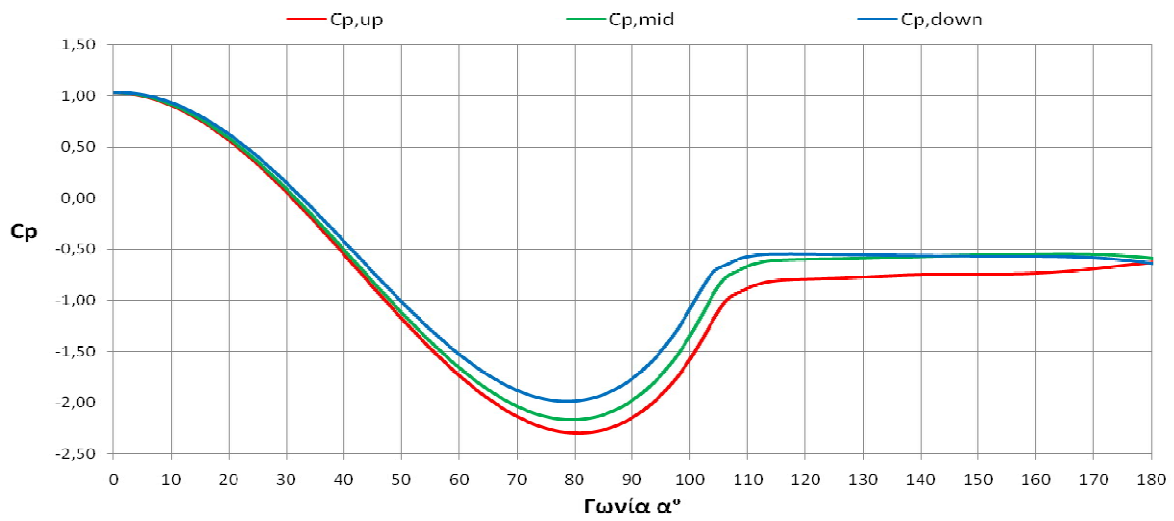


Σχήμα 3-4: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d



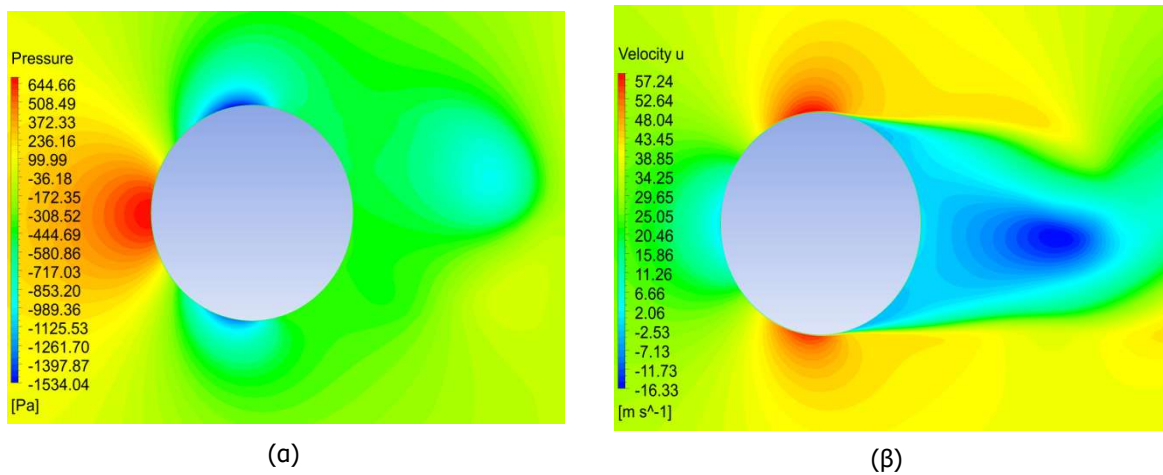
Σχήμα 3-5: Διάγραμμα συντελεστή εγκάρσιας δύναμης C_l

Ο αριθμός Strouhal που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-5 έχει υπολογιστεί με εφαρμογή της Εξ. (2-14) για $n=10 \text{ s}^{-1}$. Ο συντελεστής πίεσης που προκύπτει παρουσιάζεται για τις τρεις χαρακτηριστικές στιγμές όπως αυτές ορίστηκαν στην 3.1 στο Σχήμα 3-6.

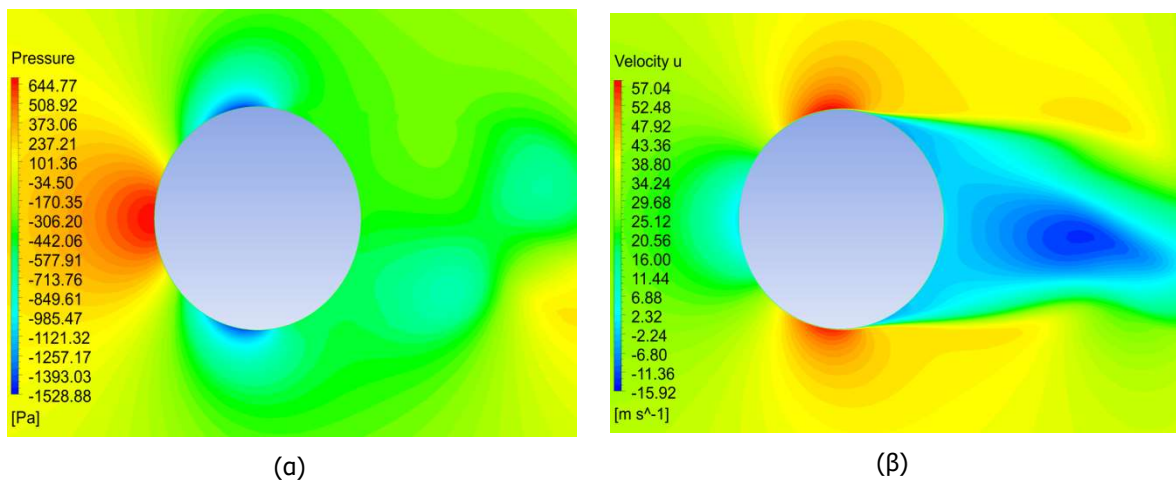


Σχήμα 3-6: Διαγράμματα συντελεστή πίεσης για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα

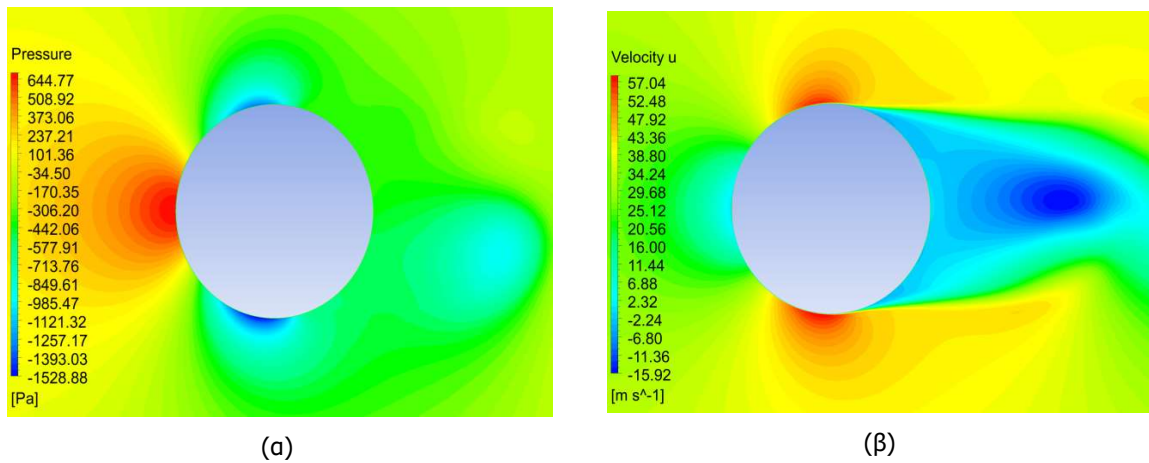
Για κάθε χαρακτηριστικό στιγμιότυπο παρουσιάζονται οι πιέσεις και οι ταχύτητες του πεδίου στο Σχήμα 3-7, στο Σχήμα 3-8 και στο Σχήμα 3-9.



Σχήμα 3-7: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,up}$



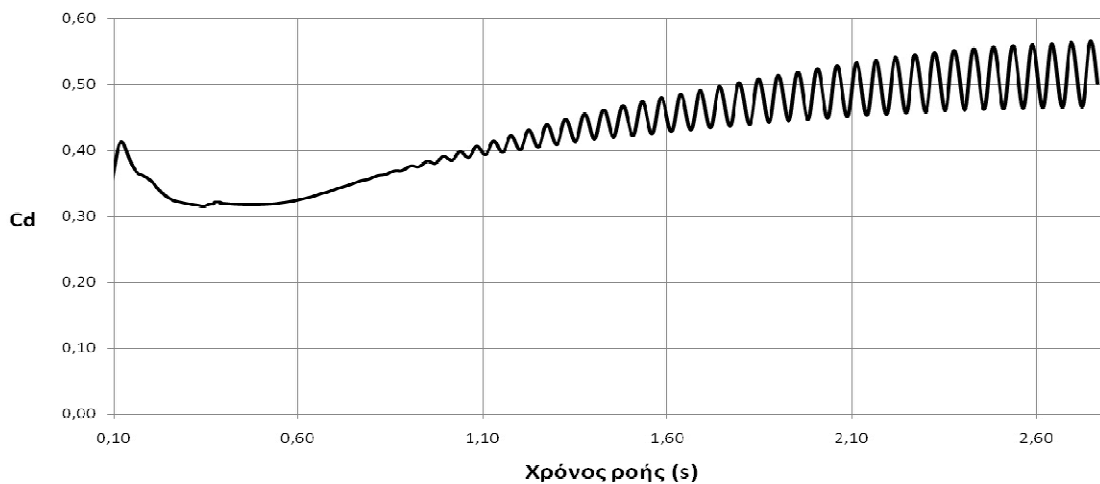
Σχήμα 3-8: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,mid}$



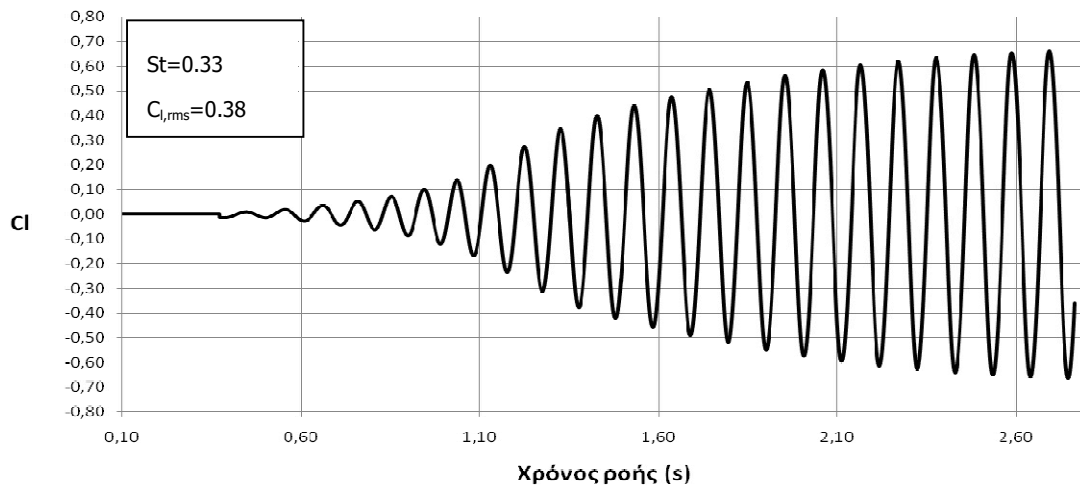
Σχήμα 3-9: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,down}$

3.2.3 Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του OpenFOAM

Τα αποτελέσματα του συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d και του συντελεστή ανύψωσης C_l σε σχέση με τον χρόνο της ροής, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-10 και στο Σχήμα 3-11 αντίστοιχα.

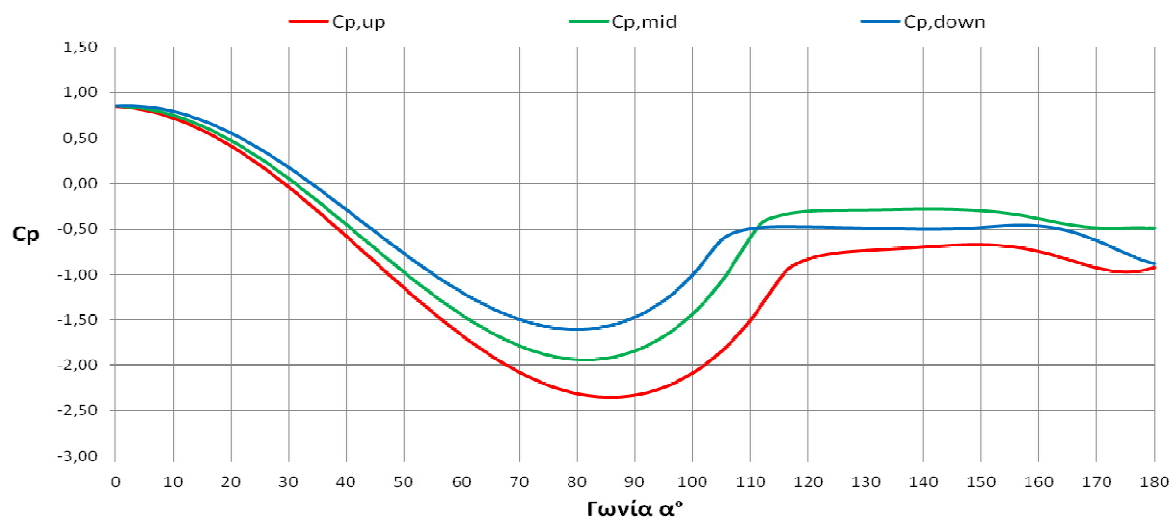


Σχήμα 3-10: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d



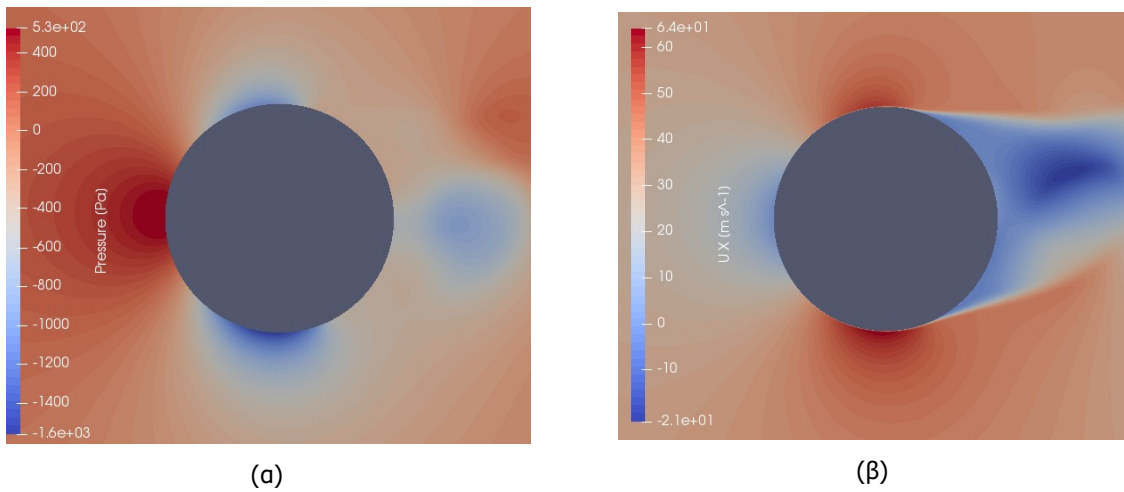
Σχήμα 3-11: Διάγραμμα συντελεστή ανύψωσης C_l

Ο αριθμός Strouhal που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-11 υπολογίζεται με εφαρμογή της Εξ. (2-14) για $n=11 \text{ s}^{-1}$. Ο συντελεστής πίεσης που προκύπτει παρουσιάζεται για τις τρεις χαρακτηριστικές στιγμές όπως αυτές ορίστηκαν στην 3.1 στο Σχήμα 3-12.

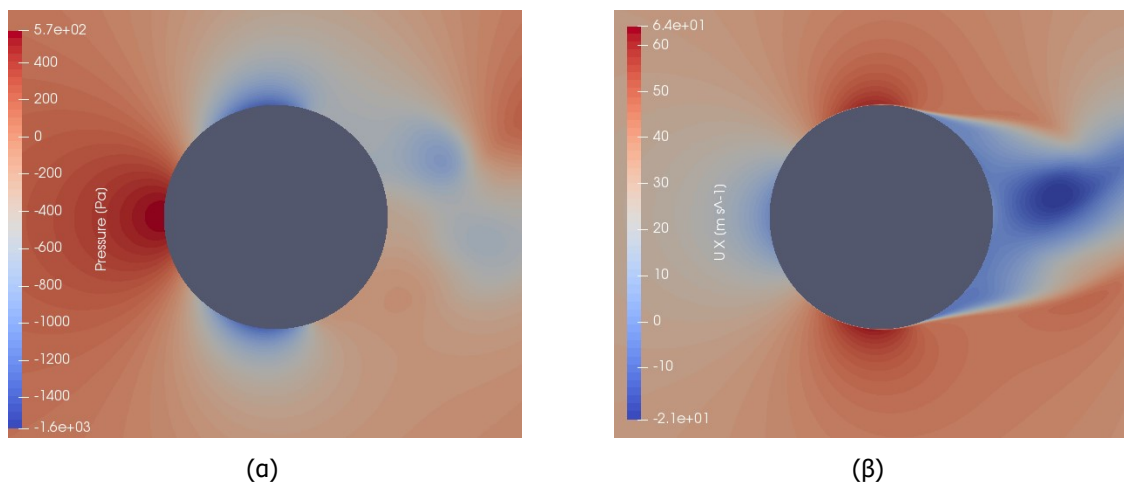


Σχήμα 3-12: Διαγράμματα συντελεστή πίεσης για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα

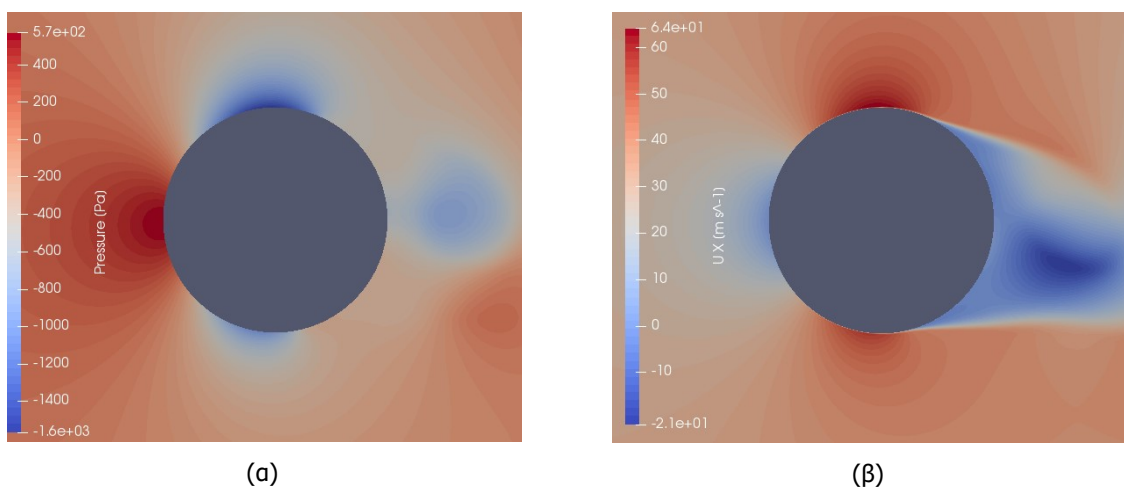
Για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα παρουσιάζονται οι τιμές της πίεσης και της ταχύτητας του πεδίου στο Σχήμα 3-13, στο Σχήμα 3-14 και στο Σχήμα 3-15.



Σχήμα 3-13: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,down}$



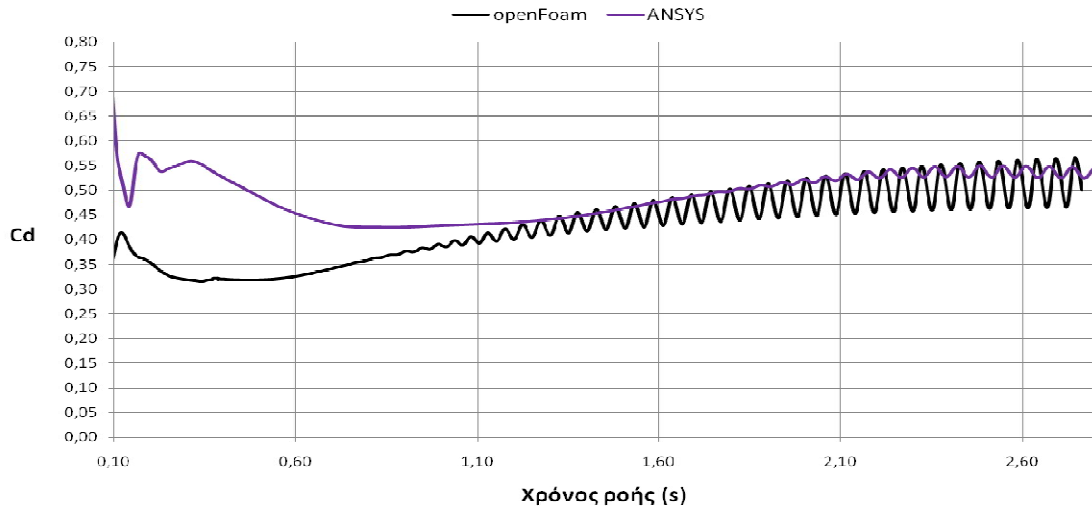
Σχήμα 3- 14: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $t C_p=C_{p,mid}$



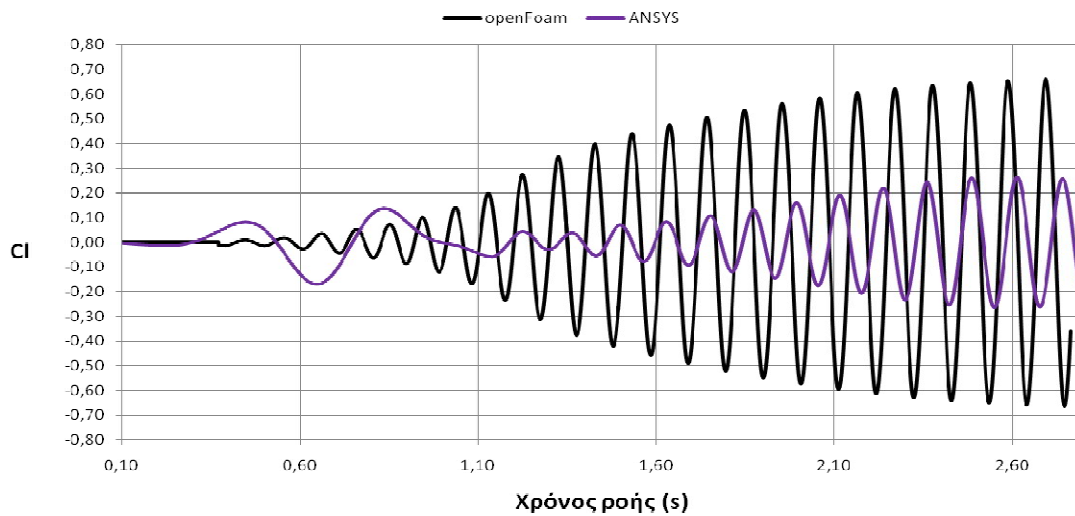
Σχήμα 3-15: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,up}$

3.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών

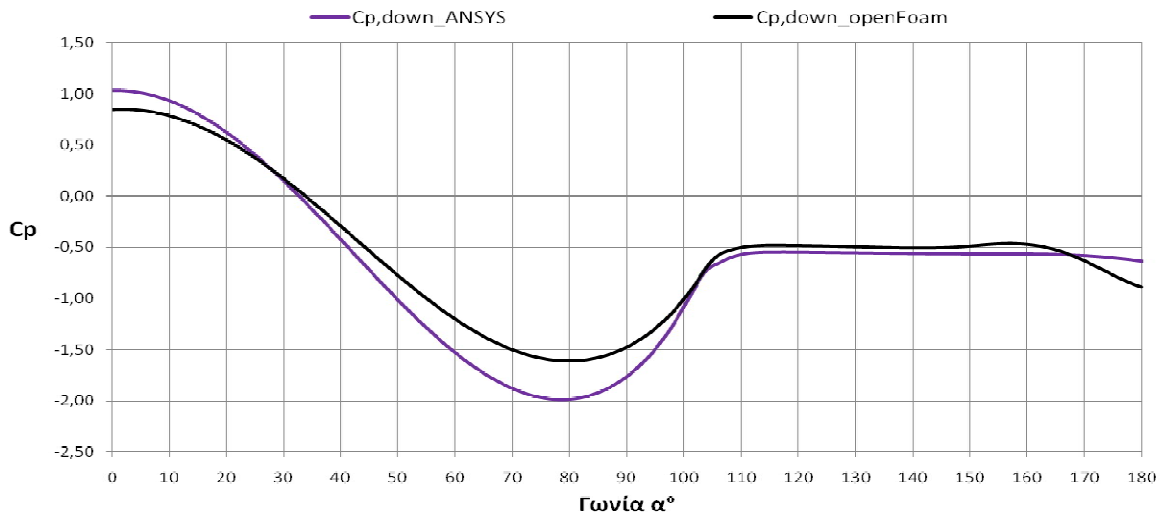
Από το Σχήμα 3-16 έως το Σχήμα 3-20 και στο και στον Πίνακα 3-2 παρουσιάζεται μια παράθεση των αποτελεσμάτων στο ANSYS και στο OpenFOAM.



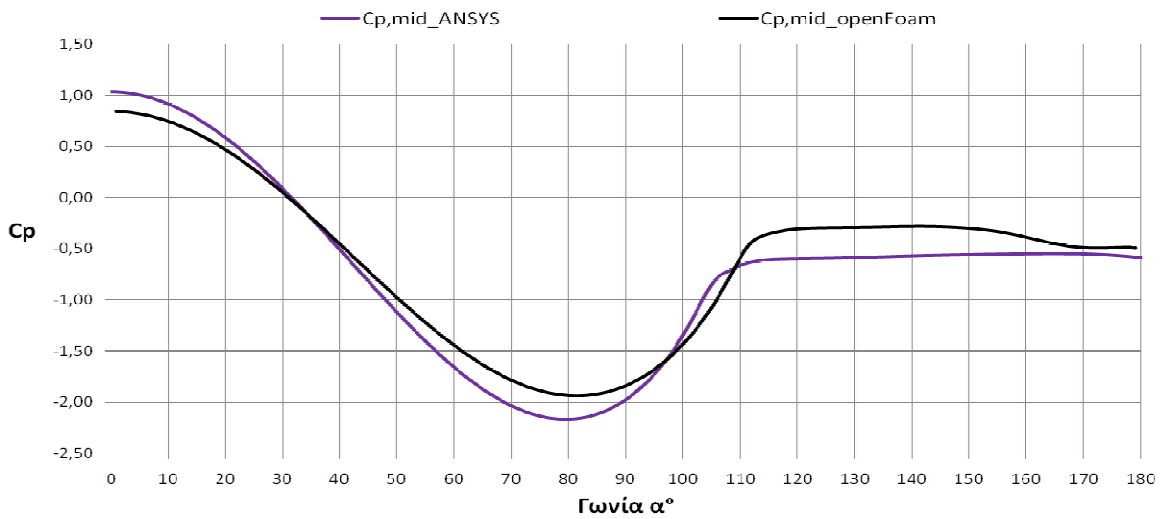
Σχήμα 3-16: Διαγράμματα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d στα δύο λογισμικά



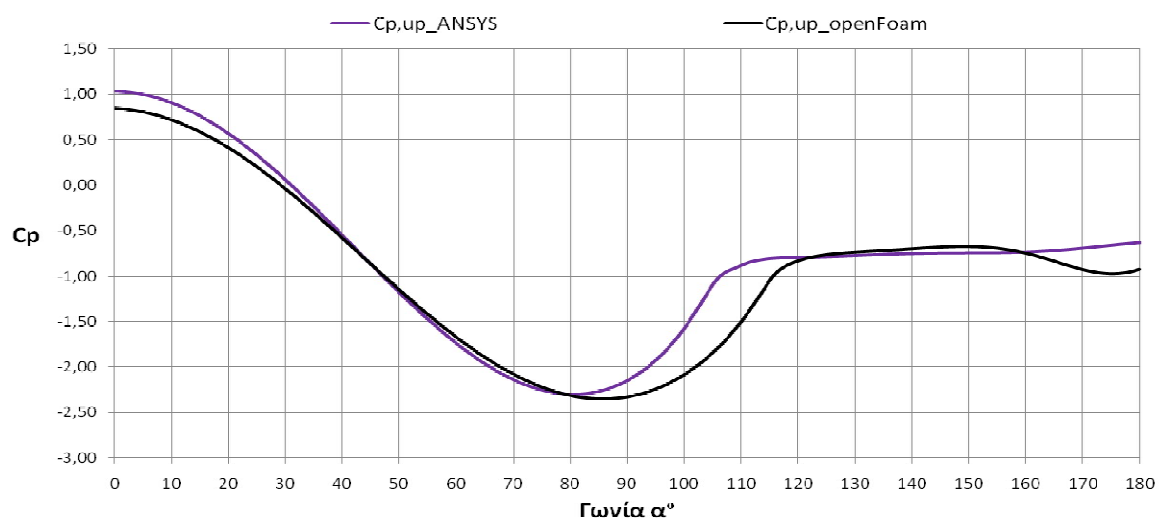
Σχήμα 3-17: Διαγράμματα συντελεστή ανύψωσης C_l στα δύο λογισμικά



Σχήμα 3-18: Διαγράμματα των ελάχιστων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά



Σχήμα 3-19: Διαγράμματα των μέσων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά



Σχήμα 3-20: Διαγράμματα των μέγιστων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά

Πίνακας 3-2: Σύγκριση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών ανάμεσα στα δύο λογισμικά

	C_d	$C_l / C_{l,rms}$	St	a_{min}	$C_{p0,min}$	a_A	$C_{p0,h}$
ANSYS	0.54	0.25/0.18	0.3	80	-2.2	114	-0.7
OpenFOAM	0.53	0.65/0.38	0.33	85	-2.2	120	-0.7

Επισημαίνεται ότι στο διάγραμμα του συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης παρατηρείται ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών κατά της σύγκληση σε σχέση με αυτό του ANSYS, ενώ και οι δύο συγκλίνουν σε αρκετά κοντινές τιμές. Ακόμη, το OpenFOAM φαίνεται ότι υπερεκτιμά τον συντελεστή ανύψωσης και απομακρύνεται αρκετά από τα αποτελέσματα του ANSYS.

Τα αποτελέσματα του συντελεστή δύναμης, του αριθμού St και των υπολοίπων χαρακτηριστικών του διαγράμματος του συντελεστή πίεσης ανάμεσα στα δύο λογισμικά είναι παρεμφερή και κρίνουν την σύγκριση των δύο αποδεκτή.

3.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και πειραματικές μετρήσεις

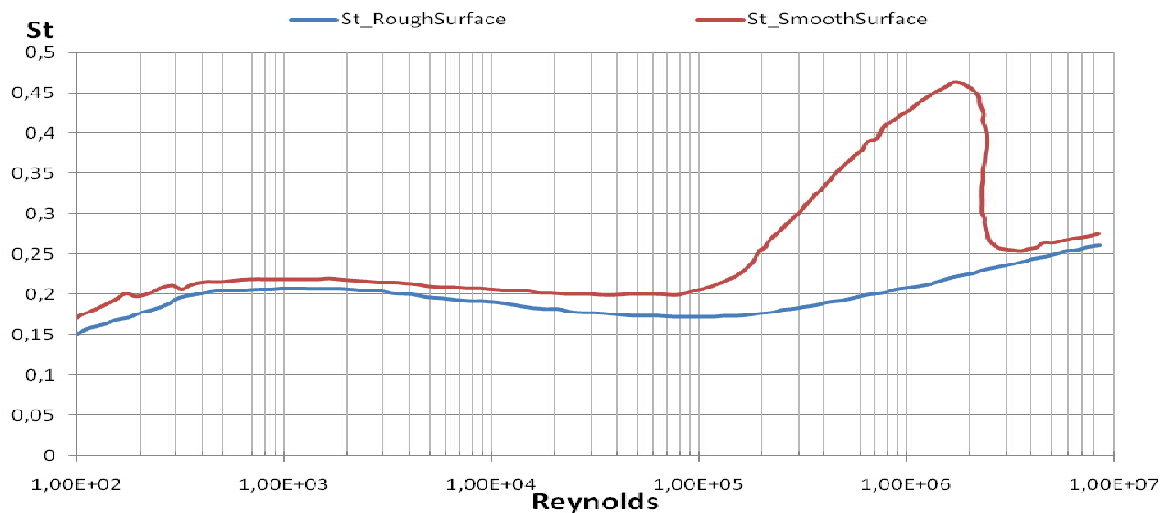
Στον Πίνακα 3-3 φαίνονται οι συγκρίσεις των μεγεθών με τα δεδομένα του EN1991-1-4 για κυκλικούς κυλίνδρους με $Re=2.2 \cdot 10^6$ για ισοδύναμη τραχύτητα μικρότερη από $5 \cdot 10^{-4}$ και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων από τους οργανισμούς που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 1.4.

Πίνακας 3-3: Σύγκριση αεροδυναμικών χαρακτηριστικών με τα πειραματικά δεδομένα

	C_d	$C_{l,max} / C_{l,rms}$	St	a_{min}	$C_{p0,min}$	a_A	$C_{p0,h}$
ANSYS	0.54	0.25/0.18	0.3	80	-2.2	114	-0.7
OpenFOAM	0.53	0.65/0.38	0.28	85	-2.2	120	-0.7
EN1991-1-4	0.56	-	0.18	80	-1.9	120	-0.7
CICIND	0.55	0.16/-	0.2	85	-2.7	140	-0.7
NASA TR	0.54	0.18/0.16	0.2	87	-2.3	130	-0.6
NACA	0.54	-	0.32	-	-	-	-

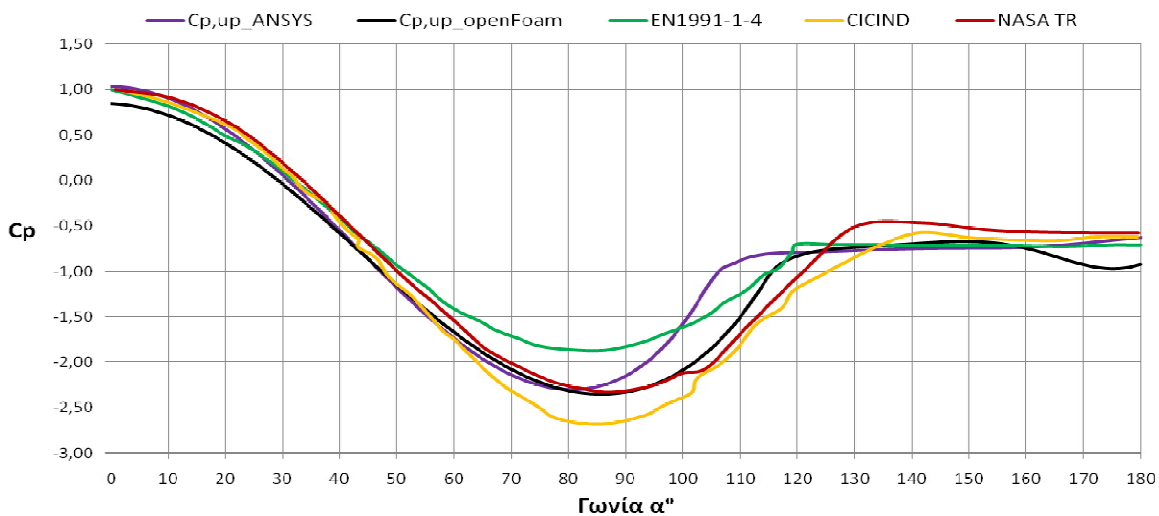
Μια παρατήρηση είναι ότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης C_d έχει μια μέγιστη απόκλιση της τάξης του 3% από τα πειραματικά δεδομένα η οποία θεωρείται αποδεκτή. Ο συντελεστής ανύψωσης C_l φαίνεται να έχει μια μέγιστη απόκλιση της τάξης του 30% από την προτεινόμενη $C_{l,max}$ που αναφέρεται στον CICIND και μια μέγιστη απόκλιση της τάξης του 10% από την αντίστοιχη $C_{l,rms}$ τιμή.

Ο αριθμός Strouhal έχει μεγαλύτερη απόκλιση από την αποδεκτή με τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα αλλά πρέπει να αναφερθεί ότι η προτεινόμενη αυτή τιμή αναφέρεται σε επιφάνειες με πλήρη τραχύτητα. Στο προσομοίωμα που περιγράφηκε αλλά και σε ένα πραγματικό μέλος ή κατασκευή κάτι τέτοιο θεωρείται ιδανικό και δεν αφομοιώθηκε στην ανάλυση. Έτσι η σύγκριση του St είναι ορθότερο να γίνει με πειράματα που αναφέρουν το δυνατό εύρος των τιμών του, όπως αυτά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-21 σύμφωνα με τους Achenbach and Henekee (1981). Σύμφωνα με τα παραπάνω, για μια ενδιάμεση τραχύτητα η τιμή 0.3 φαίνεται λογική για τον Re που αναπτύσσεται στην ροή.



Σχήμα 3-21: Τιμές του αριθμού St σε σχέση με το αριθμό Re για πλήρως λεία και πλήρως τραχιά επιφάνεια [Achenbach and Henekee (1981)]

Ο EN1991-1-4 δεν είναι σαφής για το εάν οι τιμές του συντελεστή πίεσης αναφέρονται στις μέγιστες όμως φαίνεται λογικό η σύγκριση να γίνει με αυτές. Στους υπόλοιπους οργανισμούς οι τιμές του συντελεστή πίεσης αναφέρονται στην μέγιστη τιμή που αναπτύσσεται κατά την εξέλιξη του φαινομένου και στο Σχήμα 3-22 παρουσιάζεται η διαγραμματική σύγκρισή τους.



Σχήμα 3-22: Διαγράμματα των μεγίστων τιμών του συντελεστή δύναμης στα δύο λογισμικά, του EN1991-1-4 και των πειραματικών δεδομένων

Από την σύγκριση του μέγιστου συντελεστή πίεσης παρατηρούμε ότι το OpenFOAM προσεγγίζει καλύτερα την γωνία αποκόλλησης που αναφέρεται στον EN1991-1-4 και στους υπόλοιπους οργανισμούς. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στην μέγιστη τιμή του συντελεστή και των δύο λογισμικών και έχει τάξη 15% με την αντίστοιχη προτεινόμενη τιμή του EN1991-1-4.

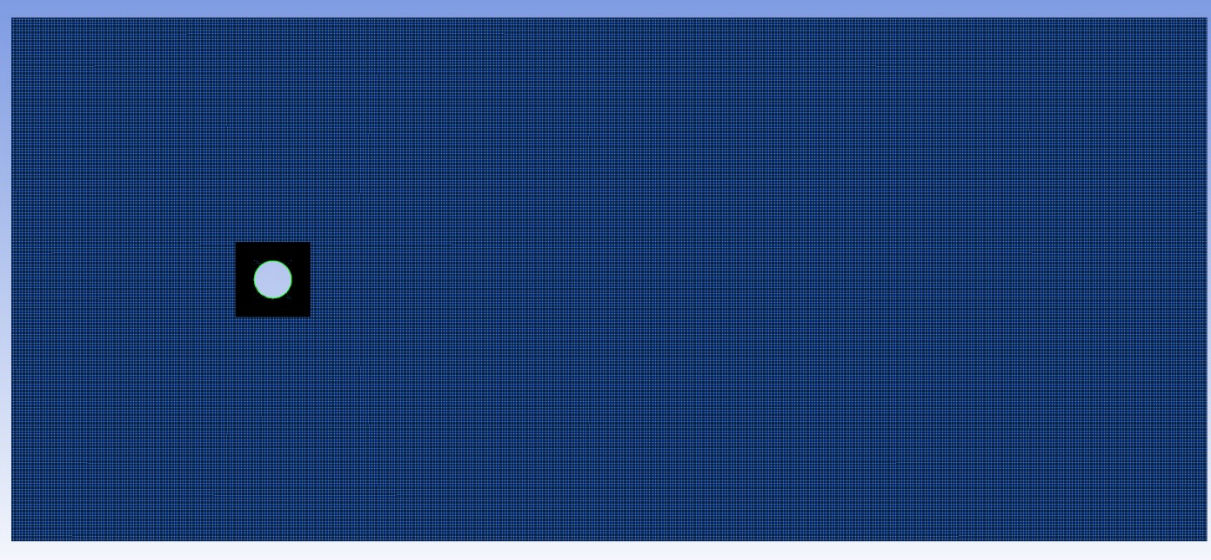
Επιπλέον, από το Σχήμα 3-22 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιωμάτων της έρευνας συνολικά συμφωνούν περισσότερο με τα πειραματικά δεδομένα από ότι με τις προσεγγίσεις του EN1991-1-4.

3.3 Προσομοίωση για $Re=5 \cdot 10^5$

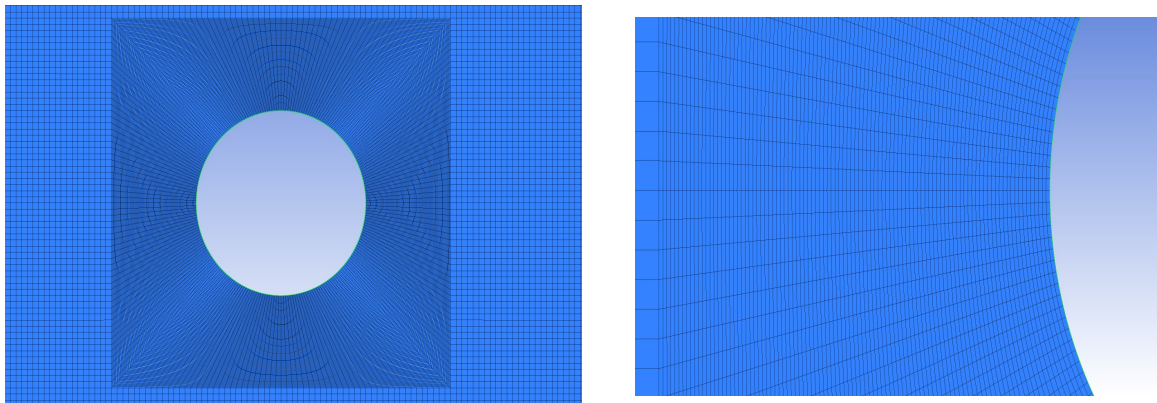
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν εικόνες του υπολογιστικού πλέγματος και τα αποτελέσματα του προσομοιώματος που παρουσίασε καλύτερη συμφωνία με την βιβλιογραφία για $Re=5 \cdot 10^5$.

3.3.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Στο Σχήμα 3-23 και στο Σχήμα 3-24 φαίνεται η δομή του υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση.



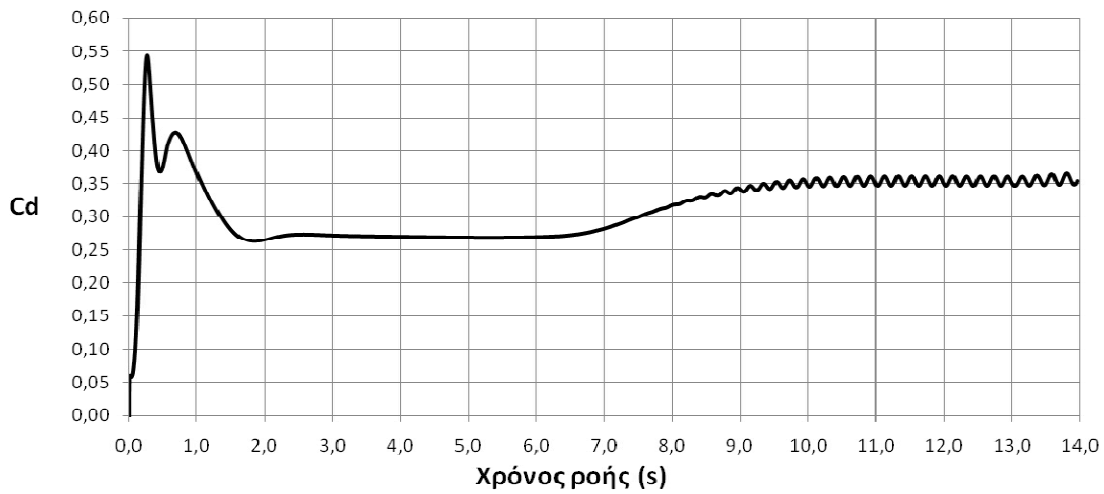
Σχήμα 3-23: Υπολογιστικό πλέγμα



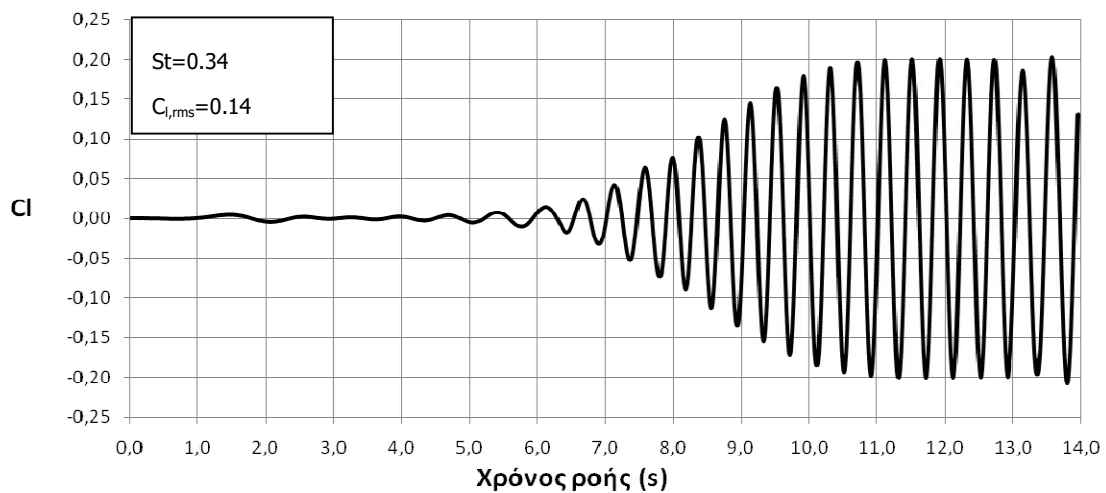
Σχήμα 3-24: Υπολογιστικό πλέγμα κοντά στο στερεό τοίχωμα

3.3.2 Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS

Στο Σχήμα 3-25 παρουσιάζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης C_d και στο Σχήμα 3-26 ο συντελεστής ανύψωσης C_l που προέκυψαν από την ανάλυση σε κάθε χρονική στιγμή της ροής.



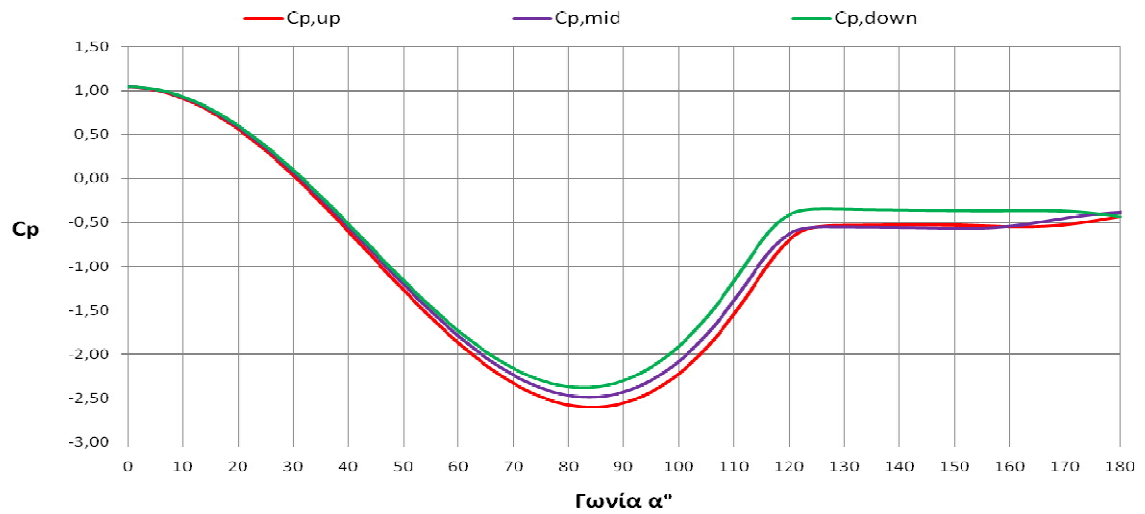
Σχήμα 3-25: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d



Σχήμα 3-26: Διάγραμμα συντελεστή ανύψωσης C_l

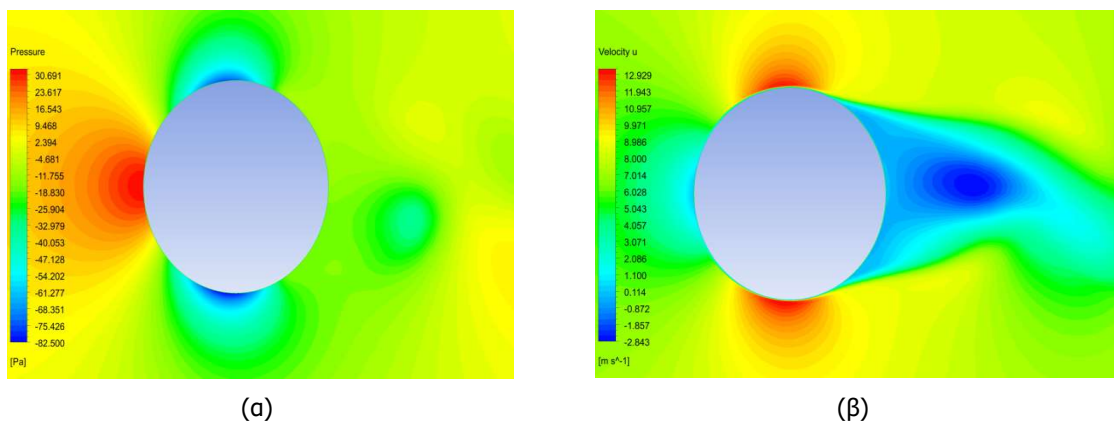
Από την Εξ. (2-14) προκύπτει ο αριθμός St που αντιστοιχεί στο Σχήμα 3-26 για $n=2.5$ με τιμή 0.34.

Ο συντελεστής πίεσης που προκύπτει, παρουσιάζεται για τις τρεις χαρακτηριστικές στιγμές όπως αυτές ορίστηκαν στην 3.1 στο Σχήμα 3-27.

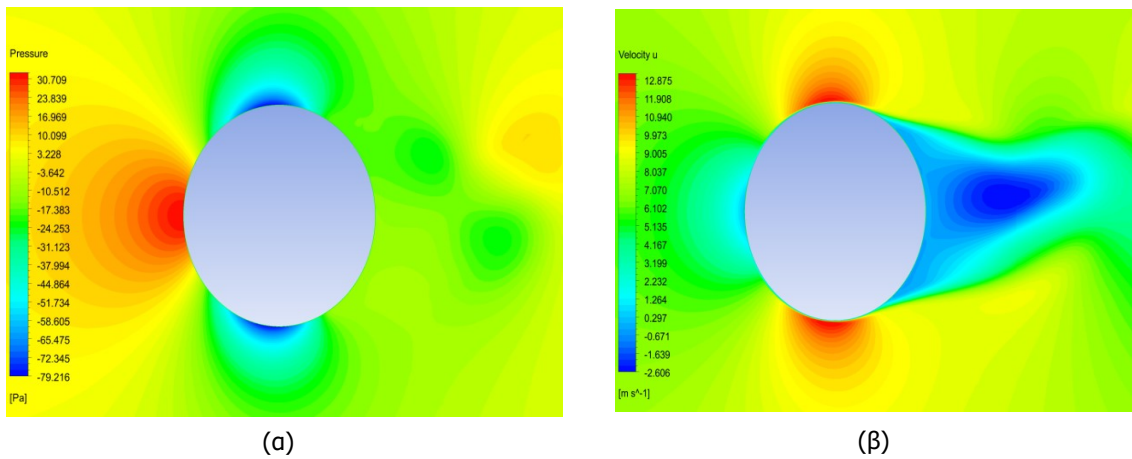
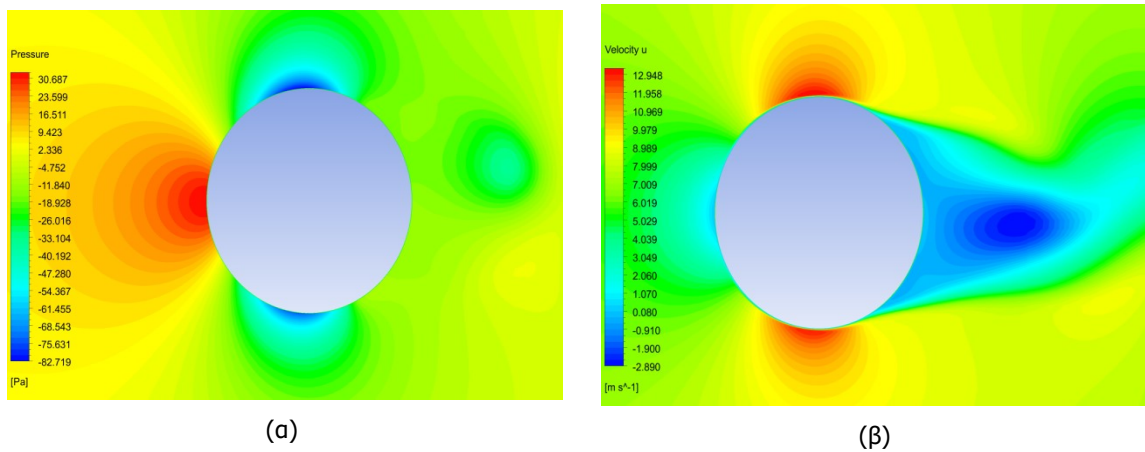


Σχήμα 3-27: Διαγράμματα συντελεστή πίεσης για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής

Παρατηρούμε ότι το εύρος του συντελεστή πίεσης είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί σε $Re=2.2 \cdot 10^6$ και φαίνεται στο Σχήμα 3-6, ενώ οι μέγιστες τιμές του είναι σε γενικές γραμμές μεγαλύτερες. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι πιέσεις και οι ταχύτητες του πεδίου για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα στο Σχήμα 3-28, στο Σχήμα 3-29 και στο Σχήμα 3-30.



Σχήμα 3-28: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,down}$

Σχήμα 3-29: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,mid}$ Σχήμα 3-30: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,up}$

3.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και πειραματικά δεδομένα

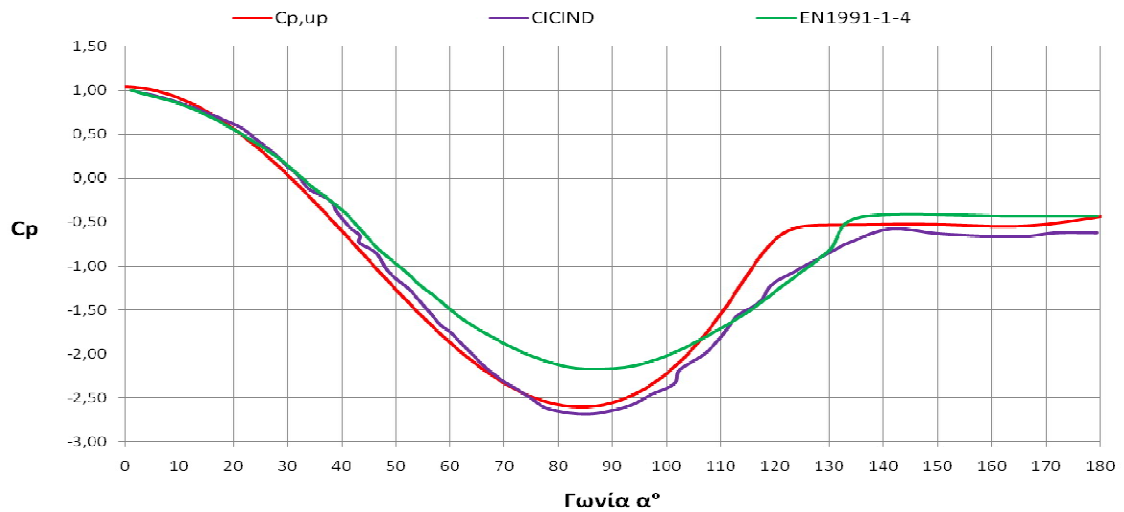
Στον Πίνακα 3-4 φαίνεται η σύγκριση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών με τις προσεγγίσεις του EN1991-1-4 για κυκλικούς κυλίνδρους με ισοδύναμη τραχύτητα μικρότερη από $4 \cdot 10^{-4}$ και των πειραματικών μετρήσεων των οργανισμών που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.4, για $Re=5 \cdot 10^5$.

Πίνακας 3-4: Σύγκριση αεροδυναμικών χαρακτηριστικών με τον EN1991-1-4 και τα πειραματικά δεδομένα

	C_d	$C_l / C_{l,rms}$	St	a_{min}	$C_{p0,min}$	a_A	$C_{p0,h}$
ANSYS	0.35	0.2/0.14	0.34	85	-2.6	122	-0.5
EN1991-1-4	0.4	-	0.28	85	-2.2	135	-0.4
CICIND	0.4	0.16	0.2	85	-2.7	140	-0.7
NACA	0.3	-	0.29	-	-	-	-

Παρατηρείται μια υποτίμηση της τιμής του συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης από την υπολογιστική ανάλυση της τάξης του 12% σε σχέση με την βιβλιογραφία και μια αρκετά καλή συμφωνία στον συντελεστή ανύψωσης. Για τον αριθμό St ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.5 και η τιμή

0.34 θεωρείται αποδεκτή. Στο Σχήμα 3-31 παρουσιάζεται η σύγκριση του συντελεστή πίεσης με τον αντίστοιχο του EN1991-1-4 και του CICIND.



Σχήμα 3-31: Διαγράμματα μεγίστου συντελεστή πίεσης της ροής, του EN1991-1-4 και του CICIND

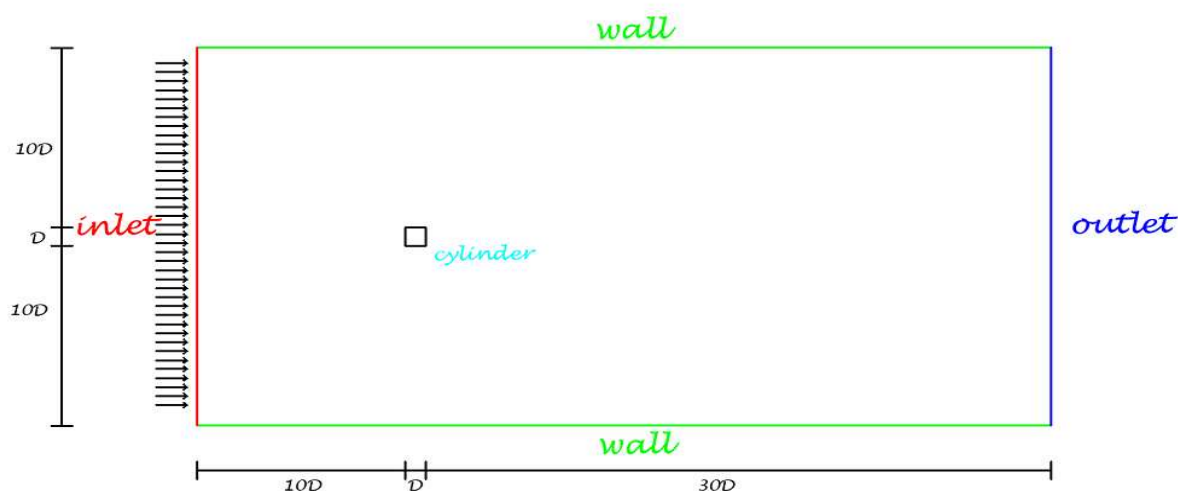
Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί η απόκλιση των πειραματικών δεδομένων με αυτών του EN1991-1-4 για τον συντελεστή δύναμης και για την μέγιστη τιμή του συντελεστή πίεσης προκύπτει από τον Πίνακα 3-4. Τα αποτελέσματα του ANSYS για το προσομοίωμα φαίνεται να είναι κάπου ενδιάμεσα για τον πρώτο αφού η σύγκλιση του συντελεστή δύναμης γίνεται για τιμή 0.35, ενώ φαίνεται να συμφωνούν περισσότερο με τα πειράματα για τον συντελεστή πίεσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-31.

4 ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΕΜΠΟΔΙΟ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων με εμπόδιο γεωμετρικής μορφής τετραγώνου. Αρχικά, θα γίνει μια αναφορά στην διαδικασία που ακολουθήθηκε και στην συνέχεια μια πιο λεπτομερής αναφορά στα αποτελέσματα των πιο αξιόπιστων μοντέλων σύμφωνα με την βιβλιογραφία, στο περιβάλλον του ANSYS και του OpenFOAM. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι απαραίτητες συγκρίσεις με τον EN1991-1-4 και με πειραματικές μετρήσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας.

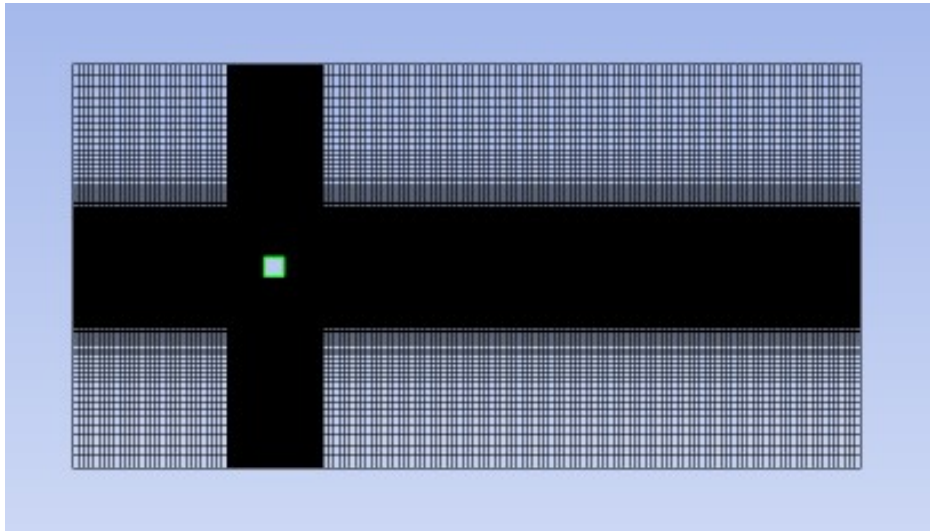
4.1 Εισαγωγή στην προσομοίωση

Για τον σαφή υπολογισμό των ανεμοπιέσεων σε τετραγωνικά εμπόδια ακολουθήθηκε μια παρόμοια διαδικασία με αυτήν του κυκλικού εμποδίου. Η διερεύνηση των ανεμοπιέσεων πραγματοποιήθηκε για δύο αριθμούς Reynolds, $2 \cdot 10^5$ και $5 \cdot 10^5$ και η γεωμετρία των υπολογιστικών πεδίων φαίνεται στο Σχήμα 4-1.

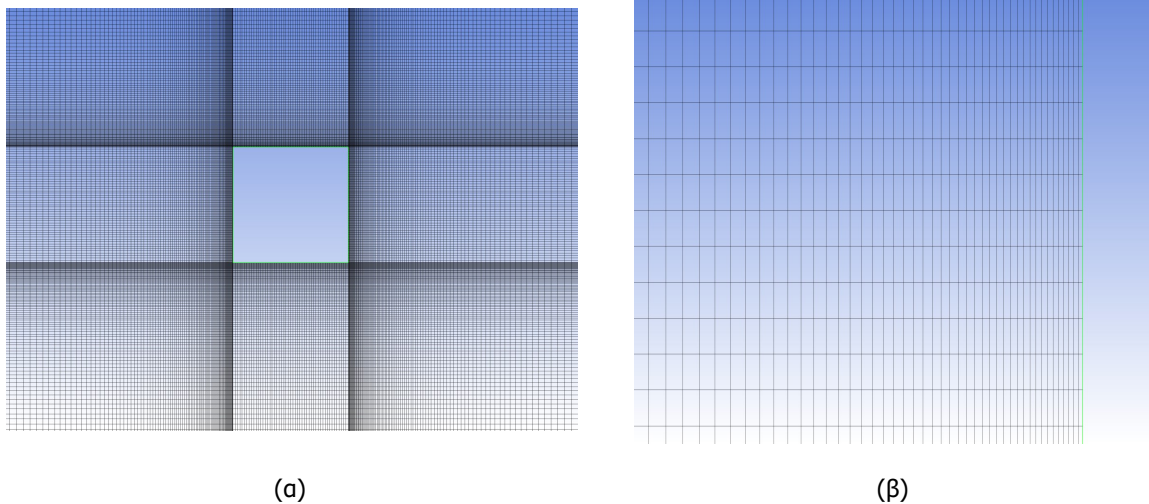


Σχήμα 4-1: Γεωμετρία υπολογιστικού πεδίου

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια διαδικασία παραμετρικών αλλαγών στο περιβάλλον του ANSYS, ως προς τον αλγόριθμο, τον συνολικό αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων, την δομή και τον αριθμό των στοιχείων της πύκνωσης και των υπόλοιπων υπολογιστικών παραμέτρων που ορίστηκαν στην παράγραφο 2.3. Η παραμετρική διαδικασία κατέληξε σε ένα υπολογιστικό πλέγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για όλες τις αναλύσεις και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-2 και στο Σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-2: Εικόνα υπολογιστικού πλέγματος



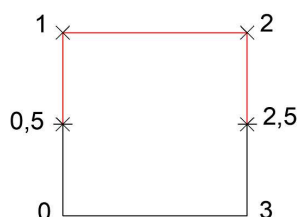
Σχήμα 4-3: Εικόνα υπολογιστικού πλέγματος κοντά στο στερεό τοίχωμα

Για τα προσομοιώματα έγινε υπόθεση έντασης τύρβης $I=3\%$ και λόγος τυρβώδης προς κινηματική συνεκτικότητα με τιμή 3. Οι τιμές των αρχικών συνθηκών που επιλέχθηκαν ορίστηκαν βάση των εξισώσεων στην υποενότητα 2.3.6. Επιλέχθηκε ο αλγόριθμος PISO με σχήματα διακριτοποίησης δευτέρου βαθμού και με αλγόριθμους επίλυσης PRESTO για την πίεση και QUICK για την ορμή, την κινητική ενέργεια και την απόσβεση της τύρβης. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών προσομοιωμάτων που θεωρήθηκαν ως πιο αξιόπιστα σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία φαίνονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων

Re	Πλέγμα	Αλγόριθμος, Μοντέλο τύρβης	y^+	CFL
$2.2 \cdot 10^5$	122900	PISO, k- ω SST	36	0.33
$5 \cdot 10^5$	122900	PISO, k- ω SST	41	0.72

Το φαινόμενο είναι περιοδικό και έτσι παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή πίεσης για το άνω μισό του τετραγωνικού εμποδίου, όπως ακριβώς και για το κυκλικό εμπόδιο, και τα σημεία του ορίζονται στο Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-4: Σημεία τετραγωνικού εμποδίου

Σύμφωνα με την λογική που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.1 παρουσιάζονται τρεις τιμές του σε κάθε προσομοίωμα. Μία όταν οι δίνες δρουν εντονότερα στο επάνω μισό του εμποδίου όπου οι πιέσεις θα έχουν την μέγιστη τιμή και αναφέρεται ως $C_{p,up}$, μια όταν οι δίνες δρουν στο μέσο της υπήνεμης πλευράς και αναφέρεται ως $C_{p,mid}$ και μία όταν αυτές δρουν στο κάτω μέρος του εμποδίου, όπου οι πιέσεις λαμβάνουν την ελάχιστη τιμή και αναφέρεται ως $C_{p,down}$. Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις που να αναφέρονται στους συντελεστές πίεσης για $Re=5 \cdot 10^5$, και η σύγκριση γίνεται με τις αντίστοιχες τιμές για $Re=2.2 \cdot 10^5$. Ακόμη τα πειραματικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα παρουσιάζουν τον συντελεστή πίεσης σε στιγμιότυπο όπου η δίνη δρα συμμετρικά στις δύο πλευρές και έτσι οι συγκρίσεις γίνονται με τον $C_{p,mid}$.

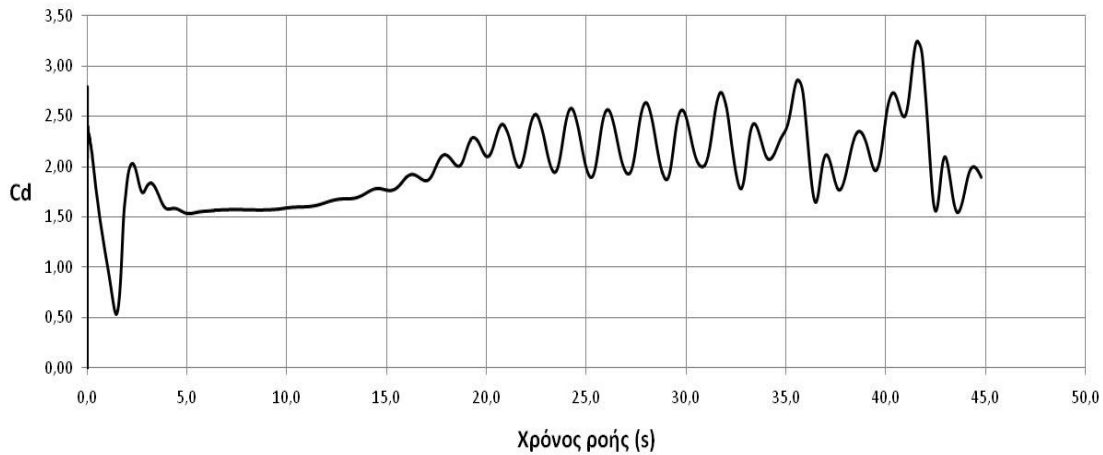
Τα προσομοιώματα στο περιβάλλον του OpenFOAM έχουν όμοια γεωμετρία σε κλίμακα 1:10 σε σχέση με τα αντίστοιχα του ANSYS και για την σύγκριση τους επιστρατεύτηκε ο όρος t^* , που ορίζεται στην Εξ.(4-1), όπου t είναι η πραγματική τιμή του χρόνου της ροής, U_∞ η ταχύτητα εισόδου στο προσομοίωμα και D η διάσταση του τετραγώνου σε κάθε προσομοίωμα.

$$t^* = \frac{t \cdot U_\infty}{D} \quad (4-1)$$

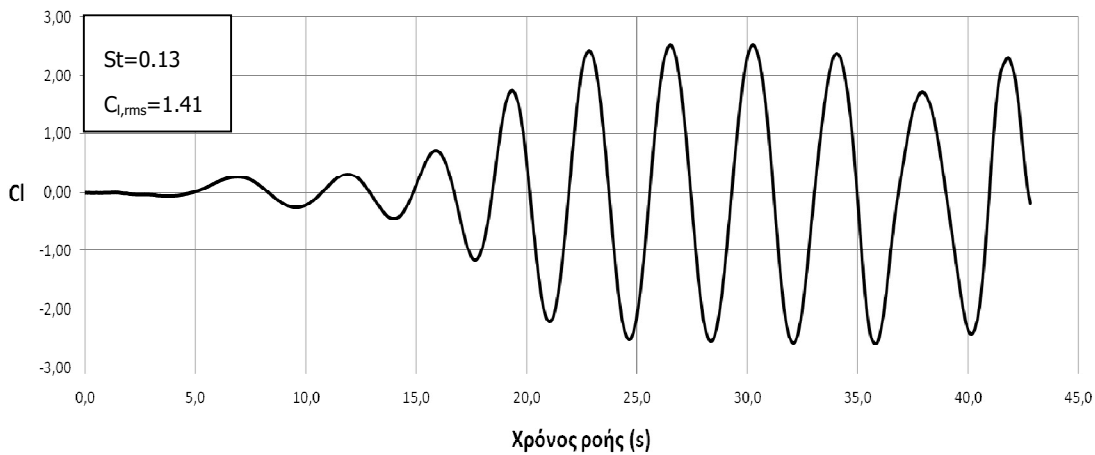
4.2 Προσομοίωση για $Re=2.2 \cdot 10^5$

4.2.1 Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS

Στο Σχήμα 4-5 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d σε σχέση με τον χρόνο ροής, ενώ στο Σχήμα 4-6 το διάγραμμα του συντελεστή ανύψωσης C_l , η $C_{l,rms}$ τιμή και ο αντίστοιχος αριθμός St .

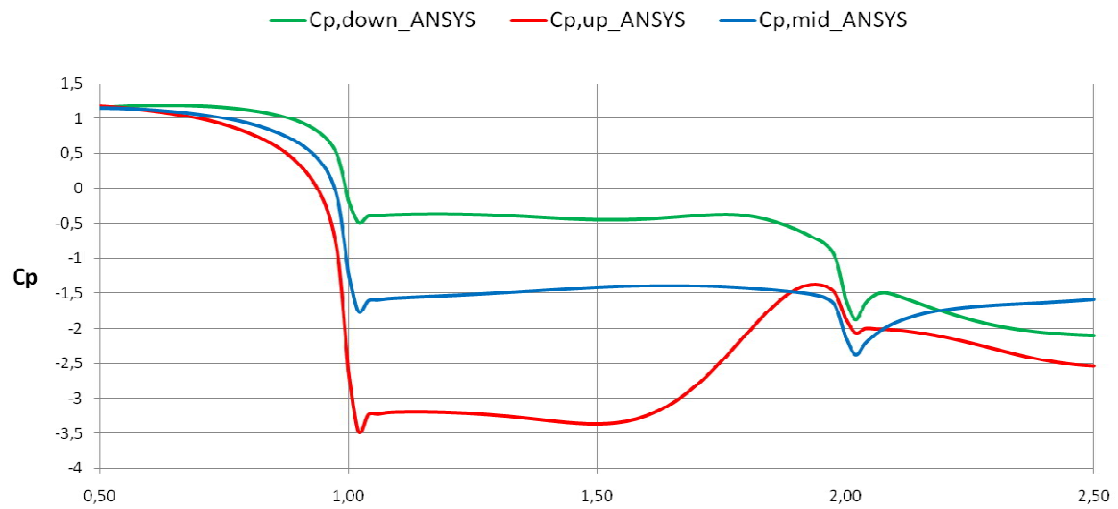


Σχήμα 4-5: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d

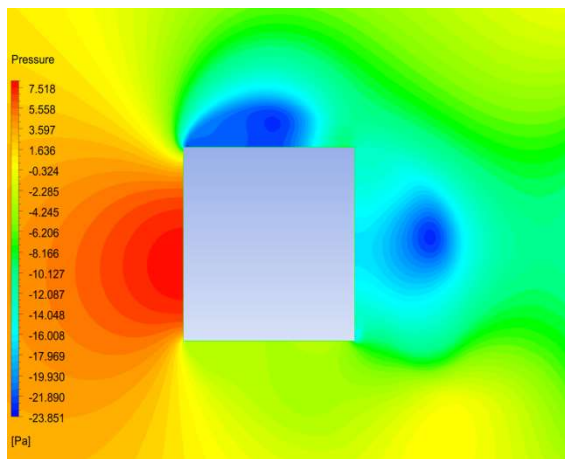


Σχήμα 4-6: Διάγραμμα συντελεστή ανύψωσης C_l

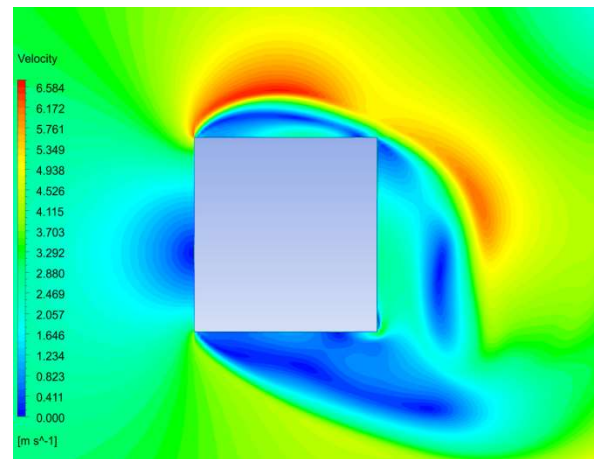
Στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζονται οι συντελεστές πίεσης για τα τρία χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής, όπως αυτά ορίστηκαν στην παράγραφο 4.1, και στο Σχήμα 4-8, στο Σχήμα 4-9 και στο Σχήμα 4-10 φαίνονται οι πιέσεις και οι ταχύτητες που επικρατούν στο πεδίο για κάθε στιγμιότυπο.



Σχήμα 4-7: Διαγράμματα συντελεστή πίεσης για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής

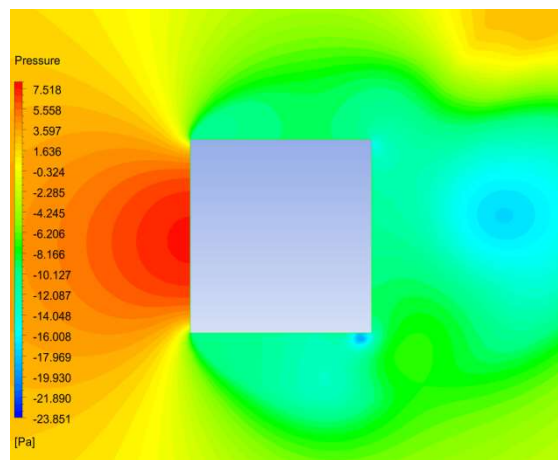


(α)

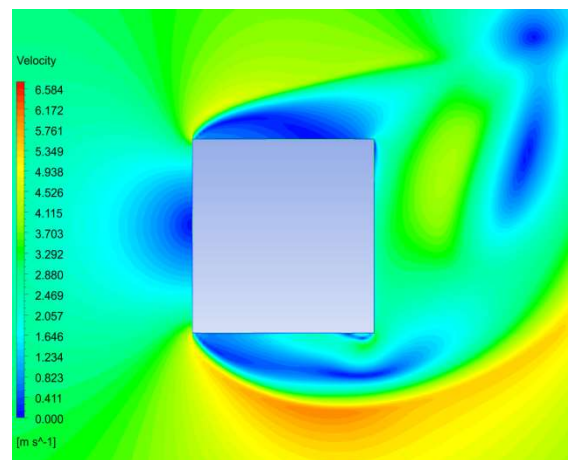


(β)

Σχήμα 4-8: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,up}$

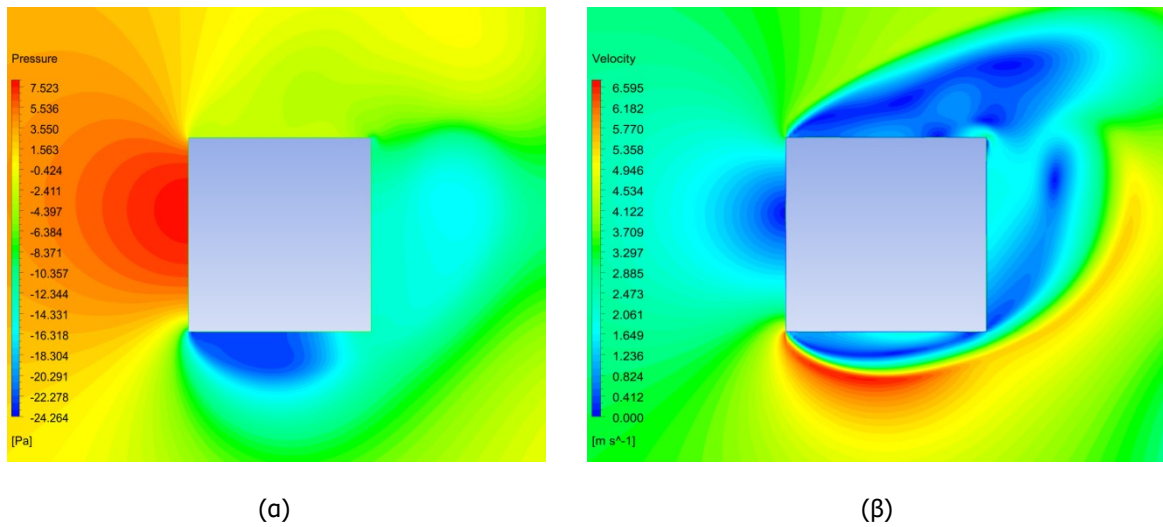


(α)



(β)

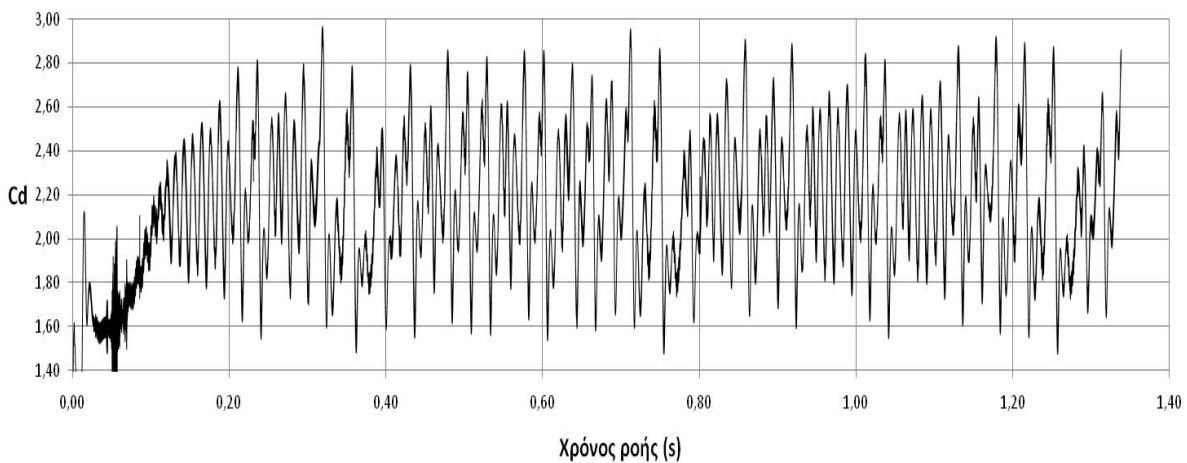
Σχήμα 4-9: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,mid}$



Σχήμα 4-10: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,down}$

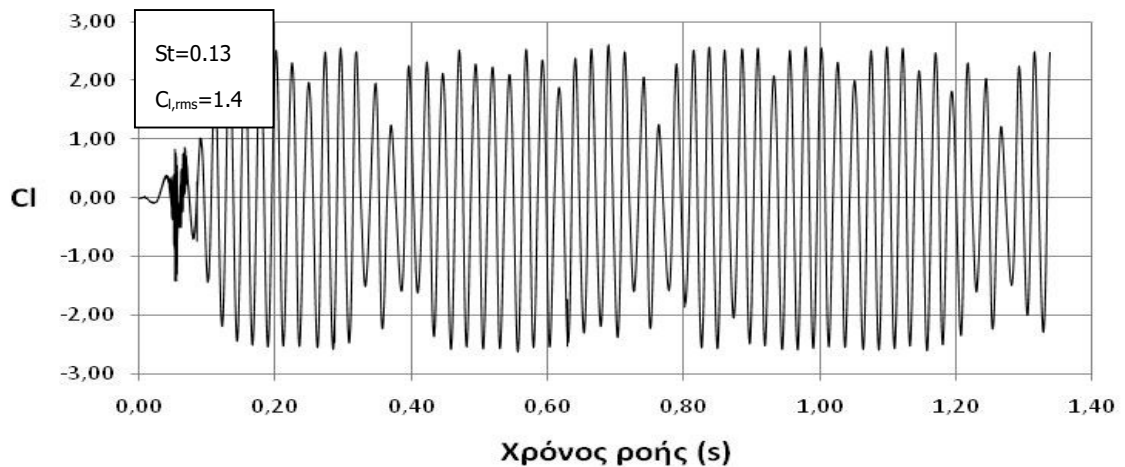
4.2.2 Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του OpenFOAM

Στο Σχήμα 4-11 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d σε σχέση με τον χρόνο ροής στο περιβάλλον του OpenFOAM.



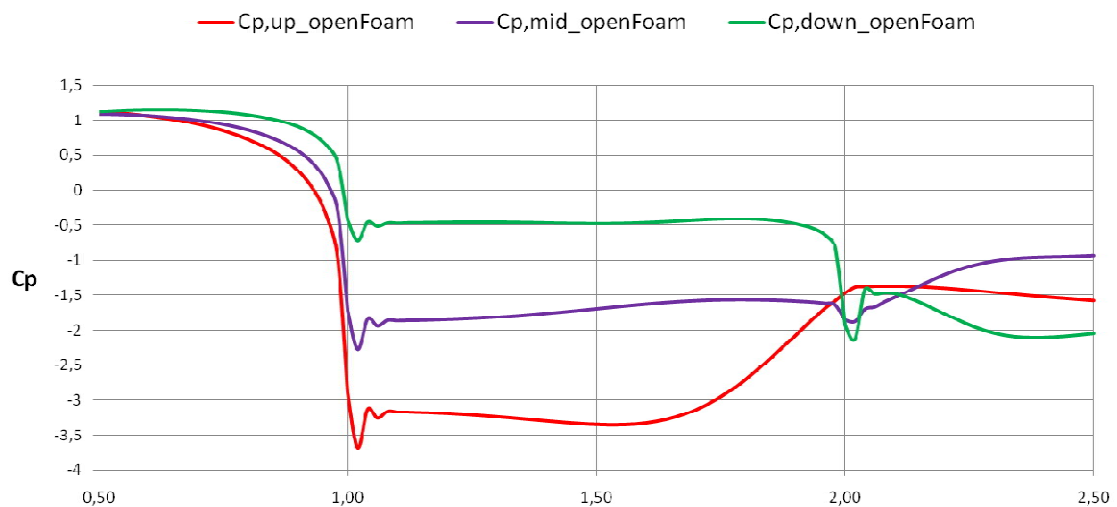
Σχήμα 4-11: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d

Στο Σχήμα 4-12 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή ανύψωσης C_l , η $C_{l,rms}$ τιμή και ο αντίστοιχος αριθμός St που προέκυψαν από την ανάλυση.

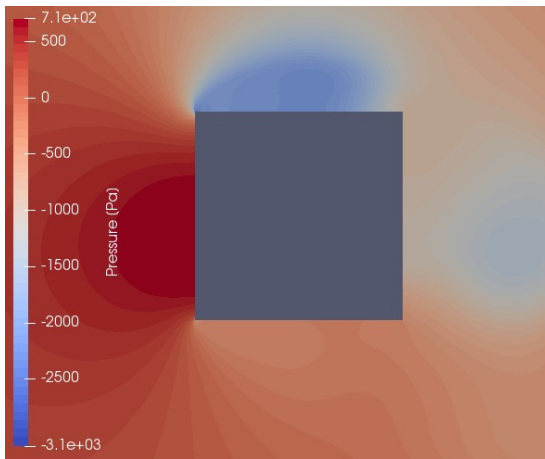


Σχήμα 4-12: Διάγραμμα συντελεστή ανύψωσης C_l

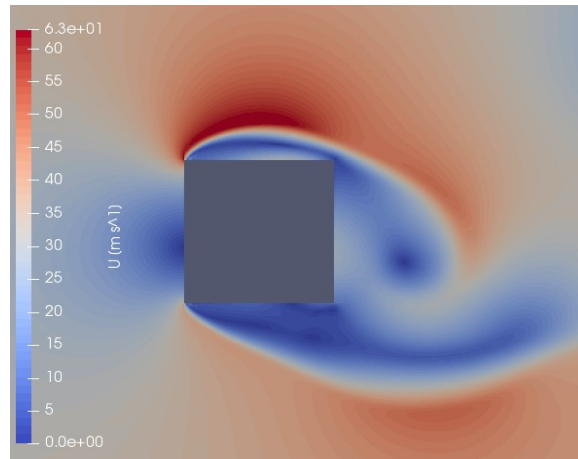
Στο Σχήμα 4-13 παρουσιάζονται οι συντελεστές πίεσης για τα τρία χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής, όπως αυτά ορίστηκαν στην παράγραφο 4.1, και στο Σχήμα 4-14, στο Σχήμα 4-15 και στο Σχήμα 4-16 φαίνονται οι πιέσεις και οι ταχύτητες που επικρατούν στο πεδίο για κάθε στιγμιότυπο.



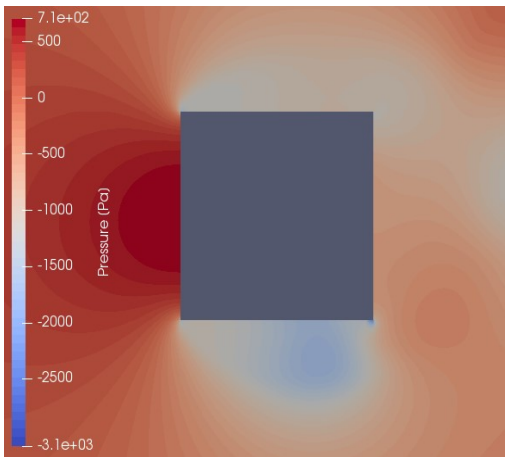
Σχήμα 4-13: Διαγράμματα συντελεστή πίεσης για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής



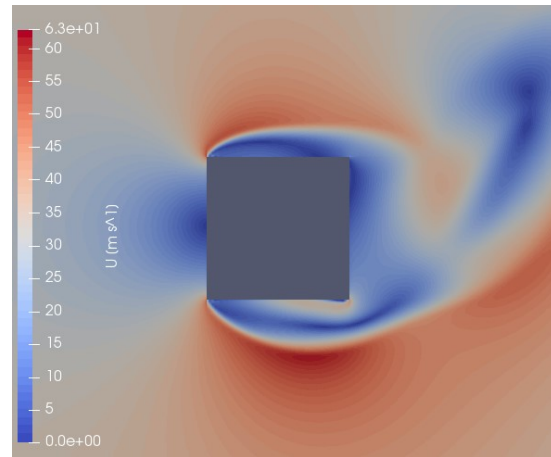
(a)



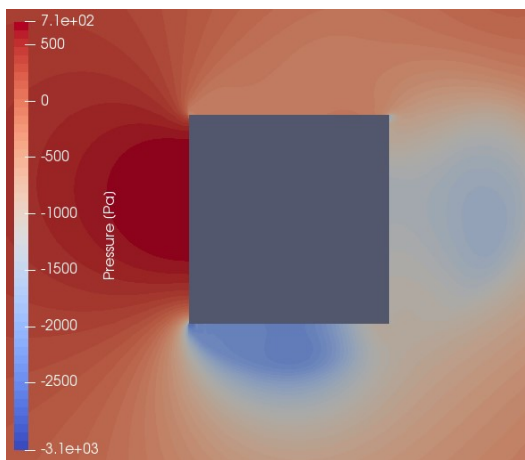
(β)

Σχήμα 4-14: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,up}$ 

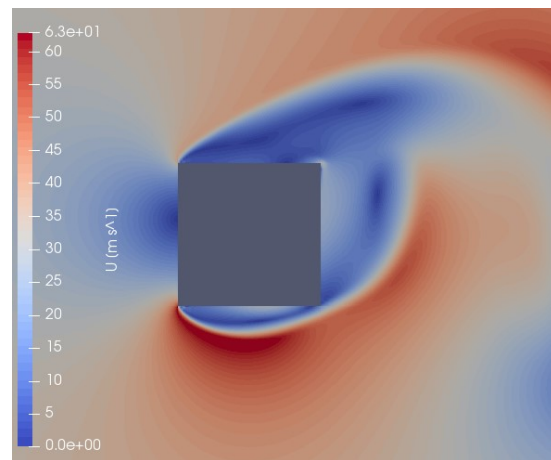
(a)



(β)

Σχήμα 4-15: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,mid}$ 

(a)

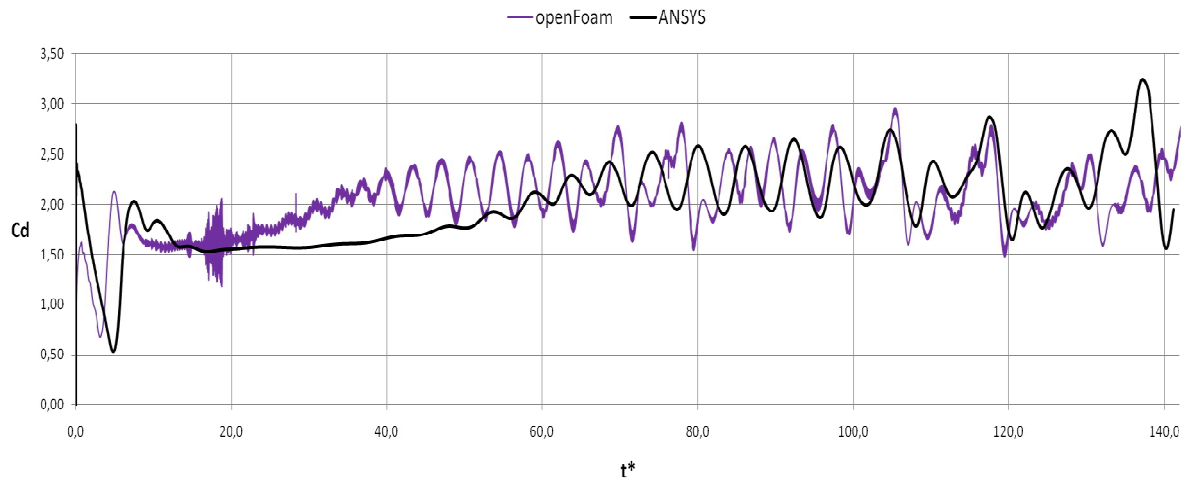


(β)

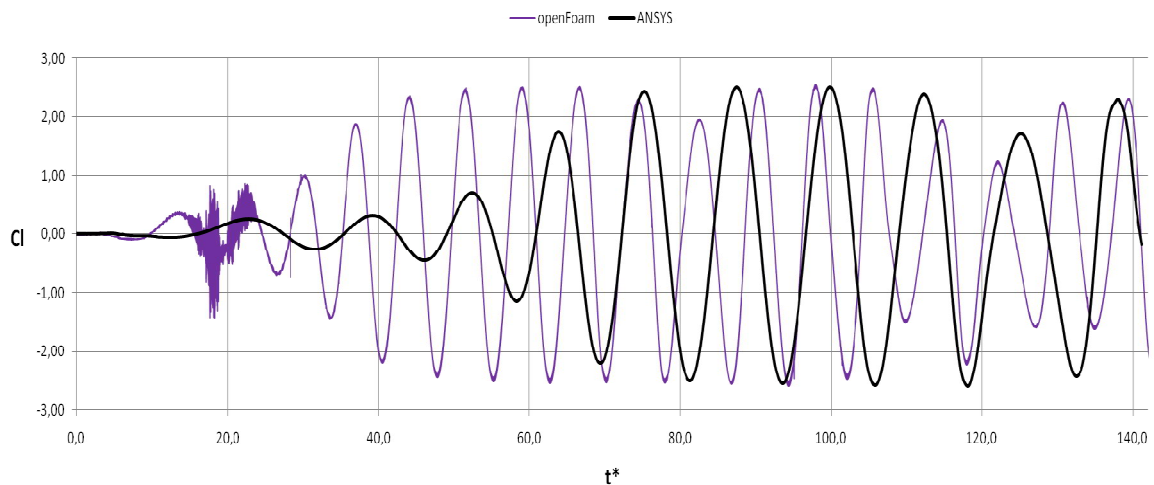
Σχήμα 4-16: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,down}$

4.2.3 Σύγκριση των δύο λογισμικών

Στην συνέχεια στο Σχήμα 4-17 και στο Σχήμα 4-18 παρουσιάζεται μια παράθεση των αποτελεσμάτων του συντελεστή δύναμης C_d και του συντελεστή ανύψωσης C_l αντίστοιχα, στα δύο λογισμικά.

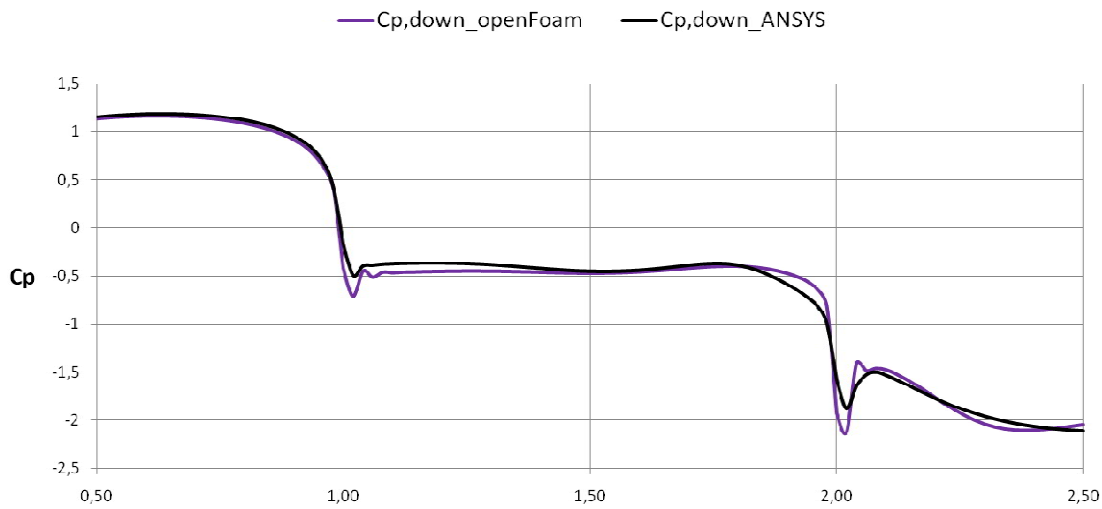


Σχήμα 4-17: Διαγράμματα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d στα δύο λογισμικά

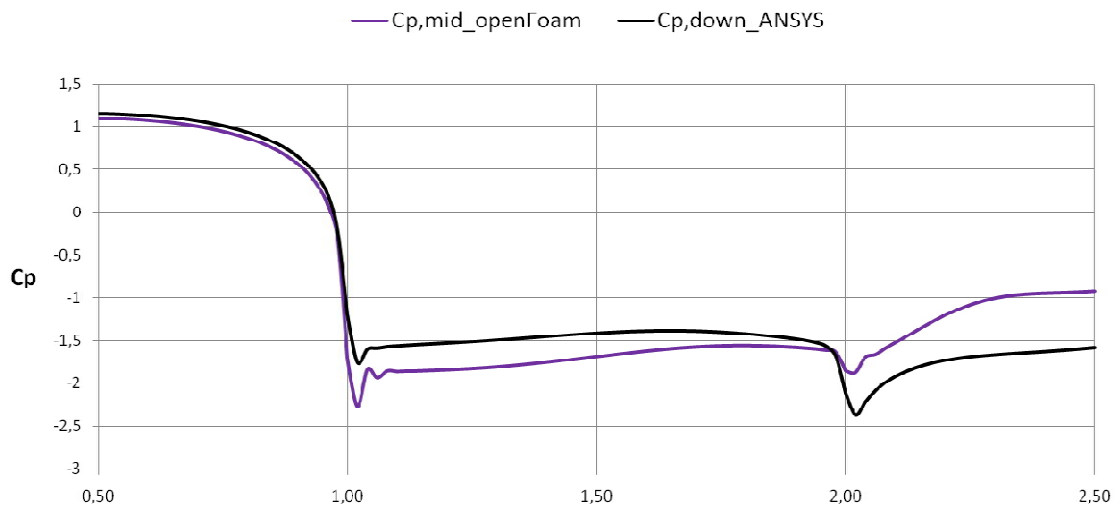


Σχήμα 4-18: Διαγράμματα συντελεστή ανύψωσης C_l στα δύο λογισμικά

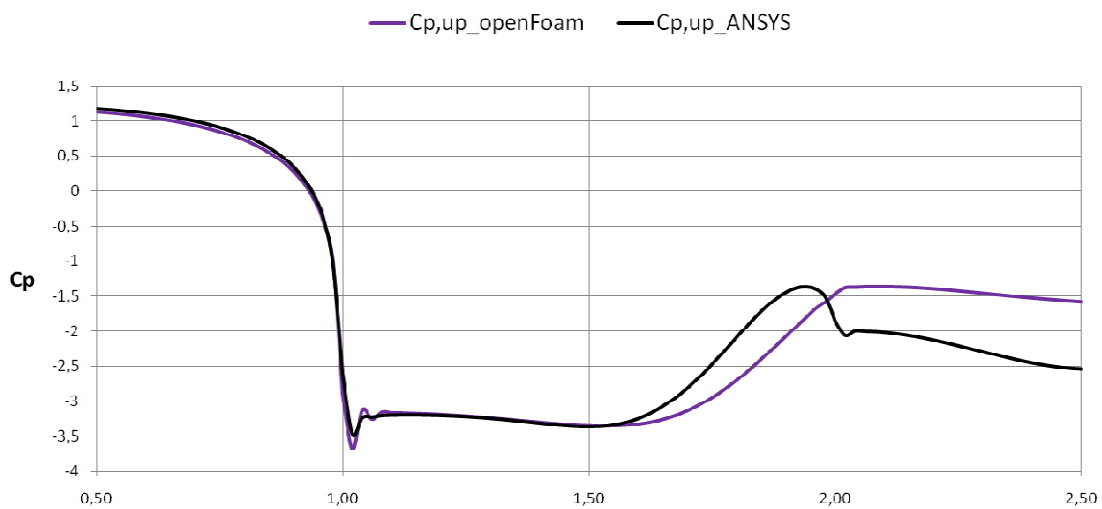
Στην συνέχεια στα Σχήμα 4-19, Σχήμα 4-20 και Σχήμα 4-21 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συντελεστών πίεσης για κάθε χαρακτηριστικό στιγμιότυπο στα δύο λογισμικά. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα όλων των συντελεστών στα δύο λογισμικά συμφωνούν αρκετά μεταξύ τους ως προς τις τιμές αλλά και ως προς την μορφή των διαγραμμάτων.



Σχήμα 4-19: Διαγράμματα των ελάχιστων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά



Σχήμα 4-20: Διαγράμματα των μέσων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά



Σχήμα 4-21: Διαγράμματα των μέγιστων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά

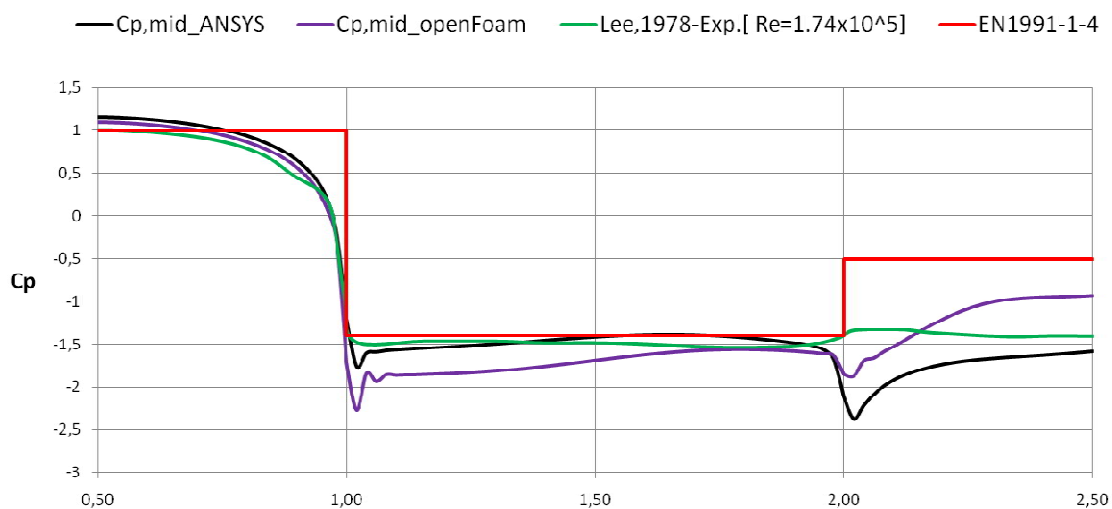
4.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και πειραματικά δεδομένα

Στον Πίνακα 4-2 φαίνεται η σύγκριση των συντελεστών οπισθέλκουσας δύναμης και ανύψωσης και του αριθμού Strouhal της ανάλυσης με τον EN1991-1-4 και με τις πειραματικές μετρήσεις που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.4.

Πίνακας 4-2: Σύγκριση αεροδυναμικών χαρακτηριστικών με τον EN1991-1-4 και τα πειραματικά δεδομένα

	C_d	$C_{l,rms}$	St
ANSYS	2.1	1.41	0.13
OpenFOAM	2.1	1.4	0.13
EN1991-1-4	2.1	-	0.12
NACA	2.1	-	-
Lee	2.05	1.22	0.13

Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στον $C_{l,rms}$ και τα πειράματα του Lee είναι την τάξης του 12%, ενώ όπως φαίνεται τα υπόλοιπα αποτελέσματα βρίσκουν μεγάλη συμφωνία τόσο με τον EN1991-1-4 όσο και με τα πειραματικά δεδομένα. Στο Σχήμα 4-22 παρουσιάζεται η σύγκριση του συντελεστή πίεσης για το στιγμιότυπο της δίνης στο μέσο της ομόρρους περιοχής με την πρόταση του EN1991-1-4 και τα πειραματικά αποτελέσματα του Lee.



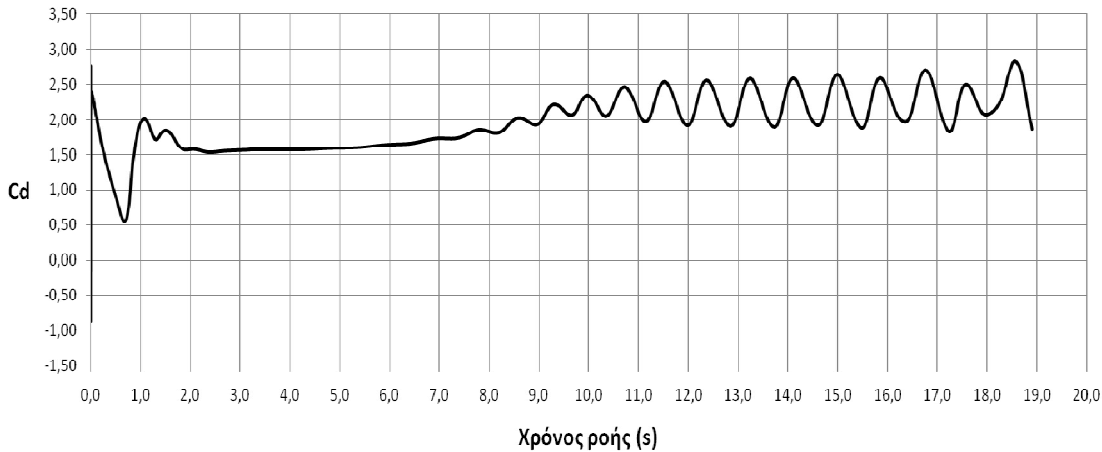
Σχήμα 4-22: Διαγράμματα των μέσω τιμών του συντελεστή δύναμης στα δύο λογισμικά, του EN1991-1-4 και των πειραματικών δεδομένων

Σημαντικό είναι να αναφερθεί η μεγάλη διαφορά που έχει η τιμή στην πλευρά (2-2,5) του EN1991-1-4 και των πειραμάτων του Lee. Τα αποτελέσματα του προσομοιώματος στο ANSYS παρουσιάζουν μια καλύτερη συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα και αξίζει να σημειωθεί ότι στο άλλο μισό της πλευράς (2-3) η τιμή του συντελεστή πίεσης σταθεροποιείται στην τιμή -1.4 που αναφέρεται στο πείραμα.

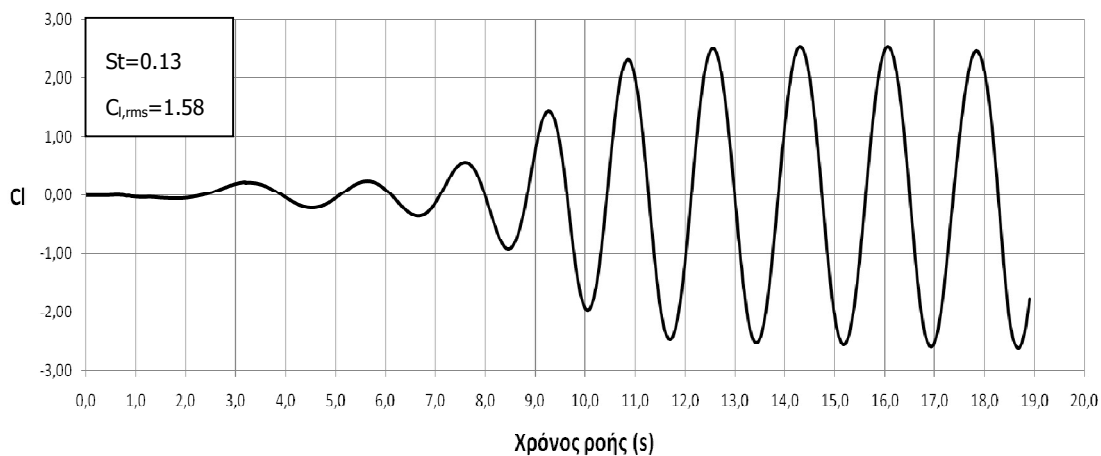
4.3 Προσομοίωση για $Re=5 \cdot 10^5$

4.3.1 Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του ANSYS

Στο Σχήμα 4-23 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d σε σχέση με τον χρόνο ροής, ενώ στο Σχήμα 4-24 το διάγραμμα του συντελεστή ανύψωσης C_l , η $C_{l,rms}$ τιμή και ο αντίστοιχος αριθμός St .

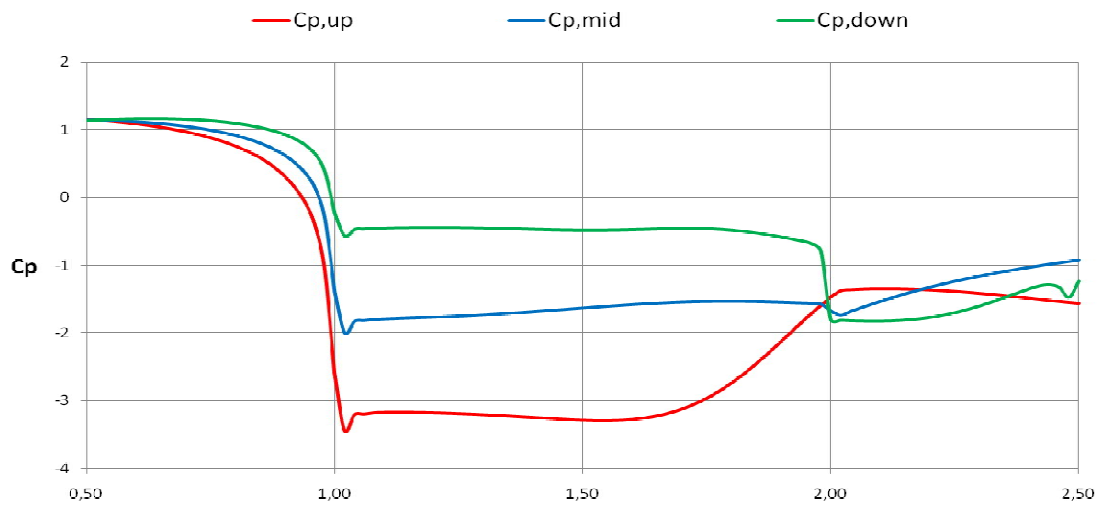


Σχήμα 4-23: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d

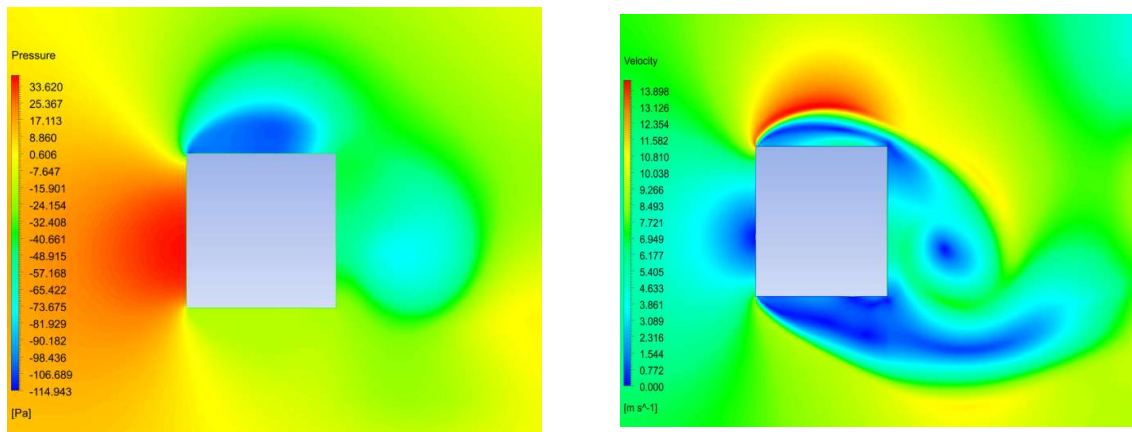


Σχήμα 4-24: Διάγραμμα συντελεστή ανύψωσης C_l

Στο Σχήμα 4-25 παρουσιάζονται οι συντελεστές πίεσης για τα τρία χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής, όπως αυτά ορίστηκαν στην παράγραφο 4.1, και στα Σχήμα 4-26, Σχήμα 4-27 και Σχήμα 4-28 φαίνονται οι πιέσεις και οι ταχύτητες που επικρατούν στο πεδίο για κάθε στιγμιότυπο.



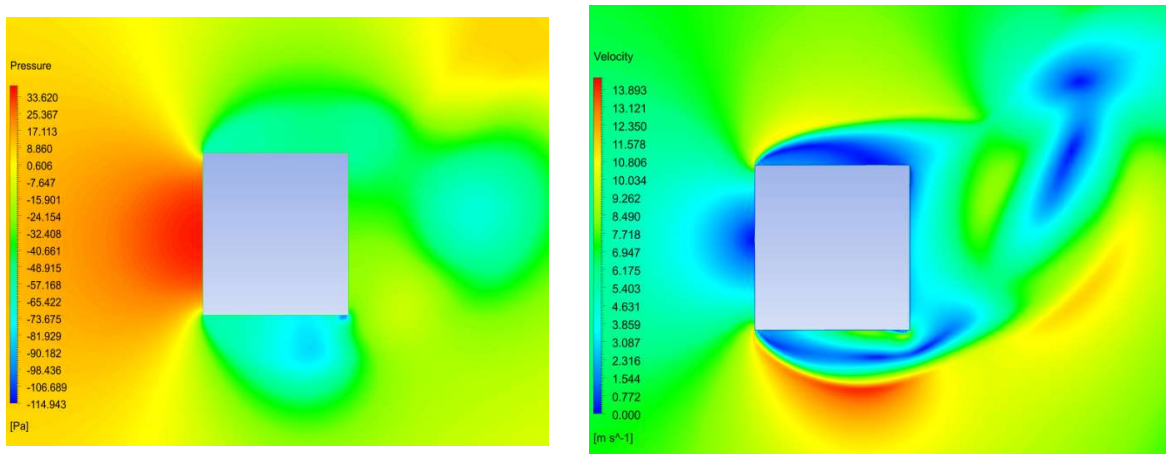
Σχήμα 4-25: Διαγράμματα συντελεστή πίεσης για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής



(α)

(β)

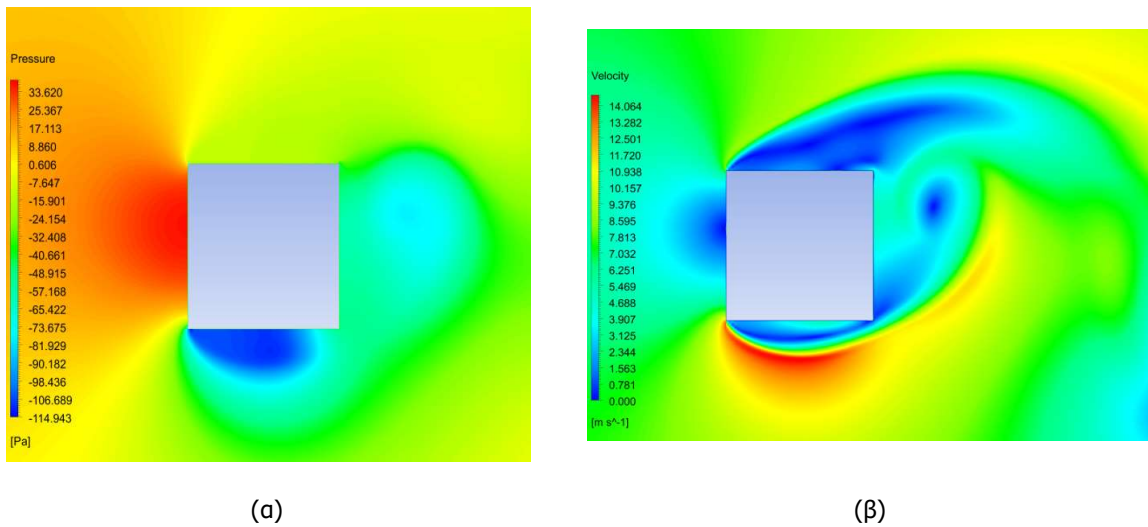
Σχήμα 4-26: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,up}$



(α)

(β)

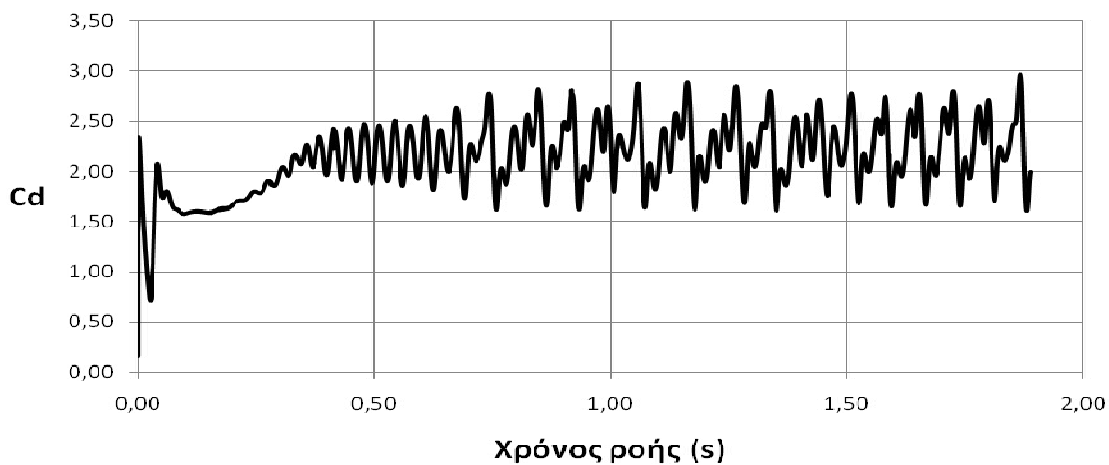
Σχήμα 4-27: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,mid}$



Σχήμα 4-28: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,down}$

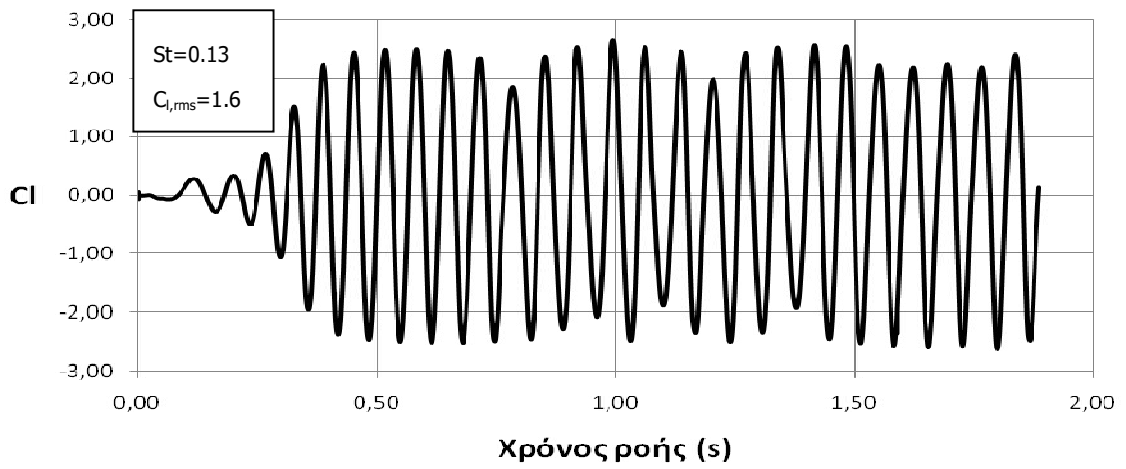
4.3.2 Αριθμητική διερεύνηση στο λογισμικό του OpenFOAM

Στην συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-29 το αποτέλεσμα της ανάλυσης στο OpenFOAM για τον συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης.

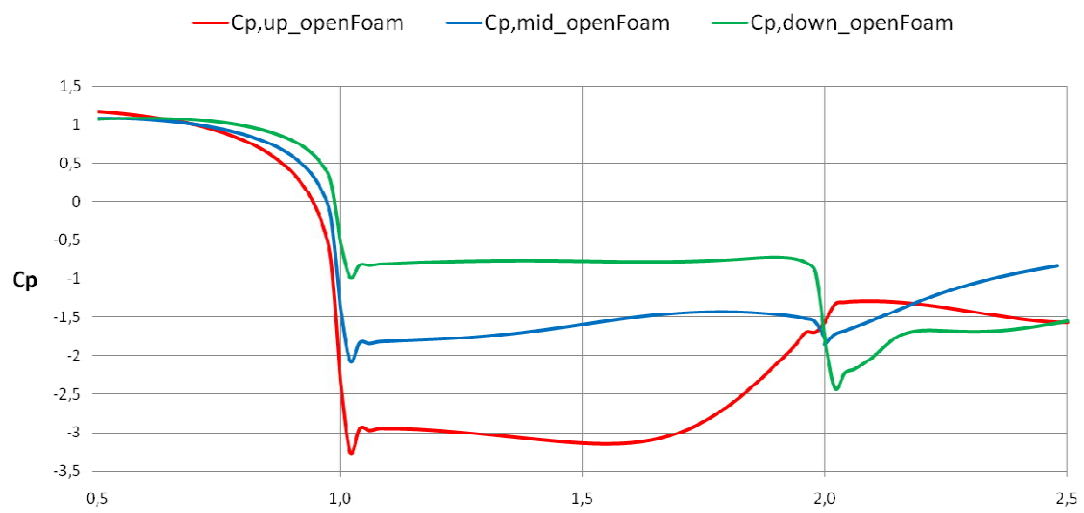


Σχήμα 4-29: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d

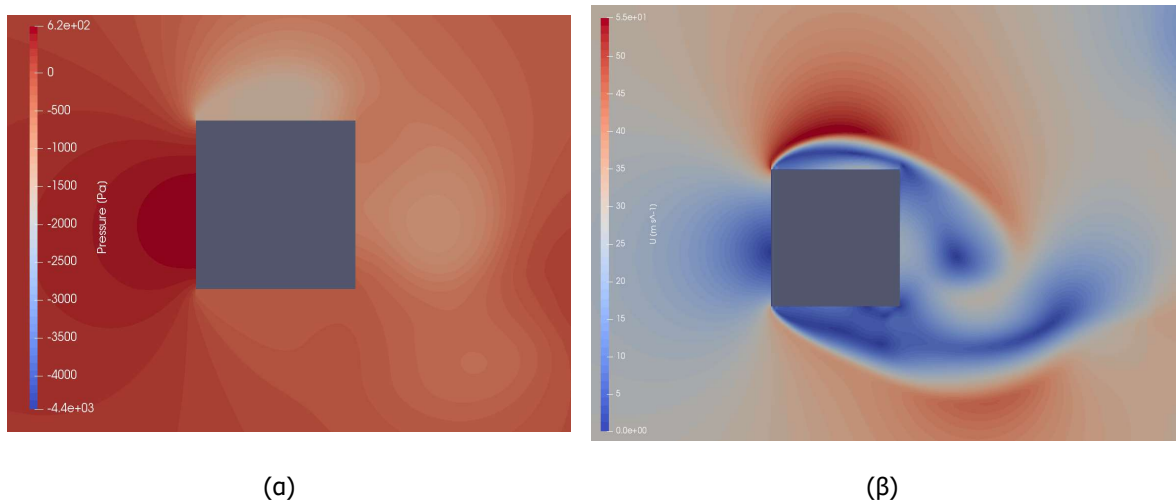
Στο Σχήμα 4-30 παρουσιάζεται το αντίστοιχο αποτέλεσμα του συντελεστή ανύψωσης, της rms τιμή του και του αριθμού Strouhal που προκύπτει. Στην συνέχεια, στο Σχήμα 4-31 φαίνονται τα διαγράμματα του συντελεστή πίεσης για τα τρία χαρακτηριστικά στιγμιότυπα και στα Σχήμα 4-32, Σχήμα 4-33 και Σχήμα 4-34 οι αντίστοιχες τιμές της πίεσης και της ταχύτητας στο υπολογιστικό πεδίο.



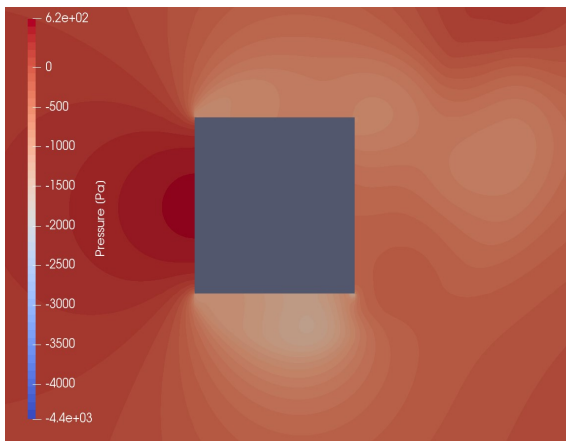
Σχήμα 4-30: Διάγραμμα συντελεστή ανύψωσης C_l



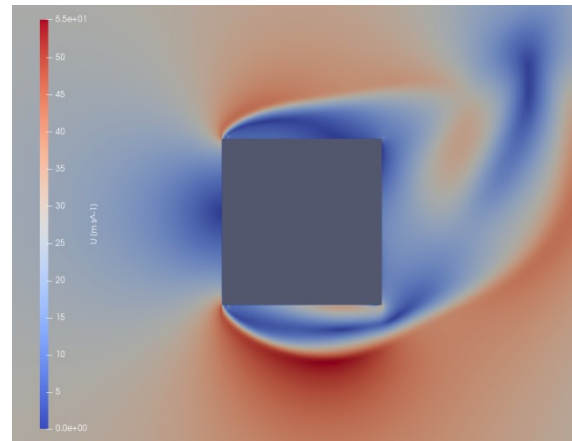
Σχήμα 4-31: Διαγράμματα συντελεστή πίεσης για τα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής



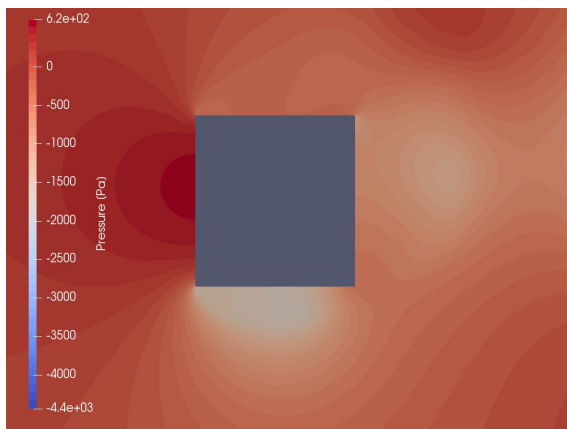
Σχήμα 4-32: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,up}$



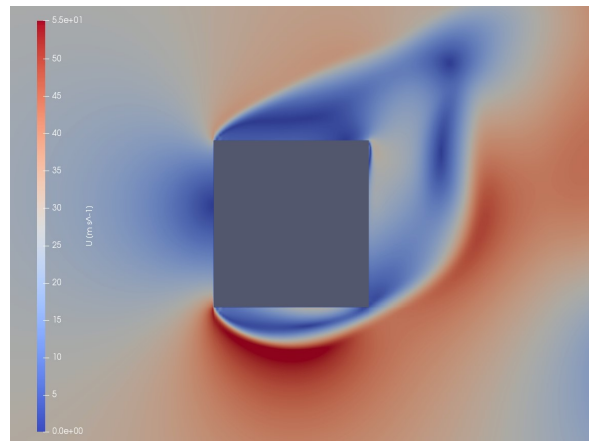
(α)



(β)

Σχήμα 4-33: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,mid}$ 

(α)

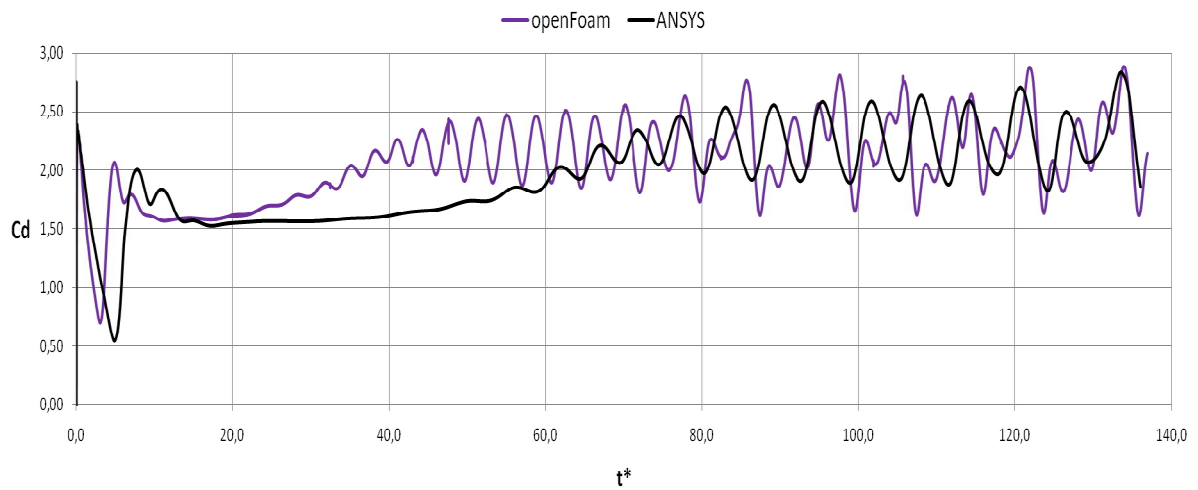


(β)

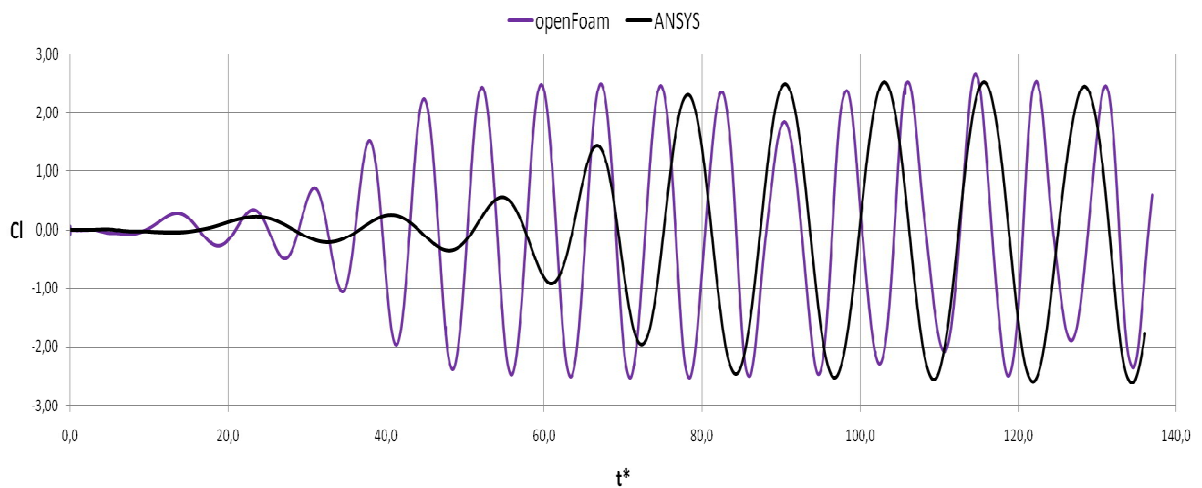
Σχήμα 4-34: Κατανομή πιέσεων (α) και ταχυτήτων (β) για $C_p=C_{p,down}$

4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων στα δύο λογισμικά χρησιμοποιήθηκε ξανά ο όρος t^* που ορίστηκε στην Εξ. (4-1) και στα Σχήμα 4-35 και Σχήμα 4-36 παρουσιάζεται η παράθεση των αποτελεσμάτων για τον συντελεστή δύναμης και ανύψωσης αντίστοιχα.

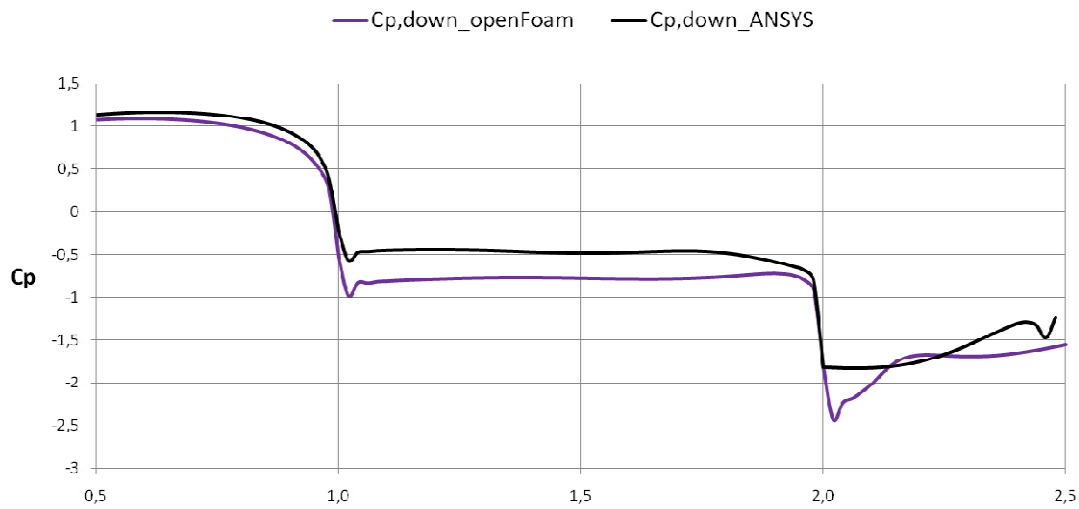


Σχήμα 4-35: Διαγράμματα συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης C_d στα δύο λογισμικά

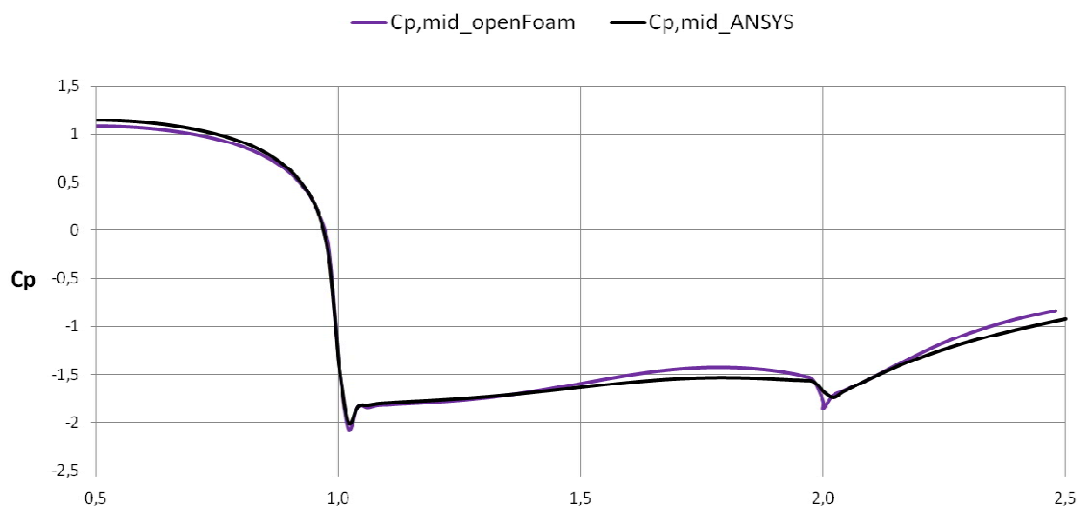


Σχήμα 4-36: Διαγράμματα συντελεστή ανύψωσης C_l στα δύο λογισμικά

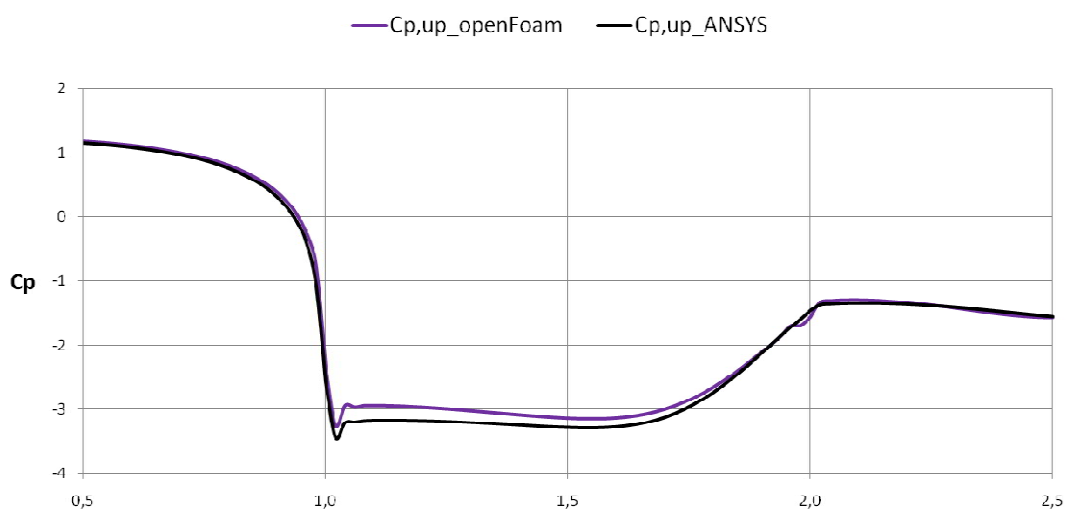
Στην συνέχεια στο Σχήμα 4-37, στο Σχήμα 4-38 και στο Σχήμα 4-39 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των συντελεστών πίεσης για τα τρία χαρακτηριστικά στιγμιότυπα. Σε όλες τι συγκρίσεις παρατηρούμε μια αρκετά καλή συσχέτιση των μεγεθών.



Σχήμα 4-37: Διαγράμματα των ελάχιστων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά



Σχήμα 4-38: Διαγράμματα των μέσων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά



Σχήμα 4-39: Διαγράμματα των μέγιστων τιμών του συντελεστή πίεσης στα δύο λογισμικά

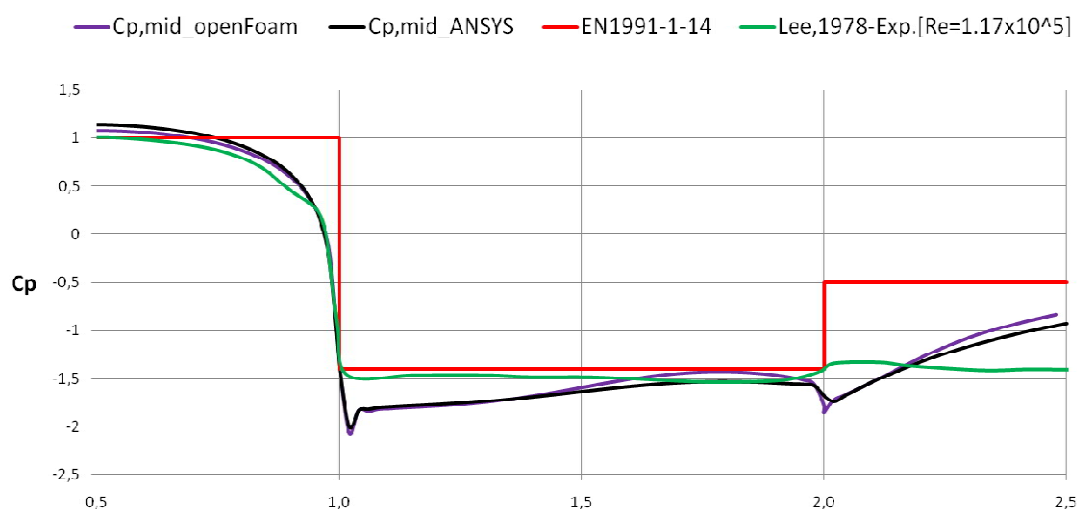
4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον EN1991-1-4 και με πειραματικά δεδομένα

Στον Πίνακα 4-3 παρουσιάζεται η σύγκριση των συντελεστών οπισθέλκουσας δύναμης, ανύψωσης και του αριθμού Strouhal της ανάλυσης με τον EN1991-1-4 και με τις πειραματικές μετρήσεις που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.4.

Πίνακας 4-3: Σύγκριση αεροδυναμικών χαρακτηριστικών με τον EN1991-1-4 και τα πειραματικά δεδομένα

	C_d	$C_{l,rms}$	St
ANSYS	2.1	1.58	0.13
OpenFOAM	2.1	1.6	0.13
EN1991-1-4	2.1	-	0.12
NACA	2.1	-	-
Lee	2.05	1.22	0.13

Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στον $C_{l,rms}$ και τα πειράματα του Lee είναι την τάξης του 12%, ενώ όπως φαίνεται τα υπόλοιπα αποτελέσματα βρίσκουν μεγάλη συμφωνία τόσο με τον EN1991-1-4 όσο και με τα πειραματικά δεδομένα. Στο Σχήμα 4-40 παρουσιάζεται η σύγκριση του συντελεστή πίεσης για το στιγμιότυπο της δίνης στο μέσο της ομόρρους περιοχής με την πρόταση του EN1991-1-4 και τα πειραματικά αποτελέσματα του Lee.



Σχήμα 4-40: Διαγράμματα των μέσω τιμών του συντελεστή δύναμης στα δύο λογισμικά, του EN1991-1-4 και των πειραματικών δεδομένων

Παρατηρούμε μια αρκετά καλή συμφωνία των προσεγγίσεων του EN1991-1-4 και των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις πλευρές (0,5-1) και (1-2), ενώ για την πλευρά (2-3) τα αποτελέσματα του συντελεστή πίεσης βρίσκονται σε μια ενδιάμεση τιμή.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η διερεύνηση που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας, παρουσιάζονται οι διαφορές των δύο λογισμικών και σχόλια σχετικά με τις γεωμετρικές μορφές που ερευνηθήκαν. Εν κατακλείδι, θα αναφερθούν προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

5.1 Περίληψη

Η υλοποίηση υπολογιστικών δυναμικών αναλύσεων ρευστομηχανικής προσφέρει σε έναν Πολιτικό Μηχανικό σημαντικές πληροφορίες για την ανεμοφόρτιση που θα πραγματοποιηθεί μέσω των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών που εξάγονται από αυτές. Τα χαρακτηριστικά αυτά υποδεικνύουν τη συμπεριφορά της κατασκευής υπό συνθήκες φόρτισης ανέμου και οδηγούν σε μια ακριβέστερη εφαρμογή των ανεμοπιέσεων στους ελέγχους αστοχίας και λειτουργικότητας και συνεπώς σε έναν ακριβέστερο σχεδιασμό των κατασκευών. Οι υπολογιστικές δυναμικές αναλύσεις ρευστομηχανικής θα πρέπει να συγκρίνονται προσεκτικά με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας και κανονισμών για την εξακρίβωση της ορθότητας τους. Για τις γεωμετρικές μορφές που εξετάστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων συσχετίστηκαν με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας και τον κανονισμό για τους αριθμούς Re που διερευνήθηκαν και παρατηρήθηκαν αποδεκτές αποκλίσεις από αυτά.

5.2 Γενικά συμπεράσματα

5.2.1 Σύγκριση ανάμεσα στα λογισμικά

Το ANSYS και το OpenFOAM είναι δύο διεθνώς αναγνωρισμένα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή υπολογιστικών δυναμικών αναλύσεων ρευστομηχανικής. Στο OpenFOAM διεξάγονται υπολογιστικές δυναμικές αναλύσεις ρευστομηχανικής, ενώ το ANSYS παρέχει την δυνατότητα πραγματοποίησης ενός εύρους αναλύσεων που διέπουν αρκετά φυσικά φαινόμενα.

Μια βασική διαφορά τους είναι ότι στο OpenFOAM δεν υπάρχει γραφικό περιβάλλον. Ο χρήστης για να ολοκληρώσει μια ανάλυση υπολογιστικής ρευστομηχανικής θα πρέπει να ασχοληθεί με την σωστή δημιουργία αρχείων σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και την εκτέλεση κατάλληλων εντολών απευθείας στον terminal. Αυτό δυσκολεύει την διαδικασία μιας και σε έναν κώδικα είναι πιο δύσκολο να εντοπιστεί κάποιο λάθος σε σχέση με μία απλή drag down επιλογή που προσφέρει ένα γραφικό περιβάλλον. Το ANSYS για τον υπολογισμό των αρχικών συνθηκών των μεγεθών της τύρβης απαιτεί από τον χρήστη μια πρόβλεψη της έντασης της τύρβης και του λόγου της κινηματικής προς της

τυρβώδους συνεκτικότητας και με μια αυτοματοποιημένη διαδικασία ορίζει τις αρχικές συνθήκες για όλο το υπολογιστικό πεδίο. Στο OpenFOAM θα πρέπει να δημιουργηθούν ειδικά αρχεία στα οποία αναφέρεται η τιμή του κάθε μεγέθους που περιγράφει το φαινόμενο σε κάθε θέση του υπολογιστικού πεδίου για την χρονική στιγμή μηδέν. Είναι λογικό ότι ένα λάθος που θα προκαλέσει αστάθεια του αλγορίθμου μπορεί να γίνει ευκολότερα κατά την διαδικασία εγγραφής ενός κώδικα στο περιβάλλον του OpenFOAM.

Ένα ακόμη μειονέκτημα του OpenFOAM σε σχέση με το ANSYS είναι ως προς την δυσκολία διαμόρφωσης του υπολογιστικού πλέγματος λόγω της έλλειψης του γραφικού περιβάλλοντος. Η διαδικασία ορισμού του υπολογιστικού πεδίου αφορά το ορισμό των γεωμετρικών σημείων μέσω συστήματος συντεταγμένων και συναρτήσεων που ορίζουν την μορφή των υπολογιστικών κελιών. Έτσι δεν υπάρχει απευθείας πρόσβαση στο αποτέλεσμα του πλέγματος και ο χρήστης πρέπει να εκτελέσει μια σειρά εντολών μέχρι να έχει οπτική πρόσβαση σε αυτό. Λογικό είναι λοιπόν η διαδικασία να απαιτεί περισσότερο χρόνο και η πιθανότητα λάθους μεγαλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο υποπρόγραμμα του ANSYS, όπου ο χρήστης έχει άμεση οπτική επαφή με τις αλλαγές που πραγματοποιεί στο υπολογιστικό πλέγμα.

Από την άλλη πλευρά το OpenFOAM είναι ένα ανοιχτό λογισμικό και ως προς την πρόσβαση και ως προς την διαδικασία του αναλυτικού υπολογισμού. Η χρήση του είναι δωρεάν ενώ υπάρχει μια αρκετά μεγάλη διαδικτυακή κοινότητα που το υποστηρίζει. Μια υπολογιστική ανάλυση οποιασδήποτε μορφής απαιτεί μια αρκετά καλή γνώση από το χρήστη σε κάθε βήμα της διαδικασίας για να αποδειχτεί επιτυχημένη, και το OpenFOAM στηρίζεται σε αυτήν την λογική μιας και απαιτεί τον σαφή προσδιορισμό του κάθε στοιχείου της ανάλυσης χωρίς καμία αυτοματοποίηση, μάλιστα δίνοντας και την δυνατότητα αλλαγής του πηγαίου κώδικα που χρησιμοποιείται σε κάθε αλγόριθμο. Στο ANSYS αυτοματοποιούνται αρκετές διαδικασίες για την διευκόλυνση του χρήστη, οπότε είναι πιθανό να εξαχθούν αποτελέσματα τα οποία ο χρήστης δεν γνωρίζει πώς έχουν προκύψει και εάν είναι σύμφωνα με τις φυσικές απαιτήσεις του προβλήματος. Ένα χαρακτηριστικό που καθορίζει μια δυναμική υπολογιστική ανάλυση ρευστομηχανικής είναι ο αριθμός CFL, όπως ορίστηκε στην παράγραφο 2.3.4. Το ANSYS θα προχωρήσει στην επίλυση του υπολογιστικού προβλήματος χωρίς να ενημερώσει για τυχόν αυξημένη τιμή του που οδηγεί με βεβαιότητα σε υπολογιστική αστάθεια η οποία εμφανίζεται μετά από έναν μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Το OpenFOAM θα ενημερώσει τον χρήστη από την πρώτη επανάληψη για την αυξημένη τιμή και η αριθμητική αστάθεια θα έρθει γρηγορότερα σε σχέση με αυτήν του ANSYS, μιας και κάνει ένα παραπάνω έλεγχο που αφορά την παροχή της ροής από κελί σε κελί. Μια ακόμη παρατήρηση είναι ότι τα ίδια υπολογιστικά προσομοιώματα φάνηκαν να συγκλίνουν δυσκολότερα στο περιβάλλον του OpenFOAM, λόγω του παραπάνω ελέγχου. Αυτή η αυστηρότητα που διέπει το OpenFOAM απαιτεί μια πιο ενεργή αφοσίωση του χρήστη και τον οδηγεί σε μεγαλύτερη βεβαιότητα ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Τέλος, σχετικά με τον χρόνο υλοποίησης μιας υπολογιστικής δυναμικής ανάλυσης ρευστομηχανικής τα δύο λογισμικά φαίνεται να μην έχουν μεγάλη διαφορά και χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι αναλύσεις που παρουσιάστηκαν για το κυκλικό εμπόδιο, το οποίο είχε μια απαίτηση μεγαλύτερου συνολικού αριθμού πεπερασμένων στοιχείων, διήρκεσαν η κάθε μια για περισσότερο από μια εβδομάδα σε παράλληλη ανάλυση σε οχτώ επεξεργαστές. Λογικό είναι λοιπόν ότι αυτού του είδους οι αναλύσεις απαιτούν από τον χρήστη να γνωρίζει με ακρίβεια την διαδικασία μιας και ένα μικρό λάθος μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

5.2.2 Διαφορές λόγω της γεωμετρίας του εμποδίου

Για μια τυρβώδη, μη ομοιόμορφη και ασυμπίεστη ροή η ύπαρξη απότομων γεωμετρικών μεταβολών, όπως οι αιχμές του τετραγώνου, σημαίνει προκαθορισμός του σημείου αποκόλλησης. Στα διαγράμματα του συντελεστή πίεσης, σε όλες τις περιπτώσεις, στο σημείο αιχμής παρατηρείται μια απότομη αλλαγή

της πίεσης η οποία συνοδεύει την φυσική ερμηνεία της αποκόλλησης της ροής που φαίνεται εντονότερα και στις εικόνες των ταχυτήτων. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της αποκόλλησης είναι ότι στο σημείο όπου πραγματοποιείται μηδενίζεται η διατμητική δύναμη και υπολογιστικά αυτό μεταφράζεται σε $\gamma^+ = 0$. Έτσι η όλη διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα μια απότομη μεταβολή του όρου σε γειτονικά κελιά η οποία απαιτεί λεπτή διαχείριση, ώστε να πετύχει η σύγκλιση της υπολογιστικής ανάλυσης με ταυτόχρονη διατήρηση της ορθότητας του φυσικού φαινομένου. Λόγω των παραπάνω ο υπολογισμός της αποκόλλησης τη ροής είναι μια υπολογιστικά απαιτητική διαδικασία που συνοδεύεται από κατάλληλους αλγορίθμους επίλυσης και πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος.

Η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στα δύο γεωμετρικά σχήματα είναι ότι στο κυκλικό εμπόδιο η αποκόλληση δεν πραγματοποιείται σε σταθερό σημείο αλλά έχει ένα εύρος που σχετίζεται με τον αριθμό Reynolds και την κατάσταση του οριακού υποστρώματος. Το οριακό υπόστρωμα για τους Re που ενδιαφέρουν ένα Πολιτικό Μηχανικό είναι πλήρως τυρβώδες και έτσι η τυχαιότητα των διαταραχών παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου και καταλήγει σε ένα εύρος αποκόλλησης χωρίς προκαθορισμένη γωνία [11]. Αυτό μας οδηγεί σε πιο αυστηρές πυκνώσεις του πλέγματος, σε μεγαλύτερα υπολογιστικά χωρία, που οδηγούν με την σειρά τους σε μεγαλύτερο αριθμό συνολικών πεπερασμένων στοιχείων.

Από τις αναλύσεις για $Re = 5 \cdot 10^5$ που πραγματοποιήθηκαν και για τα δύο γεωμετρικά σχήματα παρατηρείται σημαντική διαφορά ως προς τις τιμές των συντελεστών δύναμης. Το κυκλικό εμπόδιο αποτελεί ένα πιο αεροδυναμικό σχήμα εφόσον οι μέγιστοι συντελεστές δύναμης και πίεσης είναι μικρότεροι από τους αντίστοιχους του τετραγωνικού εμποδίου. Ως εκ τούτου μια κατασκευή τετραγωνικής γεωμετρίας θα αντισταθεί περισσότερο στο φαινόμενο του ανέμου και θα παραλάβει μεγαλύτερες πιέσεις, όπως φαίνεται και στους μέγιστους συντελεστές πίεσης που αναπτύσσονται. Μια επιπλέον διαφορά ανάμεσα στις δύο γεωμετρικές μορφές αποτελεί η γωνία αποκόλλησης της ροής. Όπως ήδη αναφέρθηκε λόγω της φύσης του φαινομένου της αποκόλλησης οι απότομες αλλαγές της γεωμετρίας καθορίζουν εξ' αρχής την γωνία αποκόλλησης, η οποία είναι σταθερή κατά την εξέλιξη της ροής στο τετραγωνικό εμπόδιο.

5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ο άνεμος είναι δυνατό να πνέει από διαφορετικές γωνίες με αποτέλεσμα η γωνία πρόσπτωσης να μην είναι σταθερή σε ένα μέλος ή μια κατασκευή, οπότε αυτή θα μπορούσε να διενεργήσει ως παραμετρική αλλαγή για τον υπολογισμό και την σύγκριση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών που θα προκύψουν. Στην παράγραφο 5.2.2 αναφέρθηκαν τα μειονεκτήματα που παρατηρούνται σε εμπόδια με αιχμηρές γωνίες σε σχέση με εμπόδια κυκλικής μορφής και μια επιπλέον πρόταση προς διερεύνηση είναι η επιρροή των στρογγυλεμένων άκρων στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής.

Με την παραδοχή ότι κάθε αριθμός Reynolds οδηγεί σε μια καθορισμένη εξέλιξη του φαινομένου η δημιουργία ενός προσομοιώματος σε κλίμακα με ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας εισόδου, αποτελεί μια ενδιαφέρουσα διερεύνηση με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων.

Ο άνεμος αποτελεί μια δυναμική φόρτιση για τα έργα ενός Πολιτικού Μηχανικού και είναι δυνατόν να προκληθούν φαινόμενα αεροελαστικής αστάθειας. Ένα κριτήριο σύμφωνα με το οποίο η αεροελαστική αστάθεια παρατηρείται είναι η ταύτιση της ιδιοσυχνότητας του στατικού συστήματος με την συχνότητα εμφάνισης των δυνάμεων που έχει σαν αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση των δυνατών μετατοπίσεων. Η τάξη μεγέθους των μετατοπίσεων εξαρτάται άμεσα από την τάξη μεγέθους των δυνάμεων οπισθέλκουσας και ανύψωσης και από τα στατικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του μέλους/κατασκευής. Ένα ζήτημα προς διερεύνηση θα μπορούσε να αποτελεί οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτές οι δυνάμεις αποτελούν έναυσμα για την πραγματοποίηση του φαινομένου της αεροελαστικής αστάθειας. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται ότι στην γεφυροποιία η

αεροελαστική αστάθειας του καταστρώματος ελέγχεται μέσω του υπολογισμού της δύναμης ανύψωσης η οποία συγκρίνεται με το ίδιο βάρος του [13].

Όπως ήδη αναφέρθηκε το φαινόμενο της αεροελαστικής αστάθειας αντιμετωπίζεται με ειδικές μεθόδους απόσβεσης. Μια πρόταση για περαιτέρω έρευνα είναι τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του υλικού και της γεωμετρίας της διατομής του μέλους που θα κληθεί να αντιμετωπίσει την αεροελαστική αστάθεια, αφού αποτελούν σημαντικοί παράμετροι που ορίζουν την απόσβεση του στατικού συστήματος. Η απόσβεση του υλικού θα αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στην απόκριση του μέλους ώστε να αποτρέψει τις καταστροφικές επιπτώσεις του φαινομένου, ενώ η γεωμετρία της διατομής ίσως να έχει καθοριστική συσχέτιση με την μέγιστη δυνατή απόσβεση που μπορεί να προσφέρει το στατικό σύστημα.


```

    object      transportProperties;
}
// * * * * *
transportModel  Newtonian;

nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.000014607;

// * * * * *

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|  \ \ /  /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \ \ /  /  O p e r a t i o n | Version: 4.x |
|  \ \ /  /  A n d      | Web: www.OpenFOAM.org |
|  \ \ /  /  M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       turbulenceProperties;
}
// * * * * *

simulationType  RAS;

RAS
{
    RASModel      kOmegaSST;

    turbulence    on;

    printCoeffs  on;
}

// * * * * *

```

Υστερα τροποποιούνται οι παράμετροι στο φάκελο 0 για τον ορισμό των αρχικών συνθηκών σύμφωνα με τους τις εξισώσεις της παραγράφου 2.3.6. Τα script για κάθε μέγεθος παρουσιάζονται στην συνέχεια.

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|  \ \ /  /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \ \ /  /  O p e r a t i o n | Version: 4.x |
|  \ \ /  /  A n d      | Web: www.OpenFOAM.org |
|  \ \ /  /  M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       k;
}
// * * * * *

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 4.08;

boundaryField
{
    outlet
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue  uniform 4.08;
        value      uniform 4.08;
    }
    wallup
    {
        type      symmetryPlane;
    }
}

```

```

    walldown
    {
        type            symmetryPlane;
    }
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 4.08;
    }
    cylinder
    {
        type            kqRWallFunction;
        value            uniform 4.08;
    }
    frontAndBackPlanes
    {
        type            empty;
    }
}

// ***** //
/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
|  \ \ /  /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \ \ /  /  O p e r a t i o n  | Version: 4.x |
|  \ \ /  /  A n d      | Web: www.OpenFOAM.org |
|  \ \ /  /  M a n i p u l a t i o n  | |
/*-----*-*/
FoamFile
{
    version    2.0;
    format     ascii;
    class      volScalarField;
    object     omega;
}
// * * * * * //

dimensions      [0 0 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 27957;

boundaryField
{
    outlet
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      uniform 27957;
        value            uniform 27957;
    }
    wallup
    {
        type            symmetryPlane;
    }
    walldown
    {
        type            symmetryPlane;
    }
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 27957;
    }
    cylinder
    {
        type            omegaWallFunction;
        Cmu              0.09;
        kappa             0.41;
        E                 9.8;
        beta1             0.075;
        value             uniform 27957;
    }
    frontAndBackPlanes
    {
        type            empty;
    }
}

```

```

    }
}
// *****

/*-----*- C++ -*-----*\
| =====|
| \\      /| F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /| O p e r a t i o n | Version: 4.x |
| \\      /| A n d      | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\      /| M a n i p u l a t i o n | |
| \\      /| | |
\*-----*-

FoamFile
{
    version      2.0;
    format        ascii;
    class         volScalarField;
    object        nut;
}
// * * * * *

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    outlet
    {
        type          calculated;
        value          uniform 0;
    }
    wallup
    {
        type          symmetryPlane;
    }
    walldown
    {
        type          symmetryPlane;
    }
    inlet
    {
        type          calculated;
        value          uniform 0;
    }
    cylinder
    {
        type          nutUSpaldingWallFunction;
        Cmu           0.09;
        kappa         0.41;
        E             9.8;
        value          uniform 0;
    }
    frontAndBackPlanes
    {
        type          empty;
    }
}

// *****

/*-----*- C++ -*-----*\
| =====|
| \\      /| F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /| O p e r a t i o n | Version: 4.x |
| \\      /| A n d      | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\      /| M a n i p u l a t i o n | |
| \\      /| | |
\*-----*-

FoamFile
{
    version      2.0;
    format        ascii;
    class         volScalarField;
}

```



```

    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (33 0 0);
    }
    cylinder
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 0 0);
    }
    frontAndBackPlanes
    {
        type            empty;
    }
}

// ***** //

```

Τέλος, ορίζονται οι υπολογιστικοί παράμετροι, δηλαδή το χρονικό βήμα, ο αλγόριθμος, τα σχήματα διακριτοποίησης και οι αλγόριθμοι επίλυσης για κάθε μέγεθος. Αυτό υλοποιείται με την κατάλληλη επεξεργασία των αρχείων στον φάκελο system. Παρουσιάζονται οι επιλογές που έγιναν στα πλαίσια της ανάλυσης μέσω των παρακάτω scripts. Το εύρος των επιλογών του χρήστη είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του λογισμικού και η αναφορά τους δεν θεωρείται σκόπιμη στα πλαίσια του παραρτήματος.

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      /  F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O p e r a t i o n   | Version: 4.x |
| \\      /  A n d                | Web: www.OpenFOAM.org |
|  \\    /  M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       controlDict;
}
// ***** //

application      pimpleFoam;

//startFrom      startTime;
startFrom        latestTime;

startTime        0;

stopAt           endTime;

endTime          50;

deltaT           0.00001;

writeControl     runtime;

writeInterval    0.001;

purgeWrite       0;

writeFormat      ascii;

writePrecision   8;

writeCompression off;

timeFormat       general;

timePrecision    6;

runtimeModifiable yes;

```



```

adjustTimeStep no;

//maxCo          0.9;
maxDeltaT        0.1;

// ***** //
functions
{
forces_object
{
    type forces;
    functionObjectLibs ("libforces.so");

    enabled          false;

    writeControl     timeStep;
    writeInterval    1;

    patches ("cylinder");

    pName p;
    Uname U;

    rho rhoInf;
    rhoInf 1.225;

    CofR (0 0 0);
}
forceCoeffs_object
{
    type forceCoeffs;
    functionObjectLibs ("libforces.so");
    patches ("cylinder");

    pName p;
    Uname U;
    rho rhoInf;
    rhoInf 1.225;

    log true;

    CofR (0.0 0 0);
    liftDir (0 1 0);
    dragDir (1 0 0);
    pitchAxis (0 0 1);
    magUInf 33;
    lRef 1.0;
    Aref 0.009213;

    writeControl     timeStep;
    writeInterval    1;
}
yplus
{
    type yPlus;
    libs ("libfieldFunctionObjects.so");
    writeControl writeTime;
    log false;
}
};

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 4.x |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation | |
/*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object fvSolution;
}

```

```

}
// * * * * * //
solvers
{
  P
  {
    solver          GAMG;
    tolerance        1e-3;
    relTol           0.001;
    smoother         GaussSeidel;
    nPreSweeps       0;
    nPostSweeps      2;
    cacheAgglomeration on;
    agglomerator     faceAreaPair;
    nCellsInCoarsestLevel 100;
    mergeLevels      1;

    minIter         2;
  }
  pFinal
  {
    $p;
    relTol          0;
  }
  U
  {
    solver          PBiCG;
    preconditioner  DILU;
    tolerance        1e-03;
    relTol           0;
    minIter         3;
  }
  UFinal
  {
    solver          PBiCG;
    preconditioner  DILU;
    tolerance        1e-03;
    relTol           0;
    minIter         3;
  }
  omega
  {
    solver          PBiCG;
    preconditioner  DILU;
    tolerance        1e-03;
    relTol           0;
    minIter         3;
  }
  omegaFinal
  {
    solver          PBiCG;
    preconditioner  DILU;
    tolerance        1e-03;
    relTol           0;
    minIter         3;
  }
  k
  {
    solver          PBiCG;
    preconditioner  DILU;
    tolerance        1e-03;
    relTol           0;
    minIter         3;
  }
  kFinal
  {
    solver          PBiCG;
    preconditioner  DILU;
    tolerance        1e-03;
    relTol           0;
    minIter         3;
  }
}
PIMPLE

```

```

{
//If you set nOuterCorrectors to 1 is equivalent to piso
    nOuterCorrectors 1;

    nCorrectors 2;
    nNonOrthogonalCorrectors 1;
    pRefCell      0;
    pRefValue     0;
}

relaxationFactors
{
/*
    fields
    {
        p          0.3;
    }
    equations
    {
        U          0.7;
        k          0.7;
        omega      0.7;
    }
*/
}

// ***** //

/*----- C++ -----*\
| ===== |
| \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / O p e r a t i o n : 4 . x |
| \ \ / / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
|*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// ***** //
ddtSchemes
{
    default      CrankNicolson 0.5;
}
gradSchemes
{
    grad(p)      leastSquares;

    default      cellMDLimited Gauss linear 0.5;

    grad(U)      cellMDLimited Gauss linear 0.5;
}
divSchemes
{
    default      none;

    div(phi,U)   Gauss linearUpwindV grad(U);

    div((nuEff*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;

    div(phi,k)   Gauss linearUpwind default;

    div(phi,omega) Gauss linearUpwind default;
}
laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear limited 1;
}
interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

```

```
}
snGradSchemes
{
    default          limited 1;
}
wallDist
{
    method meshWave;
}
// ***** //
```

Εφόσον ολοκληρώθηκε το “στήσιμο” της ανάλυσης μέσω των παραπάνω αρχείων εκτελέστηκε η εντολή [rimpleFoam >log &] με την οποία ξεκινά η ανάλυση τα στοιχεία της οποίας αποθηκεύονται στο αρχείο log για καλύτερη ενημέρωση του χρήστη. Μέσω της εντολής [tail -f log] υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης τους αρχείου και της κατάστασης της ανάλυσης. Για πραγματοποίηση της ανάλυσης σε παράλληλους επεξεργαστές χρησιμοποιείται η εντολή decomposePar μέσω της οποίας χωρίζεται το πλέγμα στον αριθμό των επεξεργαστών που είναι διαθέσιμοι και στην συνέχεια εκτελείται η εντολή [mpirun -np <number of processors> rimpleFoam >log &] για την εκκίνηση της ανάλυσης. Για τον τερματισμό της ανάλυσης ο χρήστης ενημερώνεται για τον αριθμό PID του log αρχείου και εκτελεί την εντολή [kill <PID number>].

Η προβολή των αποτελεσμάτων της ανάλυσης γίνεται στο περιβάλλον του ParaView για το οποίο απαιτείται να δημιουργηθεί ένας φάκελος με τίτλο <title>.foam και να εκτελεστεί η εντολή [paraview <title>.foam].

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Mendis, T. Ngo, N. Haritos, A. Hira, B. Samali, J. Cheung «Wind Loading on Tall Buildings», EJSE Special Issue: Loading on Structures (2007)
- [2] Ευρωκώδικας 1 – Δράσεις στις κατασκευές, Μέρος 1-4: Γενικές Δράσεις – Δράσεις ανέμου
- [3] URL:https://en.wikipedia.org/wiki/Compressible_flow#Mach_number,_wave_motion,_and_sonic_speed
- [4] FLUENT, Inc., ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2009
- [5] Sumer, B.M.& Fredsoe, «Hydrodynamics Around Cylindrical Structures» (Advanced Series on Ocean Engineering), World Scientific Pub Co Inc.(2006)
- [6] OpenFOAM Ltd., «OpenFOAM User Guide»
URL: <http://www.openfoam.org/docs/user/>
- [7] «THE CICIND CHIMNEY BOOK INDUSTRIAL CHIMNEYS OF CONCRETE OR STEEL», Zurich, Switzerland 2005
- [8] George W. Jones, Jr. Lungley Research Center, Joseph J. Cincotta, «Aerodynamic forces on a stationary and oscillating circular cylinder at high Reynolds numbers», NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION WASHINGTON, D. C. FEBRUARY 1969
- [9] Noel K. Delany and Norman E. Sorensen ,Ames Aeronautical Laboratory Moffett Field «NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS TECHNICAL NOTE 3038 ,LOW-SPEED DRAG OF CYLINDERS OF VARIOUS SHAPES», Calif. May 1956
- [10] Lee, B. E., «The Effect of Turbulence on the Surface Pressure Field of a Square Prism», 1975
- [11] Sumer & Fredsoe, «Hydrodynamics Around Cylindrical Structures», Technical University of Denmark 2006

- [12] URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_\(1940\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_(1940))
- [13] Ιωάννης Βάγιας, Άρης Ηλιόπουλος, Παύλος Θανόπουλος, «Σχεδιασμός σύμμικτων γεφυρών από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα» Εκδ. Κλειδάριθμος 2016