



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Χημικών Μηχανικών
Δ.Π.Μ.Σ. «Υπολογιστική Μηχανική»
Ροή Ρευστών

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Τζέκος Παναγιώτης

Επιβλέπων: Δημήτρης Μπούρης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2024

National Technical University of Athens
School of Chemical Engineering
Joint Post Graduate Studies Program “Computational Mechanics”
Fluids Direction

FLOW SIMULATION AROUND A PHOTOVOLTAIC ARRAY

Master Thesis
by

Panagiotis Tzekos

Supervisor: Demetri Bouris
Professor NTUA

Abstract

Photovoltaic arrays are primarily located in large open fields and are often exposed to high wind speeds which result in the development of a complex flow field around them. These conditions cause significant aerodynamic loads which are exerted on the panels. Aerodynamics loads on, and wind flow field around, an array of ten ground mounted solar panels that are placed in an open field, are investigated using a steady state Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) approach. A full scale two-dimensional (2D) solver is employed with the Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ and Re-Normalisation Group $k-\epsilon$ (RNG) turbulence models. A grid independence study is conducted to ensure the accuracy of a single PV study case. Simulation results for the flow around a PV array are validated

using wind tunnel experimental data. The effects of the Reynolds number on the calculation of pressure and force coefficients on the PVs are also investigated. The flow around the PV array is studied, considering the chosen geometric characteristics. A comparative analysis of the two turbulence models (k- ϵ RNG & k- ω SST) is carried out for both south and north wind directions. Parametric studies are conducted on the distance of the PVs from the ground and the distance between them, respectively. The force coefficient obtained from simulations is compared to that calculated by the Eurocode. The results show that all the trailing rows are in the wake of the leading row. For all the wind directions studied here, the first windward row experiences the maximum wind loads. As the distance from the ground decreases, the forces exerted on the panels also decrease. Also, the results showed that for the smallest distance ratio between the PVs, $L/H=2.4$, the force coefficient of the second PV exhibits a negative sign. Finally, the values of the force coefficient calculated by the Eurocode seem to overestimate the forces compared to those calculated from the simulations.

Keywords: solar panels; array; ground mounted; wind load; RANS; k- ϵ RNG; k- ω SST;

Ευχαριστίες

Με το πέρας της μεταπτυχιακής μου εργασίας και κατά συνέπεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω, αρχικά, τον καθηγητή μου Δρ. Δημήτρη Μπούρη για την ανάθεση του θέματος και για την άμεση υποστήριξη και επικοινωνία, καθώς και για την καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τα σχόλια του ήταν πάντα εύστοχα και ουσιαστικά με αποτέλεσμα την ομαλή περάτωση της. Επίσης, για τις γνώσεις και τα εργαλεία που απέκτησα μέσα από το μάθημά του, τα οποία χρησιμοποίησα άμεσα στην επαγγελματική μου πορεία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Λεικάκη Ιωάννη για τη συμβολή του, ώστε να ξεκινήσω την ενασχόλησή μου με την επιστήμη της αεροδυναμικής, για την πίστη του σε εμένα και τη συνεχή υποστήριξή του σε επιστημονικά και μη θέματα. Τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο για την αδιάκοπη συνεργασία μας από τα τελευταία έτη των προπτυχιακών σπουδών μου έως και σήμερα. Για την καθοδήγησή του και τις συμβουλές του σε επιστημονικά και μη ζητήματα. Επίσης, για την εξασφάλιση υπολογιστικών πόρων για την εκτέλεση των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας. Τους ευχαριστώ που με τη στάση τους μου υπενθυμίζουν να μην τα παρατάω ποτέ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου Μακρή Ηλία και Ταβλά Σοφία για όλη τους τη βοήθεια σε θέματα κώδικα και μαθηματικών. Το φίλο και συμφοιτητή μου Παυλίδη Χαρίτων για την κοινή μας πορεία από το τελευταίο έτος των προπτυχιακών σπουδών μου έως και σήμερα και για όλες τις όμορφες και δύσκολες στιγμές που αντιμετωπίσαμε μαζί. Τους ευχαριστώ για όλες τις όμορφες συζητήσεις και τη συνεργασία μας στα μαθήματα του μεταπτυχιακού, η οποία ήταν καθοριστική για την εμβάθυνση στο πεδίο της υπολογιστικής μηχανικής πέρα από το σκοπό της περάτωσης των μαθημάτων. Επίσης, το φίλο μου Παλάμπιγκι Αργύρη για τη βοήθειά του κατά το τελευταίο έτος των προπτυχιακών σπουδών μου σχετικά με την εκμάθηση του λογισμικού OpenFOAM το οποίο χρησιμοποίησα στην παρούσα εργασία, καθώς και για τις συζητήσεις μας σε θέματα υπολογιστικής και πειραματικής ρευστομηχανικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου Κωνσταντίνο Τζέκο και τη μητέρα μου Αφροδίτη Μπενδέλα για την συνεχή στήριξη και ενθάρρυνση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών μου. Την κοπέλα μου Σέβη Καζαντζίδα για την υπομονή και την υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, η οποία ήταν καθοριστική, ώστε να αντιμετωπίσω με επιτυχία όλες τις δυσκολίες που προκύπταν.

Σας ευχαριστώ θερμά όλους.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Σκοπός και Στόχοι.....	3
2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	4
3	Μεθοδολογία	12
3.1	Οι εξισώσεις Navier-Stokes	13
3.2	Μοντέλα Τύρβης.....	14
3.2.1	Το Μοντέλο k-ε RNG.....	15
3.2.2	Το Μοντέλο k-ω SST	16
3.3	Υπολογιστικό Χωρίο και Πλέγμα.....	18
3.4	Συνοριακές Συνθήκες.....	21
3.5	Διακριτοποίηση και Επίλυση των Εξισώσεων	23
4	Επικύρωση και Επαλήθευση των Προσομοιώσεων	25
4.1	Μελέτη Ανεξαρτησίας Πλέγματος.....	25
4.2	Επικύρωση των Αποτελεσμάτων.....	31
4.2.1	Επικύρωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.....	33
4.2.2	Επικύρωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου	36
4.2.3	Εξάρτηση της λύσης από τον αριθμό Reynolds	39
5	Συγκριτική Μελέτη των Μοντέλων Τύρβης	43
5.1	Περίπτωση Μελέτης Ροής Ανέμου με Νότια Διεύθυνση.....	43
5.2	Περίπτωση Μελέτης Ροής Ανέμου με Βόρεια Διεύθυνση	54
6	Παραμετρική Μελέτη της Απόστασης των Φ/Β από το έδαφος	66
7	Παραμετρική Μελέτη της Απόστασης μεταξύ των Φ/Β	78
8	Σύγκριση του Συντελεστή Δύναμης που υπολογίστηκε από τις Προσομοιώσεις με τιμές του EN 1991-1-4:200	90
9	Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα	93
	Βιβλιογραφία	97

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Οπτικοποίηση του ασύμμετρου δρόμου δίνης πίσω από την κεκλιμένη πλάκα. $Re_c=20000$, $\alpha=18^\circ$ (Breuer and Jonićić (2001)).....	6
Σχήμα 2-2 Ροϊκές Γραμμές του μέσου πεδίου ροής για πέντε διαφορετικές προσομοιώσεις. ($Re_c=20000$, $\alpha=18^\circ$) (Breuer et al (2003))	8
Σχήμα 3-1 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/B .	18
Σχήμα 3-2 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπολογιστικού χωρίου.....	18
Σχήμα 3-3 Σχηματική απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου και των γεωμετρικών συνθηκών στις συνοριακές του επιφάνειες.....	19
Σχήμα 3-4 a) Υπολογιστικό χωρίο, b) ζώνη πύκνωσης γύρω από τη συστοιχία Φ/B , c) Επίπεδα πύκνωσης και στρώματα λεπτών κελιών γύρω από την επιφάνεια των Φ/B	21
Σχήμα 4-1 Ζώνη πύκνωσης γύρω από το Φ/B για το α) αραιό, β) το μεσαίο και γ) το πυκνό πλέγμα.	27
Σχήμα 4-2 Επίπεδα πύκνωσης και στρώματα λεπτών κελιών γύρω από την επιφάνεια του Φ/B για το α) αραιό, β) το μεσαίο και γ) το πυκνό πλέγμα.....	28
Σχήμα 4-3 Υπόλοιπα των εξισώσεων της πίεσης, της ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για α) το αραιό, β) το μεσαίο και γ) το πυκνό πλέγμα- Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος.	29
Σχήμα 4-4 Σύγκριση των λύσεων του αραιού, μεσαίου και πυκνού πλέγματος μέσω του αδιάστατου συντελεστή πίεσης της άνω και κάτω πλευράς του Φ/B	30
Σχήμα 4-5 Λύσεις του α) μεσαίου και β) πυκνού πλέγματος με γραμμές σφάλματος το GCI.	31
Σχήμα 4-6 Σχηματικό διάγραμμα της Μετεωρολογικής αεροσήραγγας του Πανεπιστημίου του Κολοράντο Miller and Zimmerman (1981).	32
Σχήμα 4-7 Υπό κλίμακα μοντέλα συστοιχίας Φ/B εντός της αεροσήραγγας του Πανεπιστημίου του Κολοράντο (Miller and Zimmerman, 1981).	33
Σχήμα 4-8 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας δέκα Φ/B για περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου – Επικύρωση των αποτελεσμάτων.	34
Σχήμα 4-9 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)	34
Σχήμα 4-10 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση	

αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)	35
Σχήμα 4-11 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)	36
Σχήμα 4-12 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/B για περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.....	37
Σχήμα 4-13 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)	37
Σχήμα 4-14 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)	38
Σχήμα 4-15 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)	39
Σχήμα 4-16 Συγκριτικό διάγραμμα της διαφοράς αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και του κάτω τμήματος του πρώτου Φ/B της συστοιχίας. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) για δύο αριθμούς Reynolds ($Re = 10^5$ & $Re = 2.44 \times 10^6$).....	40
Σχήμα 4-17 Συγκριτικό διάγραμμα της διαφοράς αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και του κάτω τμήματος του δεύτερου Φ/B της συστοιχίας. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) για δύο αριθμούς Reynolds ($Re = 10^5$ & $Re = 2.44 \times 10^6$).....	40
Σχήμα 4-18 Συγκριτικό διάγραμμα της διαφοράς αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και του κάτω τμήματος του πέμπτου Φ/B της συστοιχίας. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) για δύο αριθμούς Reynolds ($Re = 10^5$ & $Re = 2.44 \times 10^6$).....	41
Σχήμα 5-1 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/B για περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.....	43
Σχήμα 5-2 Σύγκριση των μοντέλων τύρβης k-ω SST & k-ε RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B, ΔC_p , – Περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.....	45
Σχήμα 5-3 Συγκριτικό διάγραμμα των μοντέλων τύρβης k-ω SST & k-ε RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/B, ΔC_p , – Περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.....	46

Σχήμα 5-4 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.....	47
Σχήμα 5-5 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.....	48
Σχήμα 5-6 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και το έκτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.....	49
Σχήμα 5-7 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.....	50
Σχήμα 5-8 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.....	51
Σχήμα 5-9 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.	52
Σχήμα 5-10 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.....	53
Σχήμα 5-11 Ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.....	53
Σχήμα 5-12 Ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.....	54
Σχήμα 5-1 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/B για περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.....	54
Σχήμα 5-13 Σύγκριση των μοντέλων τύρβης k-ω SST & k-ε RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B, ΔC _p , – Περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.	56
Σχήμα 5-14 Συγκριτικό διάγραμμα των μοντέλων τύρβης k-ω SST & k-ε RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/B, ΔC _p , – Περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.....	57
Σχήμα 5-15 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.	58
Σχήμα 5-16 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.....	59

Σχήμα 5-17 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και το έκτο Φ/Β της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.	60
Σχήμα 5-18 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/Β της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.	61
Σχήμα 5-19 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/Β της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.	62
Σχήμα 5-20 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.	63
Σχήμα 5-21 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.	64
Σχήμα 5-22 Ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.	64
Σχήμα 5-23 Ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.	65
Σχήμα 6-1 Σχηματική απεικόνιση ενός Φ/Β πλασιών της συστοιχίας. – γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αφορούν την παραμετρική μελέτη του ύψους των Φ/Β από το έδαφος.	66
Σχήμα 6-2 Σύγκριση της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/Β, ΔC_p για τρία διαφορετικά ύψη ($h=0.5m=0.17H$, $h=1m=0.34H$ και $h=1.5m=0.51H$) των Φ/Β πάνω από το έδαφος.	68
Σχήμα 6-3 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/Β, ΔC_p για τρία διαφορετικά ύψη ($h=0.5m=0.17H$, $h=1m=0.34H$ και $h=1.5m=0.51H$) των Φ/Β πάνω από το έδαφος.	69
Σχήμα 6-4 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/Β της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/Β από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	70
Σχήμα 6-5 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/Β της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/Β από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	71
Σχήμα 6-6 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και το έκτο Φ/Β της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/Β από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	72

Σχήμα 6-7 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	73
Σχήμα 6-8 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	74
Σχήμα 6-9 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	75
Σχήμα 6-10 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	76
Σχήμα 6-11 Ισοϋψές γραφήματα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$	77
Σχήμα 7-1 Σχηματική απεικόνιση δύο Φ/B πλαισίων της συστοιχίας – γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αφορούν την παραμετρική μελέτη της απόστασης μεταξύ των Φ/B	78
Σχήμα 7-2 Σύγκριση του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B , ΔC_p για τρεις διαφορετικές αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$	80
Σχήμα 7-3 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/B , ΔC_p για τρεις διαφορετικές αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$	81
Σχήμα 7-4 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$	82
Σχήμα 7-5 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$	83
Σχήμα 7-6 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και το έκτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$	84
Σχήμα 7-7 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$	85
Σχήμα 7-8 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$	86

Σχήμα 7-9 Ισούψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$	87
Σχήμα 7-10 Ισούψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$	88
Σχήμα 7-11 Ισούψές γράφημα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$	89
Σχήμα 8-1 Ροή γύρω από στέγες – Βαθμός παρεμπόδισης, φ , για διαφορετικές διατάξεις υποστέγων.....	90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Αριθμός κελιών ανά διάσταση του υπολογιστικού χωρίου για το αρχικό δομημένο πλέγμα που δημιουργήθηκε με το εργαλείο blockMesh.....	19
Πίνακας 2 Αριθμός κελιών ανά διάσταση του υπολογιστικού χωρίου για το αρχικό δομημένο πλέγμα που δημιουργήθηκε με το εργαλείο blockMesh.....	25
Πίνακας 3 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τους δύο αριθμούς Re και μοντέλο τύρβης k- ϵ RNG.....	41
Πίνακας 4 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τους δύο αριθμούς Re και μοντέλο τύρβης k- ω SST.....	41
Πίνακας 5 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τα δύο μοντέλα τύρβης, – Περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.	46
Πίνακας 6 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τα δύο μοντέλα τύρβης, – Περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.....	57
Πίνακας 7 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για διαφορετικά ύψη, h, των πλαισίων από το έδαφος.....	68
Πίνακας 8 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για διαφορετικές αποστάσεις, L, μεταξύ των πλαισίων.....	80
Πίνακας 9 Τιμές του συντελεστή δύναμης όπως υπολογίζονται από τον Ευροκώδικα για διαφορετικές τιμές του φ	91

Λίστα Συντομογραφιών

CFD	Computational Fluid Dynamics
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SST	Shear Stress Transport
RNG	Re-Normalisation Group

1 Εισαγωγή

Η ροή γύρω από μη αεροδυναμικά σώματα και συγκεκριμένα γύρω από κεκλιμένες πλάκες παρουσιάζει ενδιαφέρον για πολλούς κλάδους της μηχανικής. Τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από τέτοια σώματα έχουν μελετηθεί ενδελεχώς τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά και παλαιότερα (Fage et al (1927)) με κύριο ενδιαφέρον τον υπολογισμό μεγεθών όπως η οπισθέλκουσα, η άντωση και η απόσπασση δινών (Yang et al (2012), Teimourian et al (2018), Narasimhamurthy and Andersson (2009)) καθώς γίνεται και προσπάθεια για μείωση της περιοχής αποκόλλησης της ροής (Akbarzadeh and borazjani (2019)). Άμεση εφαρμογή της μελέτης των χαρακτηριστικών ροής γύρω από τέτοια σώματα αποτελεί η μελέτη της ροής γύρω από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή και συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αναδεικνύονται σε έναν από τους σημαντικούς συντελεστές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά έχει παρουσιάσει μεγάλη αύξηση με τις ετήσιες προσθήκες δυναμικότητας το 2022 να αυξάνονται 37% σε σχέση με το 2021, έτσι ώστε η συνολική εγκατεστημένη ισχύς να ανέρχεται σε περίπου 1185 GW. Τα φωτοβολταϊκά κατατάσσονται στην τρίτη θέση μετά την υδροηλεκτρική ενέργεια και την αιολική ενέργεια για την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η συνολική ετήσια παραγωγή από ηλιακά φωτοβολταϊκά αναμένεται να αυξηθεί κατά 25% ετησίως κατά μέσο όρο έως το 2030. Για να επιτευχθούν τα παγκόσμια σενάρια για καθαρές μηδενικές εκπομπές, 551 GW δυναμικότητας ετησίως θα πρέπει να προστεθούν μέχρι το 2030, από περίπου 1185 το 2022 σε 5400 GW συνολικής εγκατεστημένης ισχύος το 2030 (REN21 (2023)).

Συνήθως, τα ηλιακά πάρκα είναι τοποθετημένα, κατά μεγάλο ποσοστό, σε ένα μεγάλο ανοιχτό πεδίο και χρησιμοποιούν συστοιχίες επίγειων φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο εμπορικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτιστοποίηση της στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ώστε να αντέχουν στις αεροδυναμικές δυνάμεις, είναι μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζονται κατά την κατασκευή και εγκατάσταση των ηλιακών πλαισίων.

Έχουν πραγματοποιηθεί υπολογιστικές (Breuer and Jovičić (2001), Breuer et al (2003), Shademan et al (2014), Jubayer and Hangan (2014), Suárez et al (2022), Jubayer and Hangan (2016), Irtaza and Agarwal (2018)), και πειραματικές μελέτες (Bechtel National (1980), Miller

and Zimmerman (1981), Stathopoulos et al (2014), Kopp et al (2012), Warsido et al (2014)) καθώς και συνδυασμός τους (Aly and Bitsuamlak (2013), Castellani et al (2021), Yemenici and Aksoy (2021), Pieris et al (2022)) για τη διερεύνηση των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα Φ/Β ή συστοιχία Φ/Β από τον άνεμο, τα οποία είναι τοποθετημένα είτε στο έδαφος, είτε στην οροφή ενός κτιρίου.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιούνται προσομοιώσεις της ροής ανέμου γύρω από συστοιχία δέκα φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία είναι τοποθετημένα σε κοντινή απόσταση με το έδαφος και έχουν κλίση 25° σε σχέση με αυτό. Γίνεται 2D, μόνιμης κατάστασης (“steady state”) μοντελοποίηση της ροής με χρήση των εξισώσεων RANS και συγκεκριμένα με τα μοντέλα τύρβης k-ε RNG και k-ω SST.

Στο κεφάλαιο 4 επιχειρείται η επιύρωση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, μέσω μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος (4.1) για την περίπτωση μελέτης με ένα Φ/Β και μέσω της επιύρωσης των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (4.2) για τη ροή γύρω από συστοιχία Φ/Β, για νότια (4.2.1) και βόρεια (4.2.2) διεύθυνση ανέμου και για τα δύο μοντέλα τύρβης με πειραματικά δεδομένα από αεροσήραγγα μέσω της πειραματικής μελέτης των Miller and Zimmerman (1981). Επίσης, γίνεται διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού Re στον υπολογισμό των συντελεστών πίεσης και δύναμης πάνω στα Φ/Β. Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η μελέτη της ροής γύρω από τη συστοιχία Φ/Β με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας και γίνεται συγκριτική μελέτη των δύο μοντέλων τύρβης για ροή ανέμου με νότια (5.1) και βόρεια (5.2) διεύθυνση. Στα κεφάλαια 6 και 7 πραγματοποιούνται παραμετρικές μελέτες της απόστασης των Φ/Β από το έδαφος και της απόστασης μεταξύ τους, αντίστοιχα. Για τη παραμετρική μελέτη της απόστασης από το έδαφος επιλέχθηκαν τρεις λόγοι αποστάσεων, $h/H=0.17$, $h/H=0.34$ και $h/H=0.51$. Για τη παραμετρική μελέτη της απόστασης των Φ/Β μεταξύ τους επιλέχθηκαν, επίσης, τρεις λόγοι αποστάσεων, $L/H=2.4$, $L/H=3.4$ και $L/H=4.4$. Όπως αναπτύσσεται και στα παρακάτω κεφάλαια, η αλλαγή της απόστασης των Φ/Β από το έδαφος και της απόστασης μεταξύ τους έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά, αλλά και στη διαμόρφωση του ροϊκού πεδίου γύρω τους. Τέλος, στο κεφάλαιο 8 γίνεται σύγκριση του συντελεστή δύναμης που υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις με αυτό που υπολογίζει ο Ευρωπαϊκός (EN 1991-1-4:200).

1.1 Σκοπός και Στόχοι

Σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο υπολογισμός των αεροδυναμικών φορτίων που επιδρούν στα Φ/Β για διαφορετικές διατάξεις της συστοιχίας. Στόχος είναι η καλύτερη κατανόηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων όπως η απόσταση των Φ/Β μεταξύ τους και η απόστασή τους από το έδαφος στα αεροδυναμικά φορτία που επιδρούν σε αυτά.

Επίσης, στόχο αποτελεί η σύγκριση των δύο μοντέλων τύρβης k-ε RNG και k-ω SST για την περίπτωση συστοιχίας Φ/Β, ως συνέχεια δημοσιεύσεων (Shademan et al (2014)) που επιχειρήσαν τη σύγκριση άλλων μοντέλων της «οικογένειας» k-ε, όπως το Realizable k-ε με το μοντέλο k-ω SST για περίπτωση μελέτης με συστοιχία Φ/Β. Το μοντέλο k-ε RNG έχει χρησιμοποιηθεί, μέχρι στιγμής για την προσομοίωση της ροής ανέμου γύρω από ένα Φ/Β (Irtaza and Agarwal (2018)), αλλά όχι για συστοιχία.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι πειραματικές μελέτες των Bechtel National (1980) και Miller and Zimmerman (1981) διεξήχθησαν ως εμπορικά βιομηχανικά έργα με στόχο τη μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών. Η Bechtel National (1980) ανέφερε τα φορτία του ανέμου σε φωτοβολταϊκή συστοιχία εδραζόμενη στο έδαφος τα οποία μετρήθηκαν με χρήση μηχανοσκόπευτων εντός αεροδυναμικής σήραγγας οριακού στρώματος. Όπως φάνηκε, οι αεροδυναμικοί συντελεστές ήταν ανεξάρτητοι των κλιμάκων των μοντέλων Φ/Β που χρησιμοποιήθηκαν (1:24 και 1:12). Επιπρόσθετα των κλιμάκων, το ύψος των Φ/Β από το έδαφος (ύψος κάτω ακμής του Φ/Β 0,61 και 1,22m), το πορώδες (2,5%, 5% και 10%) και ο λόγος διαστάσεων (μήκος/εύρος ίσο με 2,3 και 4) δεν παρουσίασαν σημαντική επίδραση στους αεροδυναμικούς συντελεστές. Σε αντίθεση με τη Bechtel National (1980), οι Miller and Zimmerman (1981) χρησιμοποίησαν απολήπτες πίεσης (“pressure taps”) για τη μέτρηση της πίεσης πάνω στο Φ/Β και μπόρεσαν να εξάγουν την κατανομή πίεσης στην επιφάνεια των Φ/Β. Για ταχύτητα ανέμου 15,24 m/sec, μεταξύ των κλιμάκων 1:24 και 1:12 οι αδιάστατοι συντελεστές πίεσης και δύναμης ήταν ανεξάρτητοι του αριθμού Reynolds.

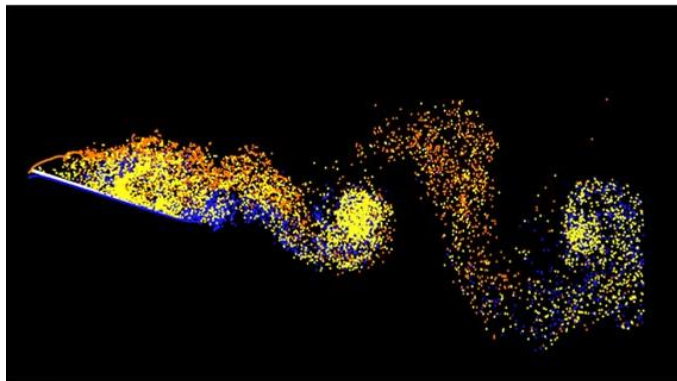
Οι Aly and Bitsuamlak (2013) παρατήρησαν ότι οι περισσότερες αεροσήραγγες οριακού στρώματος (BLWT) κατασκευάστηκαν για τη δοκιμή μοντέλων μεγάλων κατασκευών πολιτικού μηχανικού γεωμετρικής κλίμακας από 1:500 έως 1:100. Ωστόσο, η παραγωγή αεροδυναμικών μοντέλων των ηλιακών συλλεκτών σε τέτοιες κλίμακες καθιστά τις διαστάσεις των συλλεκτών πολύ μικρές, με αποτέλεσμα να προκύπτουν τουλάχιστον δύο τεχνικά προβλήματα. Πρώτον, η ανάλυση των δεδομένων πίεσης σε τόσο μικρά μοντέλα γίνεται χαμηλή. Δεύτερον, το μοντέλο δοκιμής μπορεί να τοποθετηθεί στο κατώτερο τμήμα του οριακού στρώματος που δεν είναι πραγματικά αντιπροσωπευτικό ενός πραγματικού σεναρίου, λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας στην ταχύτητα του ανέμου. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων, απαιτείται η ανάπτυξη ενός τυποποιημένου πρωτοκόλλου δοκιμών. Το εν λόγω πρωτόκολλο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη διαφορετικές χρονικές και γεωμετρικές κλίμακες για το σχεδιασμό κατάλληλων πειραμάτων σε αεροσήραγγα που μπορούν να επιτρέψουν την ακριβή εκτίμηση των φορτίων ανέμου στους ηλιακούς συλλέκτες. Στην εργασία τους διερευνήθηκε συστηματικά η ευαισθησία των φορτίων ανέμου στη δοκιμή ηλιακών συλλεκτών τοποθετημένων στο έδαφος, τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά, σε διαφορετικές γεωμετρικές κλίμακες. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν ότι, ενώ οι μέσες τιμές των φορτίων δεν επηρεάζονται σημαντικά από το

μέγεθος του μοντέλου, τα φορτία αιχμής είναι ευαίσθητα τόσο στη γεωμετρική κλίμακα όσο και στο φασματικό περιεχόμενο της ροής που μετράται. Ωστόσο, όταν ο στόχος είναι η πρόβλεψη φορτίων αιχμής 3-s (τριών δευτερολέπτων), τα μεγάλα μοντέλα μπορούν να δοκιμαστούν σε ροή που έχει μειωμένη τύρβη υψηλής συχνότητας.

Κατά την πειραματική μελέτη των Warsido et al (2014) πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών παραμέτρων απόστασης στη φόρτιση από τον άνεμο ηλιακών συστοιχιών οι οποίες είναι τοποθετημένες στο έδαφος αλλά και στην οροφή κτιρίου. Στη περίπτωση της συστοιχίας που είναι τοποθετημένη στο έδαφος διερευνήθηκε η επίδραση της πλευρικής και διαμήκουσ απόστασης μεταξύ των πλαίσιων. Στην περίπτωση της συστοιχίας που είναι τοποθετημένη στην οροφή κτιρίου διερευνήθηκε η επίδραση της περιμετρικής απόστασης της συστοιχίας από την άκρη του κτιρίου. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, το μέγεθος των συντελεστών δύναμης και ροπής στην επίγεια συστοιχία μειώθηκε σε όλες τις σειρές πλαισίων ως αποτέλεσμα της προστατευτικής επίδρασης (“sheltering effect”) από τα γειτονικά ανάντη πλαίσια. Η μεγαλύτερη μείωση των συντελεστών φορτίου ανέμου παρατηρήθηκε στη δεύτερη σειρά πλαισίων, αλλά το ποσό της μείωσης μειώθηκε γρήγορα στη συνέχεια και έγινε ελάχιστο μετά την τέταρτη σειρά. Παρατηρήθηκε, επίσης ότι τα πλαίσια που βρίσκονται στην εξωτερική στήλη της συστοιχίας μπορούσαν να υποστούν σχετικά υψηλότερα φορτία ανέμου σε σύγκριση με τα πλαίσια που βρίσκονται στις εσωτερικές στήλες της συστοιχίας. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της πλευρικής απόστασης μεταξύ των στηλών της συστοιχίας είχε ελάχιστη επίδραση στους συντελεστές δύναμης και ροπής. Ωστόσο, οι συντελεστές φορτίου ανέμου αυξήθηκαν όσο αυξανόταν η διαμήκης απόσταση μεταξύ των σειρών πλαισίων. Οι συντελεστές φορτίου ανέμου στη συστοιχία που τοποθετείται στην οροφή κτιρίου μειώθηκαν με την αύξηση του περιμετρικού κενού από την άκρη του κτιρίου.

Οι Breuer and Jovićić (2001) μελέτησαν με τη μέθοδο μεγάλων δινών (LES - Large Eddy Simulation) την αποκολλημένη ροή που διέρχεται από κεκλιμένη πλάκα, η οποία αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για τη προσομοίωση ροών με μεγάλης κλίμακας τυρβώδεις δομές και περιοχές ανακυκλοφορίας. Η ροή στο απόρρευμα της πλάκας είναι τριδιάστατη. Υποστήριξαν ότι, εάν αυτός ο βαθμός ελευθερίας κατασταλεί στην προσομοίωση, είτε με τον περιορισμό σε διδιάστατη προσομοίωση, ή με ένα πολύ στενό υπολογιστικό πεδίο κατά τη διεύθυνση του πλάτους του Φ/B , εμφανίζονται εντελώς διαφορετικές δομές ροής. Μετά από διαδικασία αξιολόγησης που πραγματοποίησαν για να στηρίξουν τον παραπάνω ισχυρισμό, η τελική

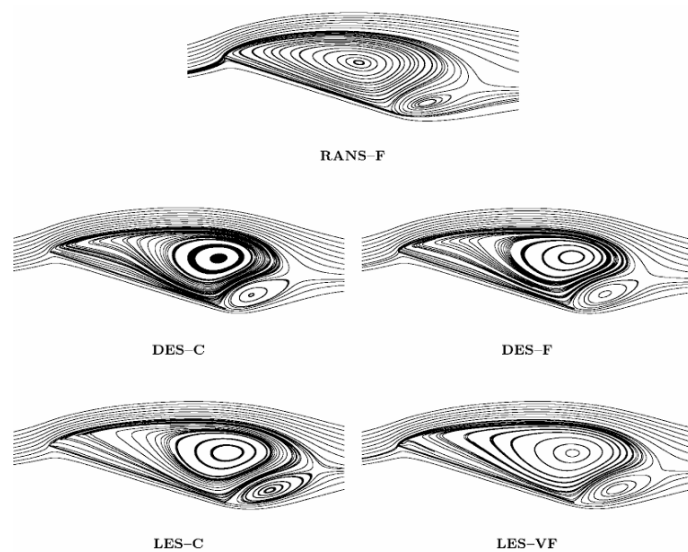
διαμόρφωση με αρκετά μεγάλο υπολογιστικό πεδίο και κατάλληλη πύκνωση στη διεύθυνση κατά το πλάτος του Φ/B μελετήθηκε λεπτομερώς. Τα αποτελέσματα του LES αυτής της τελικής διαμόρφωσης δείχνουν ότι ολόκληρο το πεδίο ροής κυριαρχείται έντονα από την ανάπτυξη και τη συμπεριφορά αποκόλλησης της δίνης της ακμής εκφυγής. Ο κύκλος ζωής του στροβίλου της της ακμής εκφυγής καθορίζει επίσης τη δομή και το μέγεθος της περιοχής ανακυκλοφορίας με αντι-ωρολογιακή περιστροφή που οδηγεί σε έναν ασύμμετρο δρόμο δίνης (“vortex street”) πίσω από την κεκλιμένη πλάκα. Το φαινόμενο αυτό, συμπεριλαμβανομένης της χαρακτηριστικής συχνότητας που ορίζεται από τον αριθμό Strouhal, βρίσκεται σε στενή συμφωνία με τις πειραματικές έρευνες ($St \approx 0.66$). Σε μια σύντομη σύγκριση της περίπτωσης της επίπεδης πλάκας με τη ροή γύρω από την αεροτομή NACA-4415 υπό τις ίδιες συνθήκες ροής (Re_c, α), αποδείχθηκε ότι οι δύο αυτές διαμορφώσεις είναι σε μεγάλο βαθμό συγκρίσιμες μεταξύ τους όσον αφορά τη στιγμιαία και τη μέση χρονική δομή της ροής.



Σχήμα 2-1 Οπτικοποίηση του ασύμμετρου δρόμου δίνης πίσω από την κεκλιμένη πλάκα. $Re_c=20000, \alpha=18^\circ$ (Breuer and Jovičić (2001))

Οι Breuer et al (2003) σε συνέχεια της προηγούμενης μελέτης τους (Breuer and Jovičić (2001)) διερεύνησαν την αποκολλημένη ροή που διέρχεται από μια κεκλιμένη πλάκα ($Re_c=20000$ και $\alpha=18^\circ$) με τις μεθόδους RANS, DES και LES προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων και κυρίως να αποκαλυφθούν οι διαφορές μεταξύ DES και LES. Προκειμένου να αποκλειστούν οι επιρροές από διαφορετικά αριθμητικά συστήματα και διαφορετικές αναλύσεις, όλοι οι υπολογισμοί βασίστηκαν στον ίδιο κώδικα και στο ίδιο πλέγμα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν προβλέψεις με αυξημένη πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος και για τις τρεις τεχνικές, γεγονός που επιτρέπει τη διερεύνηση της επιρροής αυτής της πτυχής. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι υπολογισμοί RANS δεν ήταν σε θέση να αποτυπώσουν τη συμπεριφορά της χρονικά μεταβαλλόμενης απόσπασης δινών αυτού του μη αεροδυναμικού σώματος. Τόσο οι διδιάστατες όσο και οι τριδιάστατες προβλέψεις RANS οδήγησαν στα ίδια

αποτελέσματα μόνιμης κατάστασης, όπου στην τελευταία περίπτωση δεν παρατηρήθηκαν τριδιάστατες δομές. Αντίθετα, η ασύμμετρη απόσπαση δινών αναπαράχθηκε επαρκώς από το DES και το LES με βάση διαφορετικές πυκνώσεις πλέγματος. Όσον αφορά τις δομές της ροής και την κατανομή της πίεσης, οι προβλέψεις RANS οδήγησαν κατά συνέπεια στις μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τη λύση αναφοράς LES σε πολύ πυκνό πλέγμα (LES-VF). Ωστόσο, και η σύγκριση των προβλέψεων DES και LES που πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο πλέγμα (δηλ. DES-C έναντι LES-C) απέδωσε σημαντικές αποκλίσεις, ιδίως στην αναπαράσταση του ελεύθερου στρώματος διάτμησης και των στατιστικών ανώτερης τάξης. Ο υπολογισμός DES (ακόμη και στο πυκνό πλέγμα) διαπιστώθηκε ότι δεν είναι ικανός να αναπαράγει επαρκώς την αστάθεια “Kelvin-Helmholtz”. Όσον αφορά όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά της ροής, οι αποκλίσεις και των δύο υπολογισμών DES ήταν πάντα πολύ μεγαλύτερες σε σύγκριση με τον LES-VF από το αντίστοιχο αποτέλεσμα LES στο αραιό πλέγμα (LES-C). Επομένως, η παρατήρηση αυτή δεν ήταν αποτέλεσμα της πύκνωσης του πλέγματος αλλά της μοντελοποίησης των μη επιλυμένων υπο-πλεγματικών κλιμάκων (“sub-grid scales”). Αυτό βασίζεται στο τροποποιημένο μοντέλο Spalart-Allmaras για το DES και στο μοντέλο Smagorinsky για το LES. Επειδή η περίπτωση δοκιμής που επιλέχθηκε είναι ευνοϊκή για την ιδέα του DES και βέλτιστη για τη διερεύνηση ειδικά της λειτουργίας LES των προβλέψεων του DES σε σύγκριση με την καθαρή προσομοίωση LES, αναλύθηκε λεπτομερώς ο προσδιορισμός της κατανομής του τυρβώδους ιξώδους των στροβίλων. Αποδείχθηκε ότι δύο κύριοι λόγοι ευθύνονται για τις παρατηρούμενες αποκλίσεις μεταξύ LES και DES. Αφενός, διαπιστώθηκε ότι οι ειδικές συναρτήσεις που περιλαμβάνονται στο μοντέλο Spalart-Allmaras για να ληφθεί υπόψη η σωστή συμπεριφορά του μοντέλου κοντά στο τοίχωμα δεν λειτουργούν σωστά στη λειτουργία LES και πρέπει να εξαιρεθούν από τη διατύπωση του αντίστοιχου μοντέλου SGS. Από την άλλη πλευρά, ο μεταβαλλόμενος ορισμός του πλάτους του φίλτρου προσδιορίστηκε ως υπεύθυνος για τις υπόλοιπες μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρούνται στα επίπεδα ιξώδους των στροβίλων μεταξύ των προβλέψεων DES και LES. Μια αναθεωρημένη έκδοση του μοντέλου για τον τρόπο λειτουργίας LES, λαμβάνοντας υπόψη και τα δύο ζητήματα, οδήγησε σαφώς σε σημαντικά βελτιωμένα αποτελέσματα (DES-C). Η έρευνα δείχνει ότι το μοντέλο Spalart-Allmaras μπορεί να εφαρμοστεί ως μοντέλο SGS στο DES, υπό την προϋπόθεση ότι προσαρμόζεται κατάλληλα για το σκοπό αυτό.



Σχήμα 2-2 Ροϊκές Γραμμές του μέσου πεδίου ροής για πέντε διαφορετικές προσομοιώσεις. ($Re_c=20000$, $\alpha=18^\circ$) (Breuer et al (2003))

Οι Suárez et al (2022) μελέτησαν την αεροδυναμική που αναπτύσσεται πίσω από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο για ένα ευρύ φάσμα γωνιών κλίσης έως 60 μοίρες, σε σχετική απόσταση από το έδαφος $L/H = 1,5$, με H την απόσταση του κέντρου βάρους του Φ/B από το έδαφος και L το μήκος χορδής του πλαισίου. Τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις μεγάλων στροβίλων (LES) δείχνουν ότι η εγγύτητα του πλαισίου στην επιφάνεια του εδάφους επηρέασε την απόσπαση στροβίλων και τις αεροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό σε σύγκριση με τις κλασικές μελέτες επίπεδης πλάκας. Παρατήρησαν τρία καθεστώτα ροής στο ασταθές απόρρευμα: σε μικρές γωνίες κλίσης, η ροή είναι ως επί το πλείστον προσκολλημένη πάνω στην πλευρά αναρρόφησης (κατάντη πλευρά)- στο εύρος από 10 έως 30 μοίρες, πιο ενεργητικές και συνεκτικές στροβιλώδεις δομές άρχισαν να σχηματίζουν μια φουσαλίδα ανακυκλοφορίας- και, σε μεγαλύτερες γωνίες κλίσης, η ροή διαχωρίζεται πλήρως και το απόρρευμα του πλαισίου είναι παρόμοιο με αυτό ενός μη αεροδυναμικού σώματος (“bluff body”). Αυτά τα μοτίβα απορρέματος διέφεραν ελαφρώς ανάλογα με τη γωνία κλίσης που ήταν θετική ή αρνητική λόγω της εγγύτητας με το έδαφος. Σε θετικές γωνίες κλίσης, η ακμή προσβολής έχει διεύθυνση προς τα πάνω και η πλευρά αναρρόφησης του πλαισίου επέτρεψε την ανεμπόδιστη ανάπτυξη και απόσπαση των στροβιλωδών δομών. Αντίθετα, σε αρνητικές γωνίες κλίσης, η πλευρά χαμηλής πίεσης ήταν στραμμένη προς την επιφάνεια του εδάφους επηρεάζοντας άμεσα τη δημιουργία και τη διάχυση των στροβίλων και η χαμηλή θέση της ακμής προσβολής δημιούργησε ένα φαινόμενο τύπου διαχύτη. Η ανάλυση των δυνάμεων του

σώματος αποκάλυψε ότι, σε θετικές γωνίες κλίσης, τόσο οι κατακόρυφες όσο και οι οριζόντιες δυνάμεις ήταν μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αρνητικές, εκτός από τον συντελεστή ροπής, στον οποίο οι μέγιστες τιμές ήταν παρόμοιες μεταξύ θετικών και αρνητικών γωνιών. Ο αριθμός Strouhal με βάση τη συχνότητα αιχμής, που λαμβάνεται από τη φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD-Power Spectral Density) του συντελεστή ροπής και της κατακόρυφης διακύμανσης της ταχύτητας σε ένα σημείο του πτερυγίου, έλαβε μεγαλύτερες τιμές για αρνητικές γωνίες λόγω του φαινομένου του διαχύτη που ενίσχυσε την αποβολή δίνης. Το εύρος των αριθμών Strouhal μεταβαλλόταν με τη γωνία κλίσης με ασύμμετρο σχήμα "M", φθάνοντας σε μέγιστα 0,30 και 0,38 στις 35 και -35 μοίρες, αντίστοιχα. Η μεταβολή του λόγου L/H, δηλαδή της σχετικής απόστασης της δομής από την επιφάνεια του εδάφους, μεταβάλλει τις τιμές του αριθμού Strouhal για αρνητικές γωνίες κλίσης μεταξύ 10 και 30 μοιρών, ενώ αυτό παραμένει ως επί το πλείστον το ίδιο για θετικές γωνίες κλίσης.

Οι Jubayer and Hangan (2016) μελέτησαν μέσω προσομοίωσης τα αεροδυναμικά φορτία και το πεδίο ροής του ανέμου γύρω από μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πλακιδίων (Φ/B) τα οποία είναι τοποθετημένα στο έδαφος, βυθισμένα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ABL). Η προσομοίωση έγινε τη χρήση της μη μόνιμης προσέγγισης Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS – Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Η προσομοίωση ήταν τριδιάστατη (3D), πλήρους κλίμακας και έγινε χρήση του λογισμικού OpenFOAM (ESI Group) με το μοντέλο τύρβης k- ω Shear Stress Transport (SST). Εξετάστηκαν διάφορες αζιμουθιακές διευθύνσεις ανέμου (νότιος, 0° , νοτιοδυτικός, 45° , βορειοδυτικός, 135° και βόρειος, 180°), για αριθμό Reynolds 3×10^6 . Η γωνία των Φ/B σε σχέση με το έδαφος ήταν 25 μοίρες. Η αριθμητική προσέγγιση επικυρώθηκε με σύγκριση του πεδίου ταχύτητας που περιβάλλει έναν αυτόνομο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με πειράματα σε αεροσήραγγα. Τα αποτελέσματα για τη διαμόρφωση της συστοιχίας δείχνουν ότι όλες οι κατάντη σειρές βρίσκονται στο πλήρες απόρρευμα της μπροστινής σειράς για ευθείς ανέμους (0° και 180°), αλλά όχι για πλάγιους ανέμους (45° και 135°). Και για τις τέσσερις κατευθύνσεις ανέμου που μελέτησαν, η πρώτη προσήνεμη σειρά υφίσταται τα μέγιστα φορτία ανέμου από πλευράς οπισθέλκουσας και άντωσης. Όσον αφορά τη μέγιστη ροπή ανατροπής, οι διευθύνσεις ανέμου 45° και 135° είναι κρίσιμες με παρόμοιους συντελεστές ροπής ανατροπής για κάθε σειρά.

Οι Shademan et al (2014) εκτίμησαν μέσω προσομοίωσης CFD την κατανομή των αεροδυναμικών δυνάμεων σε ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πλακιδίων που αποτελούνται από

τέσσερα μεμονωμένα πλαίσια σε διάταξη 2×2 και σε τέσσερις σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων σε διάταξη συστοιχίας. Η μοντελοποίηση της ροής του ανέμου που περιλαμβάνει τριδιάστατες, μόνιμης κατάστασης (steady state) προσομοιώσεις RANS πραγματοποιήθηκε με τη χρήση διαφορετικών μοντέλων τύρβης (realizable k-ε & k-ω SST) και τοπολογιών πλέγματος. Με βάση τις μελέτες επικύρωσης που έκαναν οι οποίες έδειξαν ότι το μοντέλο k-ω SST είχε καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα από το μοντέλο realizable k-ε, οι τελικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του μοντέλου τύρβης k-ω SST και ενός υβριδικού πλέγματος. Έκαναν σύγκριση παραμέτρων της ροής, όπως ο συντελεστής μέσης πίεσης και οι δυνάμεις αντίστασης και ανύψωσης σε διάφορες διευθύνσεις ανέμου, με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Για τις περιπτώσεις με ένα Φ/B απέδειξαν ότι ολόκληρη η κατασκευή υφίσταται τη μέγιστη αεροδυναμική δύναμη στις διευθύνσεις ανέμου 0° και 180°. Στην κατεύθυνση του ανέμου 0°, τα κάτω πάνελ υφίστανται τη μέγιστη δύναμη, ενώ στις 180° η κατάσταση αντιστρέφεται. Τα αποτελέσματα τους επιβεβαιώνουν ότι η άντωση και η ροπή είναι οι κυρίαρχες συνιστώσες του αεροδυναμικού φορτίου σε ένα ευρύτερο φάσμα γωνιών πρόσπτωσης του ανέμου. Συμπέραναν ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η άντωση και η ροπή κατά το σχεδιασμό των διαμορφώσεων των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Υποστήριξαν ότι, λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη δομή, οι περιοχές κοντά στο κάτω άκρο κάθε μεμονωμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διαφορά πίεσης μεταξύ της εμπρόσθιας και της οπίσθιας επιφάνειας, καθιστώντας τις περιοχές αυτές πιο ευάλωτες στη φόρτιση από τον άνεμο. Αναφέρουν ότι η ανάλυση της επίδρασης της απόστασης των διακένων στη φόρτιση του ανέμου που ασκείται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια έδειξε ότι η εισαγωγή του διακένου μεταξύ των πάνελ αλλάζει σημαντικά τη δομή της ροής στο απόρρευμα. Επίσης, ανέφεραν ότι το μέγεθος του κυρίαρχου στρόβιλου στην περιοχή του απορρεύματος μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των διακένων, προκαλώντας μικρότερη διαφορά πίεσης μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης επιφάνειας. Παρατήρησαν ότι, κοντά στο διάκενο δημιουργούνται μικροί στρόβιλοι, το μέγεθος των οποίων αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση του διακένου. Η παρουσία αυτών των στρόβιλων προκάλεσε τοπική πτώση της πίεσης, αυξάνοντας έτσι το φορτίο στο πάνελ κοντά στο διάκενο. Η αύξηση της απόστασης από το έδαφος προκάλεσε μεγαλύτερη διαφορά πίεσης μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης επιφάνειας και είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο μέσο φορτίο ανέμου στην κατασκευή. Τέλος, πραγματοποίησαν προσομοιώσεις της ροής πάνω από τη συστοιχία πλαισίων για αναλογίες αποστάσεων L/H: 1, 2 και 3. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι ο μικρότερος λόγος αποστάσεων προκαλεί μικρότερη φόρτιση ανέμου στα πλαίσια

της συστοιχίας. Επιπλέον, στον μικρότερο λόγο, δηλαδή για $L/H=1$, οι δυνάμεις άντωσης και αντίστασης στα πλαίσια που βρίσκονται στη δεύτερη σειρά είχαν αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με τις μεγαλύτερες αποστάσεις. Παρατήρησαν ότι, η δεύτερη σειρά πλαισίων υφίσταται το μικρότερο ποσό άντωσης λόγω της επίδρασης προστασίας από την πρώτη σειρά. Η αύξηση του λόγου αποστάσεων αύξησε τη διαφορά πίεσης μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης πλευράς, προκαλώντας κατά συνέπεια μεγαλύτερη μέση φόρτιση ανέμου στα πλαίσια της συστοιχίας.

3 Μεθοδολογία

Για την προσομοίωση της ροής γύρω από τη Φ/Β συστοιχία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής OpenFOAM. Το OpenFOAM είναι ένα ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα το οποίο είναι γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++. Το λογισμικό περιλαμβάνει εργαλεία για τη γένεση πλέγματος, όπως το blockMesh και το snappyHexMesh τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία για τη γένεση του πλέγματος γύρω από τη συστοιχία, καθώς και επιλύτες για την επίλυση μεγάλου εύρους προβλημάτων. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

Για τη γένεση του πλέγματος χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία που διαθέτει το OpenFOAM. Αρχικά, δημιουργείται ένα δομημένο πλέγμα μέσω του εργαλείου blockMesh το οποίο αποτελείται από κεντροκυβελικά εξαεδρικά κελιά. Στη συνέχεια, μέσω του εργαλείου snappyHexMesh, εισάγεται στο υπολογιστικό χωρίο, το οποίο δημιουργήθηκε από το blockMesh, η προς μελέτη γεωμετρία. Η ένταξη της γεωμετρίας γίνεται μέσω ενός επιφανειακού πλέγματος τύπου STL το οποίο διαβάζει το snappyHexMesh.

Το πλέγμα που δημιουργείται από το εργαλείο snappyHexMesh αποτελείται από τριδιάστατα «αυθαίρετα» κελιά, δηλαδή από κελιά τα οποία μπορούν να αποτελούνται από ένα τυχαίο αριθμό εδρών, ενώ οι έδρες δεν έχουν κάποια προκαθορισμένη διεύθυνση. Τα πλέγματα αυτά είναι στην ουσία μη-δομημένα και παρέχουν μεγάλη ελευθερία στη γένεση τους. Επίσης, το εργαλείο αυτό παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας περιοχών μέσα στο χωρίο όπου το πλέγμα γίνεται σταδιακά πυκνότερο κοντά στην υπό μελέτη γεωμετρία, καθώς και δημιουργίας ζωνών πύκνωσης του πλέγματος γύρω από τη γεωμετρία. Τέλος, μπορούν να προστεθούν γύρω από τη γεωμετρία στρώματα λεπτών κελιών, ώστε να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η φυσική της ροής εντός του οριακού στρώματος.

Καθώς το πλέγμα που δημιουργείται από το εργαλείο snappyHexMesh είναι τριδιάστατο και στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιλέγεται να γίνει μοντελοποίηση 2D της ροής, χρησιμοποιείται η εντολή “extrudeMesh” με σκοπό τη μετατροπή του πλέγματος από 3D σε 2D.

3.1 Οι εξισώσεις Navier-Stokes

Για την επίλυση των εξισώσεων της ροής εφαρμόζεται η Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method). Οι παρακάτω εξισώσεις θα γραφούν για ασυμπιεστο ρευστό, καθώς το πρόβλημα που μελετάται αφορά ροή αέρα με χαμηλή ταχύτητα, οπότε η ροή μπορεί να θεωρηθεί ασυμπιεστή.

Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής γράφονται στη μορφή,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-1)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad (3-2)$$

όπου u_j , είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας, p η πίεση διαιρεμένη με τη πυκνότητα ρ , ν η κινηματική συνεκτικότητα και ν_t η τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα.

Η εξίσωση της ορμής μπορεί να γραφτεί σε ημιδιακριτοποιημένη μορφή, για την κυψέλη P ως,

$$a_p \bar{u}_p = H(\bar{u}) - \nabla p \quad (3-3)$$

όπου, $H(\bar{u}) = -\sum_n a_n \bar{u}_n$ το άθροισμα των συντελεστών των γειτονικών κελιών πολλαπλασιασμένα με τις αντίστοιχες ταχύτητες. Η εξίσωση συνέχειας διακριτοποιείται ως εξής,

$$\sum_f \bar{S} \bar{u}_f \quad (3-4)$$

όπου \bar{S} το εμβαδό της ελάχιστης έδρας του κελιού πολλαπλασιασμένο με το αντίστοιχο κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση προς τα έξω, και \bar{u}_f η ταχύτητα στην αντίστοιχη έδρα, η οποία υπολογίζεται με γραμμικοποίηση της σχέσης (3-3)

$$\bar{u}_f = \left(\frac{H(\bar{u})}{a_p} \right)_f - \frac{(\nabla p)_f}{(a_p)_f} \quad (3-5)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (3-5) στην εξίσωση (3-4) προκύπτει μία εξίσωση Poisson για την πίεση,

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{a_p} \nabla p \right) = \nabla \cdot \left(\frac{H(\bar{u})}{a_p} \right) = \sum_f \bar{S} \left(\frac{H(\bar{u})}{a_p} \right)_f \quad (3-6)$$

3.2 Μοντέλα Τύρβης

Η ροή αέρα γύρω από τη συστοιχία Φ/B χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης, μη μόνιμη, με έντονη αποκόλληση της ροής και περιοχές ανακυκλοφορίας πίσω από τα Φ/B . Χαρακτηρίζεται, δηλαδή, από τυχαίες διαταραχές του πεδίου ροής προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς η πλήρης επίλυση του τυρβώδους πεδίου ροής είναι απαγορευτική λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους χρησιμοποιούνται μέθοδοι μοντελοποίησης της τύρβης, όπως αυτές που θα αναφερθούν παρακάτω και που θα χρησιμοποιηθούν στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία (k-ε RNG & k- ω SST).

Η μοντελοποίηση της ροής έγινε με βάση τις Reynolds-Averaged Navier-Stokes εξισώσεις ροής (RANS), όπου τα μεγέθη της ροής χωρίζονται στο άθροισμα της μέσης χρονικής τιμής και της χρονικής διακύμανσης τους γύρω από την τιμή αυτή.

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) \quad (3-7)$$

Οι εξισώσεις Navier-Stokes γράφονται στην παρακάτω μορφή,

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (3-8)$$

Ο μη-γραμμικός όρος $-\overline{u_i' u_j'}$, γνωστός και ως τάσεις Reynolds, απαιτεί επιπλέον μοντελοποίηση για να γίνει δυνατή η επίλυση των εξισώσεων RANS. Για τη μοντελοποίηση του όρου αυτού εφαρμόζεται η υπόθεση Boussinesq, σύμφωνα με την οποία οι τάσεις Reynolds δίνονται από την παρακάτω σχέση.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3-9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση εισάγεται ο όρος της τυρβώδους κινηματικής συνεκτικότητας, ν_t , και ο όρος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k . Το δ_{ij} , είναι το δέλτα του Kronecker.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (3-10)$$

Τα διάφορα μοντέλα τύρβης που θα αναφερθούν αποτελούν μεθόδους υπολογισμού της ποσότητας ν_t .

3.2.1 Το Μοντέλο k-ε RNG

Το μοντέλο RNG αναπτύχθηκε με τη χρήση των μεθόδων Re-Normalisation Group (RNG) από τους Yakhot et al (1992) για την επανακανονικοποίηση των εξισώσεων Navier-Stokes, ώστε να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις των μικρότερων κλιμάκων κίνησης. Στο τυπικό μοντέλο k-ε το ιξώδες των στροβίλων προσδιορίζεται από μία μόνο κλίμακα μήκους της τύρβης, οπότε η υπολογιζόμενη τυρβώδης διάχυση είναι αυτή που συμβαίνει μόνο στη συγκεκριμένη κλίμακα, ενώ στην πραγματικότητα όλες οι κλίμακες κίνησης συμβάλλουν στην τυρβώδη διάχυση. Η προσέγγιση RNG, η οποία είναι μια μαθηματική τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή ενός μοντέλου τύρβης παρόμοιου με το k-ε, οδηγεί σε μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης για το ε η οποία επιχειρεί να λάβει υπόψη τις διαφορετικές κλίμακες κίνησης μέσω αλλαγών στον όρο παραγωγής.

Το μοντέλο αυτό επιλύει δύο ΜΔΕ για τον υπολογισμό δύο πεδίων, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k και της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ε. Οι εξισώσεις για το ασυμπίεστο είναι,

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{P_k}{\rho} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3-11)$$

$$u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \frac{P_k}{\rho} - C_{2\varepsilon}^* \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3-12)$$

Όπου,

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3-13)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3-14)$$

ενώ ισχύει και η σχέση $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$. Το τυρβώδες ιξώδες υπολογίζεται όπως και στο μοντέλο k-ε.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-15)$$

Οι τιμές όλων των σταθερών εκτός της σταθεράς β, προκύπτουν ρητά από τη μεθοδολογία RNG. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται συχνά είναι, $C_\mu=0,0845$, $\sigma_k=0,7194$, $\sigma_\varepsilon=0,7194$, $C_{1\varepsilon}=1,42$, $C_{2\varepsilon}=1,68$, $\eta_0=4,38$ και $\beta=0,012$.

3.2.2 Το Μοντέλο k-ω SST

Το μοντέλο k-ω SST (Shear Stress Transport), που προτάθηκε από τον Menter (1994) συνδυάζει το αρχικό μοντέλο k-ω του Wilcox με το μοντέλο k-ε. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το k-ω κοντά στα στερεά τοιχώματα, ενώ μακριά από το τοίχωμα χρησιμοποιείται το k-ε. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε καθώς το αρχικό μοντέλο k-ω ήταν ευαίσθητο στην περιοχή μακριά από το οριακό στρώμα, αλλά και με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμού της κλίσης πίεσης. Επίσης, παρουσιάζει καλή συμπεριφορά στα σημεία όπου παρατηρείται αποκόλληση της ροής.

Το μοντέλο αυτό επιλύει δύο ΜΔΕ για τον υπολογισμό δύο πεδίων, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k και της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ω. Οι εξισώσεις για το ασυμπίεστο είναι,

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3-16)$$

$$u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = a S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3-17)$$

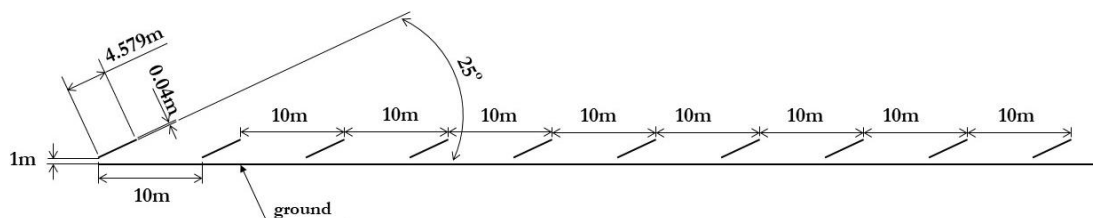
Μετά τον υπολογισμό των k και ω μπορεί να υπολογισθεί η τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα v_t σε κάθε σημείο

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (3-18)$$

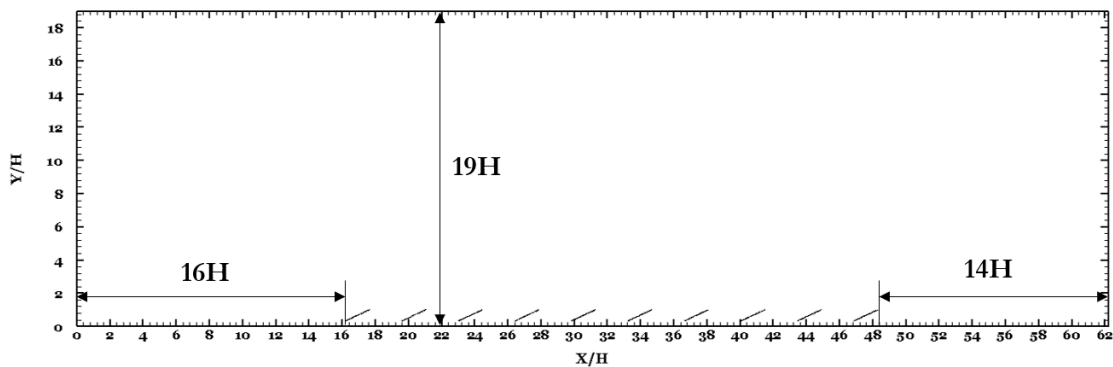
Οι σταθερές α , β , σ_k , σ_ω , που εμφανίζονται στις παραπάνω εξισώσεις λαμβάνουν διαφορετικές τιμές ανάλογα με τη συμπεριφορά που έχει υιοθετήσει το μοντέλο στην περιοχή εκείνη, δηλαδή αυτή του k-ε ή αυτή του k-ω. Για την περίπτωση που γίνεται χρήση του k-ε, οι σταθερές είναι $\sigma_{k2} = 1$, $\sigma_{\omega2} = 0,856$, $\beta_2 = 0,0828$. Κατά τη χρήση του k-ω, οι σταθερές είναι, $\sigma_{k1} = 0,85$, $\sigma_{\omega1} = 0,5$, $\beta_1 = 0,075$. Η σταθερά $\beta^* = 0,09$ έχει κοινή τιμή και για τις δύο συμπεριφορές του μοντέλου. Εντός του μοντέλου περιγράφονται και οι σχέσεις που δίνουν τιμές για τα υπόλοιπα μεγέθη F_1 , F_2 , P_k , ενώ ισχύει και η σχέση $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$. Στην εξίσωση (3-18), η σταθερά $\alpha_1 = 0,31$ αντιστοιχεί στην τιμή της σταθεράς α στο μοντέλο k-ω.

3.3 Υπολογιστικό Χωρίο και Πλέγμα

Αρχικά, η προς μελέτη γεωμετρία αφορά μία συστοιχία δέκα φωτοβολταϊκών συλλεκτών τα οποία εδράζονται στο έδαφος. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β της συστοιχίας αφορούν το ύψος της άνω ακμής από το έδαφος, το ύψος της κάτω ακμής από το έδαφος και το μήκος χορδής είναι $H=2,935\text{m}$, $h=1\text{m}$, $c=4,579\text{m}$, αντίστοιχα. Η απόσταση ανάμεσα στα Φ/Β είναι 10m , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-1. Για όλες τις περιπτώσεις μελέτης ροής ανέμου γύρω από τη συστοιχία Φ/Β που παρουσιάζονται στα παρακάτω κεφάλαια δημιουργήθηκε υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα με τα ίδια χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε υπολογιστικό χωρίο με διαστάσεις $16H$ ανάντη της συστοιχίας Φ/Β, $14H$ κατάντη και $18H$ πάνω από αυτή (Σχήμα 3-2).



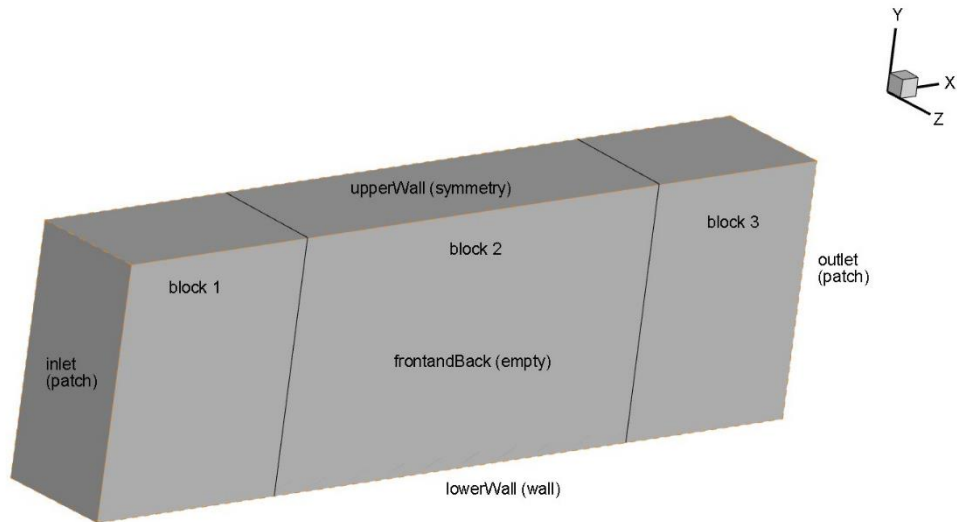
Σχήμα 3-1 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/Β.



Σχήμα 3-2 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπολογιστικού χωρίου.

Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται η διάσπαση του υπολογιστικού χωρίου σε υπό χωρία με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο της πύκνωσης του πλέγματος. Για κάθε μία συνοριακή επιφάνεια ορίζεται μία γεωμετρική συνθήκη. Για τις επιφάνειες «inlet» και «outlet» ορίστηκε ο γενικός τύπος «patch» ο οποίος δε παρέχει καμία γεωμετρική πληροφορία για το πλέγμα, ώστε να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες για κάθε μεταβλητή ξεχωριστά. Για την άνω επιφάνεια του χωρίου, «upperWall» ορίστηκε η συνθήκη «symmetry» η οποία είναι μία συνθήκη ολίσθησης. Για την

κάτω επιφάνεια, «lowerWall» ορίστηκε η συνθήκη «wall» η οποία υποδηλώνει την ύπαρξη στερεού τοιχώματος. Για τις δύο επιφάνειες «frontandBack» ορίστηκε η συνθήκη «empty», ώστε να δηλωθεί ότι γίνεται 2D ανάλυση.



Σχήμα 3-3 Σχηματική απεικόνιση του υπολογιστικού χωρίου και των γεωμετρικών συνθηκών στις συνοριακές του επιφάνειες.

Αρχικά, μέσω του εργαλείου blockMesh δημιουργήθηκε ένα αρχικό δομημένο πλέγμα το οποίο αποτελείται από εξαεδρικά κελιά με συνολικό αριθμό ίσο με 315.600 κελιά. Στον Πίνακας 1 παρουσιάζεται ο αριθμός των κελιών ανά διάσταση του υπολογιστικού χωρίου και ανά υπό χωρίο (block). Κατά τη δημιουργία του αρχικού δομημένου πλέγματος έγινε προοδευτική πύκνωση των κελιών ως προς τη συστοιχία Φ/Β (block 2) και ως προς την είσοδο του χωρίου (block 1).

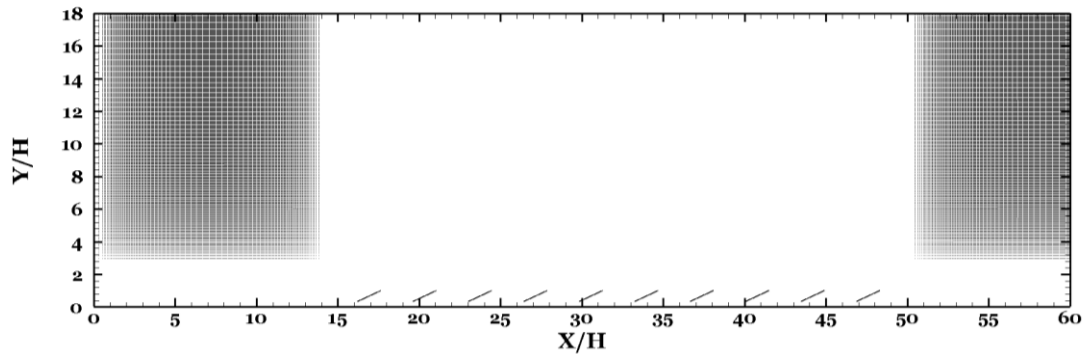
Πίνακας 1 Αριθμός κελιών ανά διάσταση του υπολογιστικού χωρίου για το αρχικό δομημένο πλέγμα που δημιουργήθηκε με το εργαλείο blockMesh.

Block	Αριθμός κελιών στον X άξονα	Αριθμός κελιών στον Y άξονα
1	182	200
2	1246	200
3	150	200

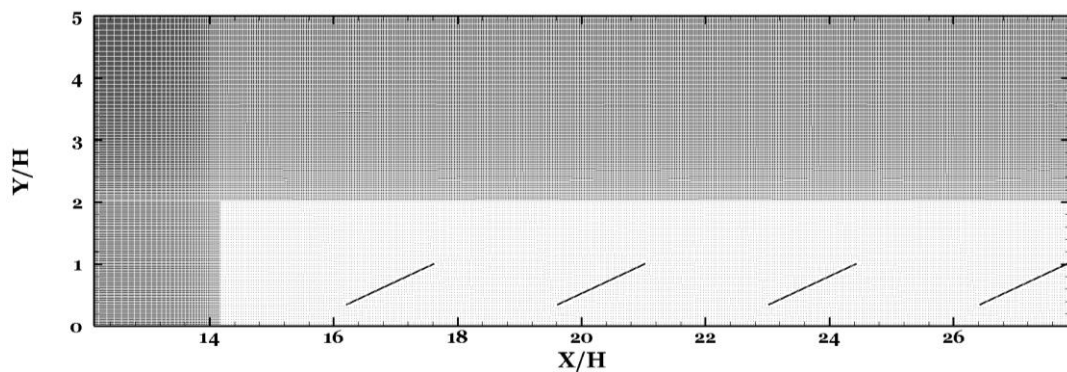
Στη συνέχεια εισήχθη η γεωμετρία της συστοιχίας Φ/B στο δομημένο υπολογιστικό πλέγμα μέσω του εργαλείου snappyHexMesh και ενός αρχείου επιφανειακού πλέγματος τύπου stl. Στο τελικό πλέγμα δημιουργήθηκε μία ζώνη πύκνωσης η οποία είχε διαστάσεις $2H$ ανάντη και κατάντη της συστοιχίας Φ/B και $1H$ πάνω από την άνω ακμή τους. Επίσης, γύρω από τη γεωμετρία των Φ/B δημιουργήθηκαν τρία επίπεδα πύκνωσης του πλέγματος. Τέλος, προστέθηκαν έξι στρώματα (“layers”) λεπτών στοιχείων γύρω από την επιφάνεια των Φ/B με λόγο διαστολής των κελιών από την επιφάνεια των Φ/B προς τα έξω, 1,2.

Το τελικό πλέγμα αποτελείται από 862.851 κελιά. Στη ζώνη πύκνωσης γύρω από το Φ/B , το μέγεθος κελιού είναι $\Delta x = \Delta y = 3,6\text{cm}$, δηλαδή περίπου ίσο με το πάχος των Φ/B και το ύψος του κελιού του πρώτου στρώματος κοντά στην επιφάνεια του Φ/B είναι $1,2\text{mm}$.

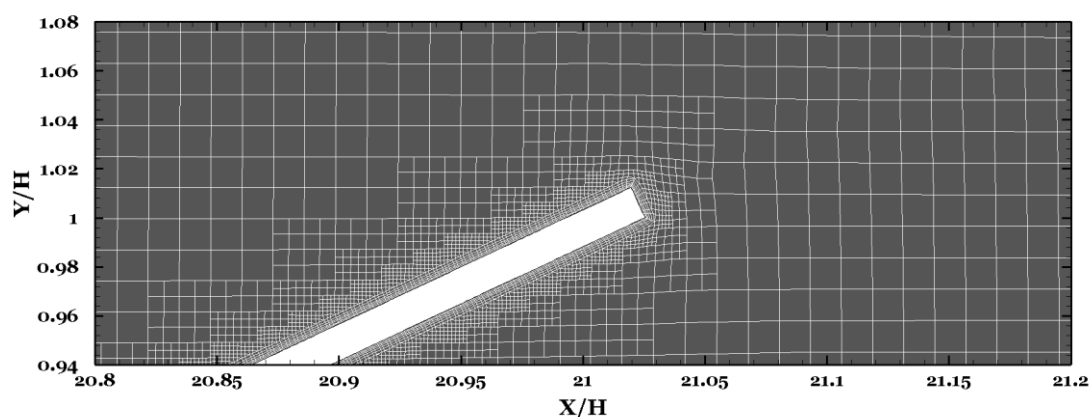
a)



b)



c)



Σχήμα 3-4 a) Υπολογιστικό χωρίο, b) ζώνη πύκνωσης γύρω από τη συστοιχία Φ/B , c) Επίπεδα πύκνωσης και στρώματα λεπτών κελιών γύρω από την επιφάνεια των Φ/B .

Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζεται το υπολογιστικό χωρίο και το τελικό πλέγμα που δημιουργήθηκε από το εργαλείο snappyHexMesh. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3-1 a) απεικονίζεται το αριθμητικό πλέγμα στο σύνολο του υπολογιστικού χωρίου και η σταδιακή πύκνωση προς το υπό χωρίο όπου βρίσκεται η συστοιχία και προς την είσοδο του υπολογιστικού χωρίου. Στο Σχήμα 3-4 b) απεικονίζεται η ζώνη πύκνωσης γύρω από τη συστοιχία Φ/B και στο Σχήμα 3-4 c) απεικονίζονται τα επίπεδα πύκνωσης και τα στρώματα λεπτών κελιών γύρω από τα Φ/B .

3.4 Συνοριακές Συνθήκες

Για την επίλυση των εξισώσεων της ροής γύρω από τη συστοιχία Φ/B συλλεγτών είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι συνοριακές συνθήκες στα σύνορα του υπολογιστικού χωρίου για όλες τις ποσότητες προς υπολογισμό. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες για την πίεση, την ταχύτητα αλλά και για τα μεγέθη των μοντέλων τύρβης, που χρησιμοποιούνται, τόσο στα σύνορα του υπολογιστικού χωρίου, όσο και στις επιφάνειες της υπό εξέταση γεωμετρίας και του εδάφους.

Για όλες τις περιπτώσεις μελέτης, οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες παραμένουν οι ίδιες. Για την πίεση στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου ορίζεται μηδενική συνθήκη Neumann, που σημαίνει ότι η τιμή της κάθετης παραγώγου της πίεσης είναι μηδέν (zeroGradient στην ορολογία του OpenFOAM), δηλαδή, συνθήκη Neumann $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$. Για την ταχύτητα στην είσοδο του χωρίου ορίζεται ομοιόμορφη συνθήκη Dirichlet, $u_x = 25 \text{ m/sec}$.

Όσον αφορά στις τιμές των μεγεθών των μοντέλων τύρβης στην είσοδο του χωρίου για την τιμή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k , ορίζεται από τη σχέση

$$k = \frac{3}{2}(ul)^2 \quad (3-19)$$

όπου $I=10\%$, η ένταση της τύρβης και u η μέση ταχύτητα της ροής.

Για την τιμή της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ε , στην είσοδο του χωρίου ορίζεται η σχέση,

$$\varepsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{l} \quad (3-20)$$

όπου, $C_\mu=0.085$, η σταθερά του μοντέλου και $l=2.97m$, η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους, στην προκειμένη περίπτωση το ύψος της άνω ακμής της συστοιχίας από το έδαφος.

Για την τιμή της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ω , στην είσοδο του χωρίου ορίζεται η σχέση,

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} l} \quad (3-21)$$

όπου, $C_\mu=0.09$, η σταθερά του μοντέλου.

Όσον αφορά τα στερεά τοιχώματα, δηλαδή τη συστοιχία και το έδαφος, ορίζεται μηδενική συνθήκη Neumann για την πίεση. Για την ταχύτητα ορίζεται συνθήκη μη ολίσθησης ή μηδενική συνθήκη Dirichlet, δηλαδή ισχύει $\vec{u} = 0$. Για τα μεγέθη της τύρβης χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες συναρτήσεις τοίχου που παρέχονται από το OpenFOAM ανάλογα με το μοντέλο τύρβης που εφαρμόζεται. Για το k επιβάλλεται μηδενική συνθήκη Neumann για την περιοχή κοντά στα τοιχώματα. Το ω δίνεται από τη σχέση,

$$\omega = \sqrt{\omega_{vis}^2 + \omega_{log}^2} \quad (3-22)$$

όπου, ω_{vis} , η τιμή του ω εντός του στρωτού υποστρώματος και ω_{log} , η τιμή του ω στη λογαριθμική περιοχή του οριακού στρώματος. Και στα δύο μοντέλα τύρβης k - ε RNG & k - ω SST η τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα, ν_t , υπολογίζεται από την ενσωματωμένη συνάρτηση του OpenFOAM.

Στο άνω σύνορο του υπολογιστικού χωρίου ορίζεται συνοριακή συνθήκη ολίσθησης. Αυτό σημαίνει ότι επιβάλλεται μηδενική συνθήκη Dirichlet στις συνιστώσες της ταχύτητας που είναι

κάθετες στα επίπεδα συμμετρίας, ενώ για τις συνιστώσες που εφάπτονται στα επίπεδα, καθώς και στα υπόλοιπα μεγέθη της ροής και των μοντέλων τύρβης επιβάλλεται μηδενική συνθήκη Neumann. Στα πλάγια σύνορα του υπολογιστικού χωρίου ορίζεται «άδεια» συνοριακή συνθήκη (empty) καθώς η προσομοίωση είναι 2Δ.

3.5 Διακριτοποίηση και Επίλυση των Εξισώσεων

Για την επίλυση ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής πρέπει να γραφούν οι εξισώσεις στη διακριτή τους μορφή. Γενικά, οι μέθοδοι διακριτοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την επίλυση και σύγκλιση του προβλήματος και πρέπει να συνάδουν με τη φυσική του. Επίσης, αποτελούν πηγή αριθμητικού σφάλματος.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε ανάντη σχήμα διακριτοποίησης πρώτης τάξης για τους όρους συναγωγής της εξίσωσης ορμής, αλλά και των εξισώσεων των μοντέλων τύρβης. Για τους όρους διάχυσης χρησιμοποιήθηκε κεντρικό σχήμα.

Για την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων το λογισμικό OpenFOAM παρέχει πληθώρα επιλυτών για χρήση ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Για προβλήματα μόνιμης ροής χρησιμοποιείται, ο επιλύτης SimpleFoam ο οποίος αποτελεί την υλοποίηση του αλγόριθμου SIMPLE από το OpenFOAM. Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου επιλύεται, αρχικά, η διακριτοποιημένη εξίσωση της ορμής και υπολογίζεται ένα ενδιάμεσο πεδίο ταχυτήτων, χρησιμοποιώντας μια αρχική εκτίμηση για την κλίση της πίεσης ή τιμές από προηγούμενη επανάληψη. Στη συνέχεια σχηματίζεται και επιλύεται η εξίσωση Poisson για την πίεση **(3-6)**. Γίνεται διόρθωση των ταχυτήτων με βάση τη νέα κατανομή πίεσης και ανανεώνονται οι συνοριακές τιμές των ποσοτήτων της ροής. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου να συγκλίνει ο αλγόριθμος. Τονίζεται ότι στο OpenFOAM, κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου SIMPLE γίνεται επίλυση ως προς την πίεση και όχι ως προς τη διόρθωση της πίεσης (Greenshields and Weller, 2022).

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται χρήση του αλγόριθμου SIMPLEC ο οποίος είναι παραλλαγή του αλγόριθμου SIMPLE και η διαφορά τους αφορά τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η διόρθωση της ταχύτητας. Στον αλγόριθμο SIMPLEC, κατά τον υπολογισμό της διόρθωσης της ταχύτητας, λαμβάνονται υπόψη και οι γειτονικοί όροι σε αντίθεση με τον αλγόριθμο SIMPLE, όπου λαμβάνονται υπόψη μόνο οι συντελεστές της κύριας διαγωνίου του

μητρών των συντελεστών της εξίσωσης ορμής. Πλεονέκτημα του αλγόριθμου SIMPLEC είναι ότι δεν είναι αναγκαία η υπο-χαλάρωση των εξισώσεων (Van Doormaal and Raithby, 1984).

Η επίλυση της εξίσωσης Poisson για την πίεση γίνεται με χρήση του Γενικευμένου Πολυπλεγματοειδούς Αλγορίθμου (Generalized Geometric-Algebraic Multigrid – GAMG) του OpenFOAM. Ο αλγόριθμος GAMG, αρχικά παράγει μία λύση η οποία βασίζεται σε ένα αραιό πλέγμα, για το οποίο ορίζεται αρχικά ο αριθμός των κελιών από το χρήστη. Η λύση του αραιού πλέγματος χρησιμοποιείται για να παράγει ο αλγόριθμος μία λύση στο πυκνότερο πλέγμα. Σε κάθε επίπεδο πύκνωσης το σύστημα επιλύεται για έναν αριθμό επαναλήψεων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνει το σύστημα στο τελικό πλέγμα. Για την επίλυση των εξισώσεων της ορμής, αλλά και των εξισώσεων των μοντέλων τύρβης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Gauss-Seidel.

4 Επικύρωση και Επαλήθευση των Προσομοιώσεων

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η ποσοτικοποίηση των σφαλμάτων και της αβεβαιότητας της μοντελοποίησης της ροής γύρω από τη συστοιχία Φ/Β. Συγκεκριμένα, παρακάτω επιχειρείται η «επαλήθευση» (“verification”) και «επικύρωση» (“validation”) των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (1998; Oberkampf and Trucano, 2002). Η διαδικασία της επαλήθευσης των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση των σφαλμάτων και η επικύρωση, την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας. Όσον αφορά στην επαλήθευση παρουσιάζονται, διαγράμματα σύγκρισης των προσομοιώσεων, καθώς και το σφάλμα διακριτοποίησης, το οποίο υπολογίζεται μέσω της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος (κεφ. 4.1). Όσον αφορά στην επικύρωση γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με πειραματικά δεδομένα (κεφ. 4.2).

4.1 Μελέτη Ανεξαρτησίας Πλέγματος

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν, τρία πλέγματα διαφορετικής πυκνωσης τα οποία αφορούν περίπτωση μελέτης με ένα Φ/Β. Το Φ/Β απέχει από το έδαφος 1m και έχει κλίση ως προς αυτό 25 μοίρες. Το μήκος χορδής του είναι $c=4,579m$ και το ύψος της άνω ακμής του από το έδαφος, $H=2,96m$. Το πάχος του Φ/Β είναι 40mm. Και στις τρεις περιπτώσεις δημιουργήθηκε υπολογιστικό χωρίο με διαστάσεις 16H ανάντη του Φ/Β, 14H κατάντη και 18H πάνω από το Φ/Β. Αρχικά, μέσω του εργαλείου blockMesh δημιουργήθηκε ένα αρχικό δομημένο πλέγμα το οποίο αποτελείται από εξαεδρικά κελιά. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται ο αριθμός των κελιών ανά διάσταση του υπολογιστικού χωρίου. Ο λόγος πυκνωσης ανά διάσταση είναι 1,25.

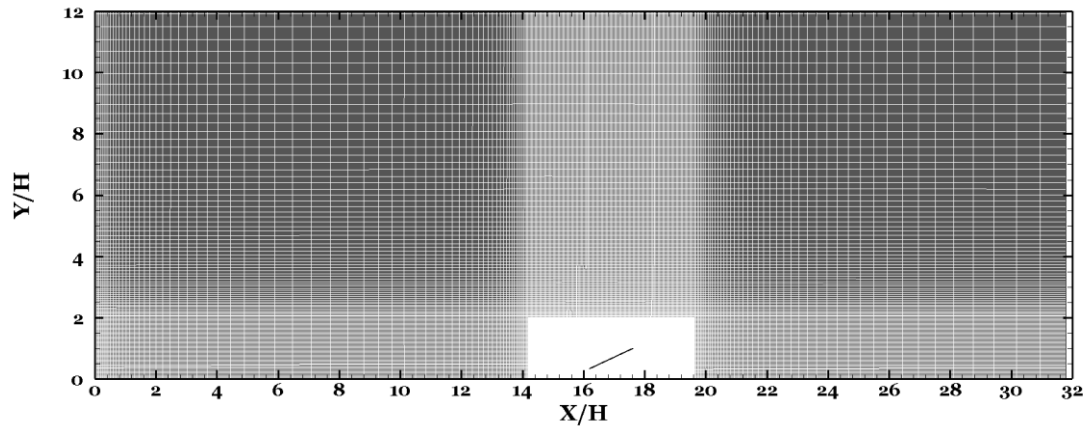
Πίνακας 2 Αριθμός κελιών ανά διάσταση του υπολογιστικού χωρίου για το αρχικό δομημένο πλέγμα που δημιουργήθηκε με το εργαλείο blockMesh.

	Αριθμός κελιών στον X άξονα	Αριθμός κελιών στον Y άξονα
Αραιό Πλέγμα	249	128
Μεσαίο Πλέγμα	311	160
Πυκνό Πλέγμα	389	200

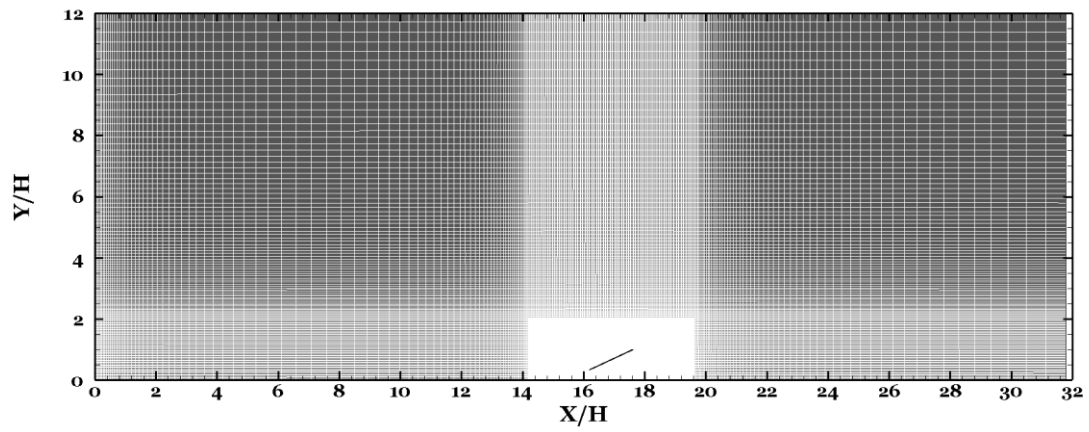
Κατά τη δημιουργία του αρχικού δομημένου πλέγματος έγινε προσοδευτική πύκνωση των κελιών ως προς το Φ/B και ως προς την είσοδο του χωρίου. Στη συνέχεια εισήχθη η γεωμετρία του Φ/B στο δομημένο υπολογιστικό πλέγμα μέσω του εργαλείου snappyHexMesh και ενός αρχείου επιφανειακού πλέγματος τύπου stl. Στο τελικό πλέγμα δημιουργήθηκε μία ζώνη πύκνωσης η οποία είχε διαστάσεις $2H$ ανάντη και κατόντη του Φ/B και $1H$ πάνω από την άνω ακμή του. Επίσης, γύρω από τη γεωμετρία του Φ/B δημιουργήθηκαν τρία επίπεδα πύκνωσης του πλέγματος. Τέλος, προστέθηκαν έξι στρώματα (“layers”) λεπτών στοιχείων γύρω από την επιφάνεια του Φ/B με λόγο διαστολής των κελιών από την επιφάνεια του Φ/B προς τα έξω, 1.2. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του μοντέλου τύρβης k- ϵ RNG.

Το αραιό πλέγμα αποτελείται από 68.928 κελιά. Στη ζώνη πύκνωσης γύρω από το Φ/B , το μέγεθος κελιού είναι $\Delta x = \Delta y = 5,8\text{cm}$ και το ύψος του κελιού του πρώτου στρώματος κοντά στην επιφάνεια του Φ/B είναι $1,875\text{mm}$. Το μεσαίο πλέγμα αποτελείται από 102.087 κελιά. Στη ζώνη πύκνωσης γύρω από το Φ/B , το μέγεθος κελιού είναι $\Delta x = \Delta y = 4,73\text{cm}$ και το ύψος του κελιού του πρώτου στρώματος κοντά στην επιφάνεια του Φ/B είναι $1,5\text{mm}$. Το πυκνό πλέγμα αποτελείται από 153.569 κελιά. Στη ζώνη πύκνωσης γύρω από το Φ/B , το μέγεθος κελιού είναι $\Delta x = \Delta y = 3,6\text{cm}$ και το ύψος του κελιού του πρώτου στρώματος κοντά στην επιφάνεια του Φ/B είναι $1,2\text{mm}$.

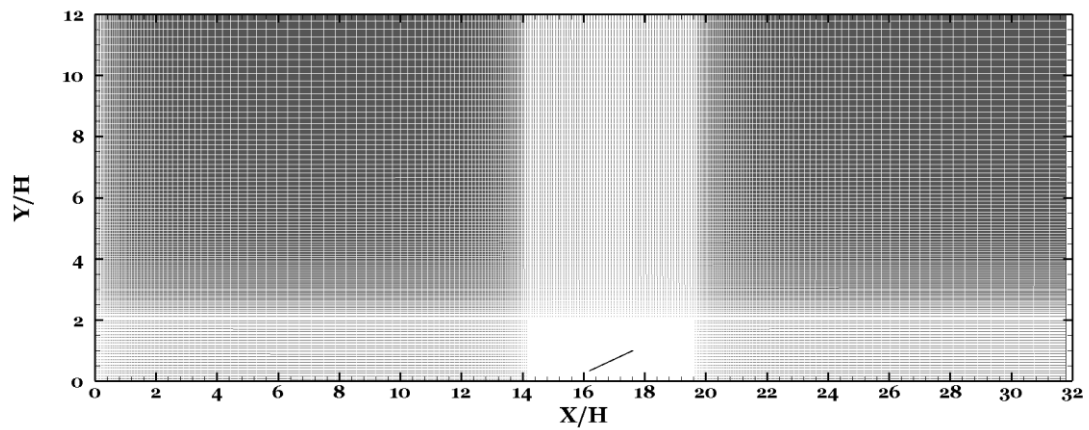
α)



β)



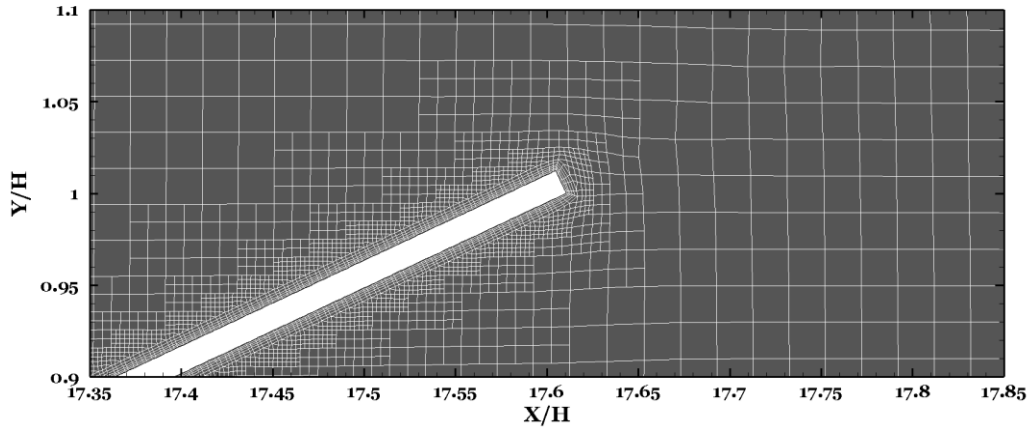
γ)



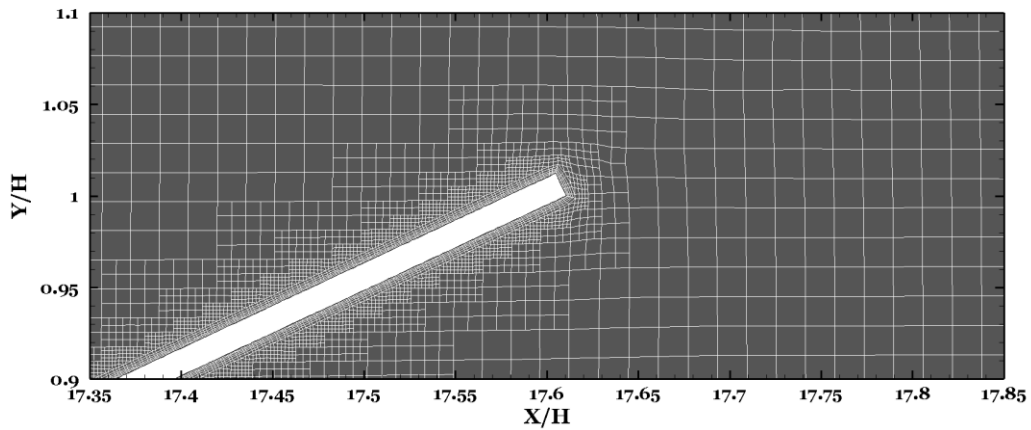
Σχήμα 4-1 Ζώνη πύκνωσης γύρω από το Φ/B για το α) αραιό, β) το μεσαίο και γ) το πυκνό πλέγμα.

Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται η ζώνη πύκνωσης που δημιουργήθηκε γύρω από το Φ/B με σκοπό την καλύτερη ανάλυση του σημείου ανακοπής ανάντη του Φ/B και της ανακυκλοφορίας κατόντη.

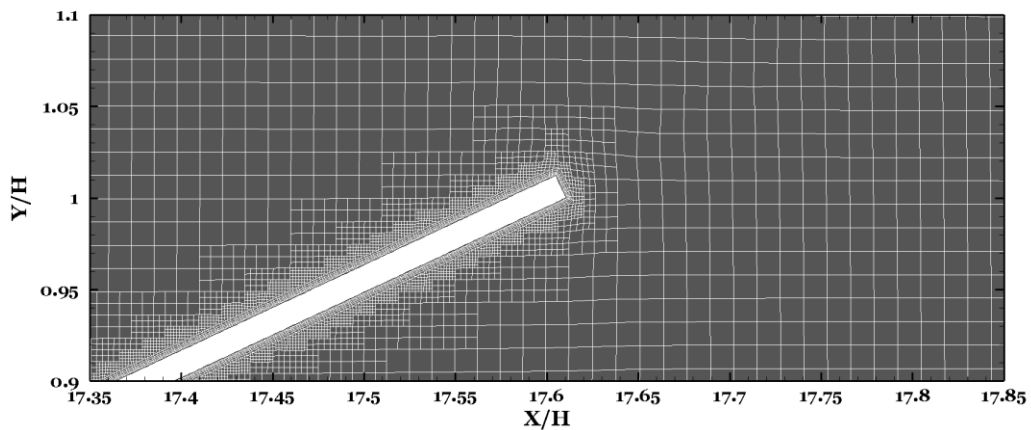
α)



β)



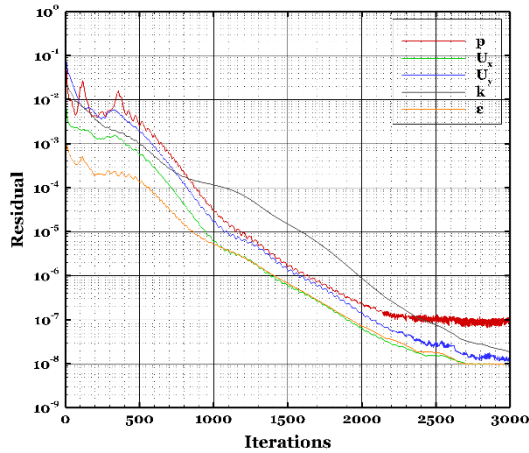
γ)



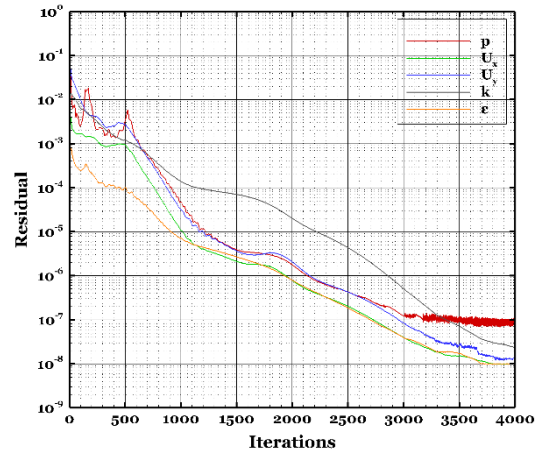
Σχήμα 4-2 Επίπεδα πύκνωσης και στρώματα λεπτών κελιών γύρω από την επιφάνεια του Φ/B για το α) αραιό, β) το μεσαίο και γ) το πυκνό πλέγμα.

Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζονται τα επίπεδα πύκνωσης και τα στρώματα λεπτών κελιών που δημιουργήθηκαν γύρω από το Φ/Β με σκοπό τον καλύτερο υπολογισμό της φυσικής της ροής εντός του οριακού στρώματος.

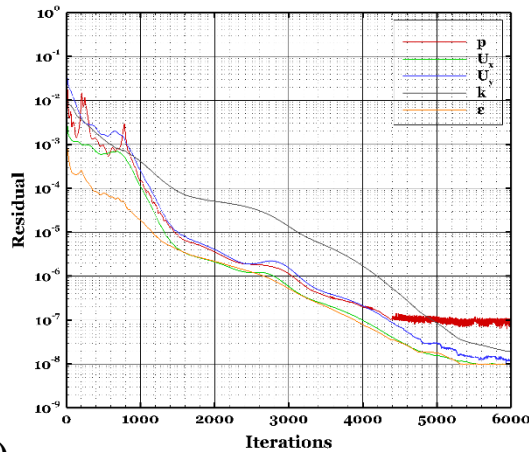
α)



β)

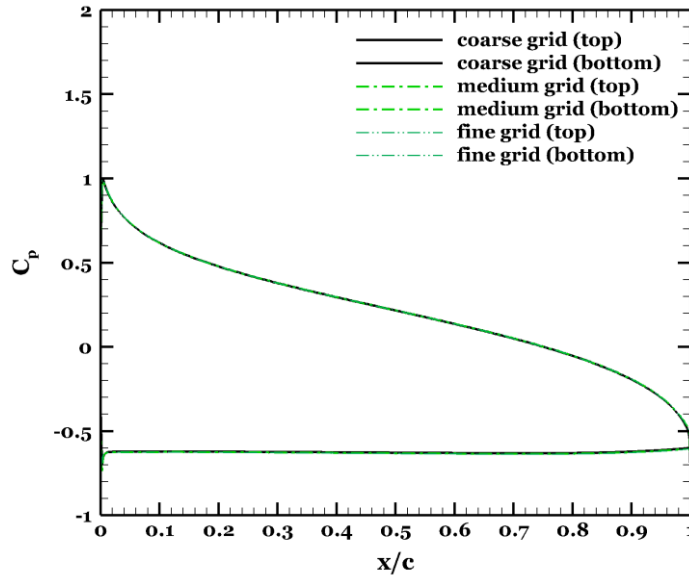


γ)



Σχήμα 4-3 Υπόλοιπα των εξισώσεων της πίεσης, της ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για α) το αραιό, β) το μεσαίο και γ) το πυκνό πλέγμα- Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος.

Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζονται τα υπόλοιπα των εξισώσεων της πίεσης, των συνιστωσών της ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για το αραιό, το μεσαίο και το πυκνό πλέγμα. Για το κριτήριο τερματισμού των επαναλήψεων επιλέγεται μία συγκεκριμένη τιμή των υπολοίπων των εξισώσεων. Για την εξίσωση της πίεσης επιλέγεται τιμή τερματισμού του υπολοίπου να είναι 10^{-7} , ενώ για όλες τις άλλες εξισώσεις επιλέγεται τιμή τερματισμού 10^{-8} . Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές ισχύουν και για όλες τις υπόλοιπες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.



Σχήμα 4-4 Σύγκριση των λύσεων του αραιού, μεσαίου και πυκνού πλέγματος μέσω του αδιάστατου συντελεστή πίεσης της άνω και κάτω πλευράς του Φ/B .

Καθώς στο Σχήμα 4-4 δεν απεικονίζεται σωστά η διαφορά στη λύση μεταξύ των τριών πλεγμάτων έγινε εκτίμηση του σφάλματος μεταξύ του πυκνού και του μεσαίου πλέγματος, μέσω των παρακάτω σχέσεων (Roache, 1997):

$$E_1^{fine} = \frac{(f_2 - f_1)}{1 - r^p} \quad (4-1)$$

$$E_2^{medium} = r^p \frac{(f_2 - f_1)}{1 - r^p} \quad (4-2)$$

Όπου $E_{U,1}$, $E_{U,2}$ το σφάλμα στη λύση του πυκνού και του μεσαίου πλέγματος, αντίστοιχα.

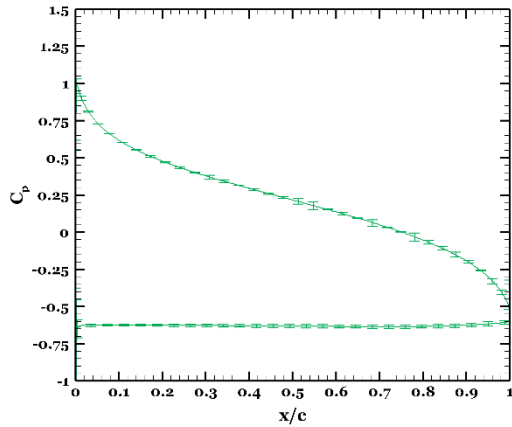
Το $r = \frac{h_1}{h_2} = 1.5$ είναι ο λόγος πυκνώσης και f_1 , f_2 οι λύσεις του πυκνού και του μεσαίου πλέγματος, αντίστοιχα και p είναι η τάξη του αριθμητικού σχήματος. Στην προκειμένη περίπτωση $p=2$.

Για να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του σφάλματος ενσωματώνεται ένας συντελεστής ασφαλείας $F_s = 3$ και ορίζεται ο δείκτης σύγκλισης πλέγματος GCI (Grid Convergence Index):

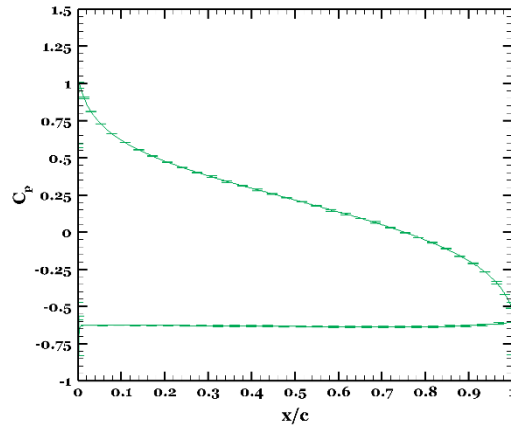
$$GCI_1^{fine} = F_s |E_1| \quad (4-3)$$

$$GCI_2^{medium} = F_s |E_2| \quad (4-4)$$

α)



β)



Σχήμα 4-5 Λύσεις του α) μεσαίου και β) πυκνού πλέγματος με γραμμές σφάλματος το GCI .

Στο Σχήμα 4-5 α) παρουσιάζεται η λύση του μεσαίου πλέγματος με γραμμές σφάλματος το GCI_2^{medium} του οποίου η μέση τιμή για την άνω πλευρά του Φ/B είναι 0,84% και για την κάτω πλευρά είναι 0,97%. Στο Σχήμα 4-5 β) παρουσιάζεται η λύση του πυκνού πλέγματος με γραμμές σφάλματος το GCI_1^{fine} του οποίου η μέση τιμή για την άνω πλευρά του Φ/B είναι 0,37% και για την κάτω πλευρά είναι 0,4%. Τα χαρακτηριστικά του πυκνού πλέγματος επιλέχθηκαν για να πραγματοποιηθούν όλες οι προσομοιώσεις με τη συστοιχία Φ/B που θα παρουσιαστούν στα παρακάτω κεφάλαια.

4.2 Επικύρωση των Αποτελεσμάτων

Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται η επικύρωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, για τις περιπτώσεις μελέτης με νότια και βόρεια διεύθυνση ανέμου, μέσω σύγκρισης τους με πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα πραγματοποιείται μέσω καμπυλών του αδιάστατου συντελεστή πίεσης, C_p , τιμών του συντελεστή δύναμης, C_f , όπως υπολογίζεται από τη σχέση (4-5) κατά μήκος των Φ/B , καθώς και μέσω γραφημάτων τα οποία απεικονίζουν τις ροϊκές γραμμές γύρω από τη συστοιχία και τα πεδία της αδιάστατης ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

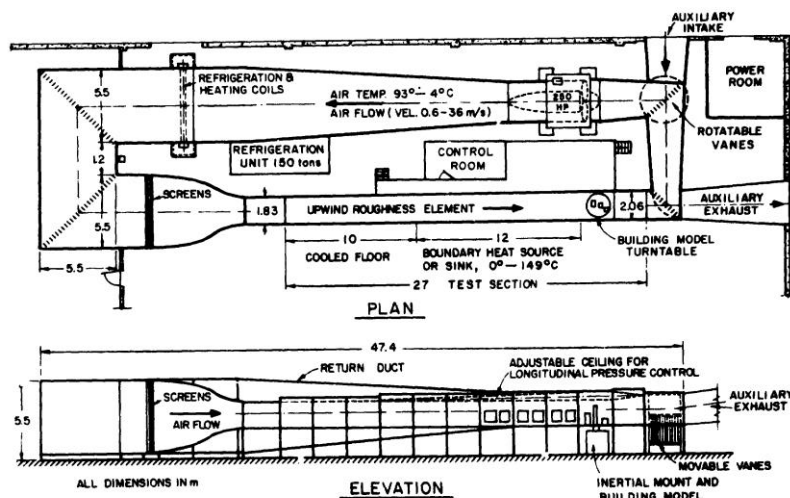
$$C_f = \frac{\int_A (P_{top} - P_{bottom})dA}{q \cdot A} \quad (4-5)$$

όπου P_{top} , η πίεση στο άνω τμήμα του Φ/Β, P_{bottom} , η πίεση στο κάτω τμήμα του Φ/Β και q , η δυναμική πίεση ίση με:

$$q = \frac{1}{2} \rho u_{ref}^2 \quad (4-6)$$

όπου u_{ref} , η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής.

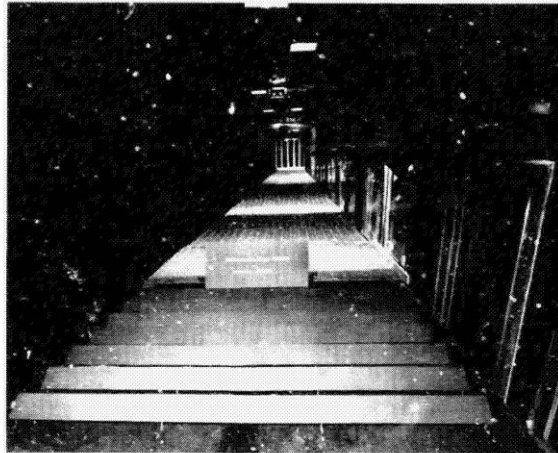
Τα πειραματικά δεδομένα αφορούν τη μελέτη των Miller and Zimmerman (1981) σχετικά με την εκτίμηση των φορτίων ανέμου σε συστοιχία Φ/Β. Οι πειραματικές μετρήσεις έλαβαν χώρα στη Μετεωρολογική αεροσήραγγα του Πανεπιστημίου του Κολοράντο. Το τμήμα δοκιμών της αεροσήραγγας είχε μήκος περίπου 30m, πλάτος περίπου 2m και ύψος 1.83m. Το μεγάλο μήκος του τμήματος δοκιμών αποσκοπεί στην ανάπτυξη οριακού στρώματος εντός του, για τη χρήση του σε πειράματα. Για δοκιμές με ομοιόμορφη κατατομή ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε το μπροστινό μέρος του τμήματος δοκιμών.



Σχήμα 4-6 Σχηματικό διάγραμμα της Μετεωρολογικής αεροσήραγγας του Πανεπιστημίου του Κολοράντο Miller and Zimmerman (1981).

Το μοντέλο της συστοιχίας που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές ήταν ένα υπό κλίμακα μοντέλο κλίμακας 1:24 μίας κανονικού μεγέθους συστοιχίας με μήκος χορδής 2.44m. Η ταχύτητα στην είσοδο της αεροσήραγγας ήταν ομοιόμορφη και ίση με 15 m/sec. Οι συστοιχίες απείχαν 0.25

μήκη χορδής από το έδαφος και δύο μήκη χορδής μεταξύ τους. Η κλίση της συστοιχίας ως προς το έδαφος ήταν 20 μοίρες.

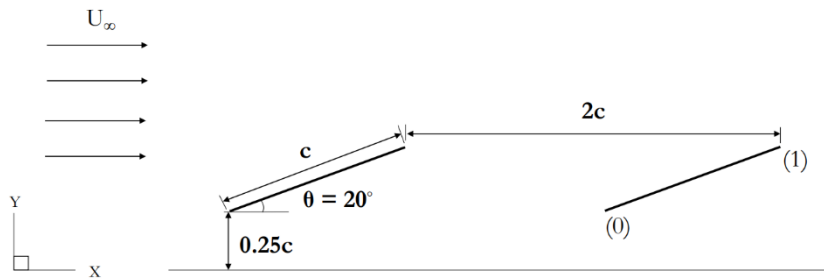


Σχήμα 4-7 Υπό κλίμακα μοντέλα συστοιχίας Φ/B εντός της αεροσήραγγας του Πανεπιστημίου του Κολοράντο (Miller and Zimmerman, 1981).

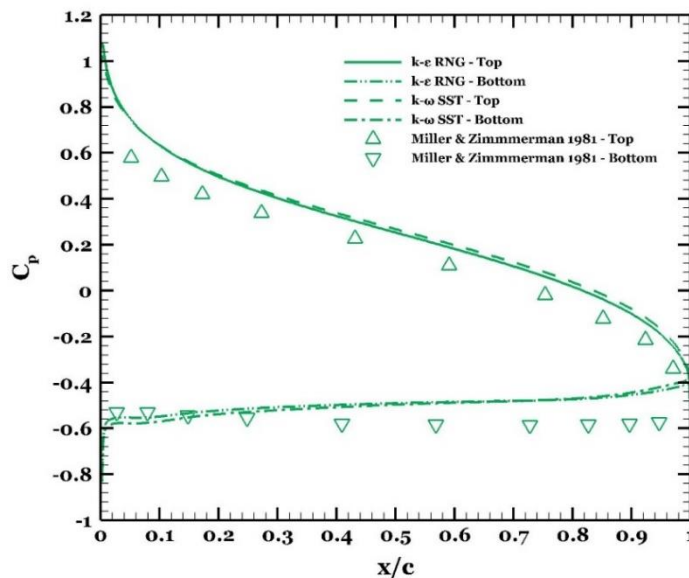
Για το σκοπό της επικύρωσης των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε περίπτωση μελέτης με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με το μοντέλο πλήρους κλίμακας και κλίση της συστοιχίας ως προς το έδαφος 20 μοίρες. Η ταχύτητα στην είσοδο ορίστηκε, ομοιόμορφη και ίση με 0.6 m/sec, έτσι ώστε ο αριθμός Reynolds να είναι ίδιος με το υπό κλίμακα μοντέλο, $Re = \frac{u_{\infty} c}{\nu} \approx 1 \times 10^5$.

4.2.1 Επικύρωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης επικύρωσης, δηλαδή της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα. Στο Σχήμα 4-8 απεικονίζονται σχηματικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας. Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα (Σχήμα 4-9, Σχήμα 4-10, Σχήμα 4-11) του αδιάστατου συντελεστή πίεσης, C_p για την περίπτωση μελέτης με νότιο άνεμο. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που έγιναν με χρήση δύο μοντέλων τύρβης, k- ϵ RNG και k- ω SST, και των πειραματικών δεδομένων από τη μελέτη των Miller and Zimmerman (1981), όπως αναφέρεται παραπάνω.

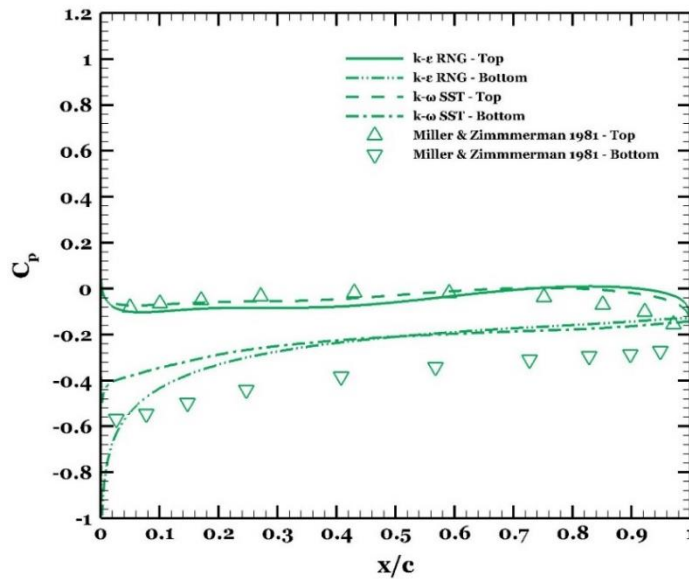


Σχήμα 4-8 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας δέκα Φ/B για περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου – Επικύρωση των αποτελεσμάτων.



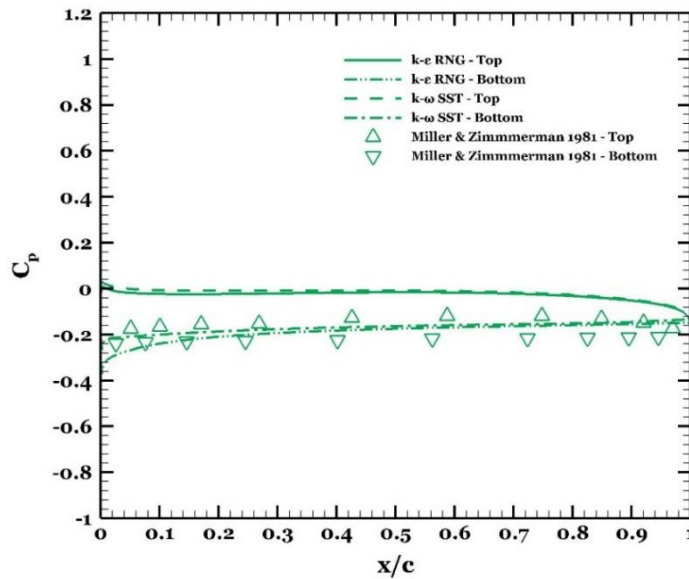
Σχήμα 4-9 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k- ϵ RNG & k- ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)

Στο Σχήμα 4-9 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, που έγιναν με χρήση των μοντέλων τύρβης k- ϵ RNG και k- ω SST, με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981) για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας. Παρατηρείται ότι υπάρχει σε ικανοποιητικό βαθμό συμφωνία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα τόσο για την άνω πλευρά, όσο και για την κάτω πλευρά του πρώτου Φ/B . Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι οι προσομοιώσεις υπερεκτιμούν τον αδιάστατο συντελεστή πίεσης στην άνω ακμή του.



Σχήμα 4-10 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$ RNG & $k-\omega$ SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)

Στο Σχήμα 4-10 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, που έγιναν με χρήση των μοντέλων τύρβης $k-\epsilon$ RNG και $k-\omega$ SST, με πειραματικά δεδομένα για το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας, για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παρατηρείται ότι υπάρχει σε ικανοποιητικό βαθμό συμφωνία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα για την άνω πλευρά, ενώ για την κάτω πλευρά του δεύτερου Φ/B παρατηρείται απόκλιση. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι προσομοιώσεις υπερεκτιμούν τον αδιάστατο συντελεστή πίεσης στην κάτω ή υπήνεμη πλευρά του. Επίσης, παρατηρείται ότι το μοντέλο $k-\omega$ SST ακολουθεί καλύτερα την καμπύλη των πειραματικών δεδομένων, αλλά το $k-\epsilon$ RNG προσεγγίζει περισσότερο τις τιμές τους.

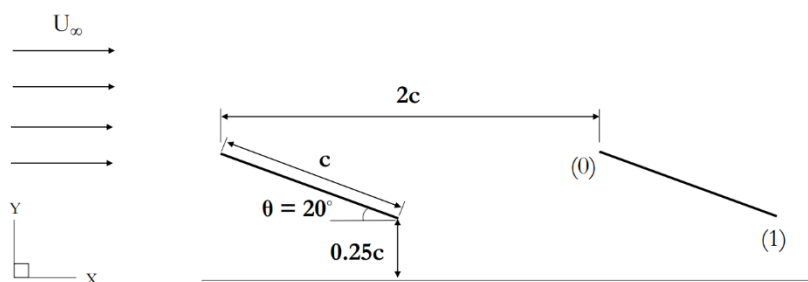


Σχήμα 4-11 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$ RNG & $k-\omega$ SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)

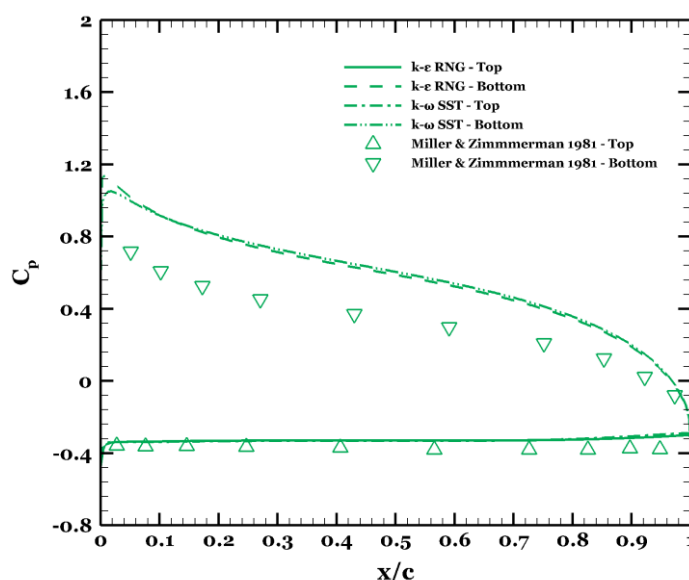
Στο Σχήμα 4-11 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, που έγιναν με χρήση των μοντέλων τύρβης $k-\epsilon$ RNG και $k-\omega$ SST, με πειραματικά δεδομένα για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας, για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παρατηρείται ότι υπάρχει σε ικανοποιητικό βαθμό συμφωνία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα για την κάτω πλευρά, ενώ για την άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B παρατηρείται απόκλιση σε όλο το μήκος της.

4.2.2 Επικύρωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης επικύρωσης, δηλαδή της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα. Στο Σχήμα 4-12 απεικονίζονται σχηματικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας. Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα (Σχήμα 4-13, Σχήμα 4-14, Σχήμα 4-15) του αδιάστατου συντελεστή πίεσης, C_p για την περίπτωση μελέτης με βόρειο άνεμο. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που έγιναν με χρήση δύο μοντέλων τύρβης, $k-\epsilon$ RNG και $k-\omega$ SST, και των πειραματικών δεδομένων από τη μελέτη των Miller and Zimmerman (1981), όπως αναφέρεται παραπάνω.

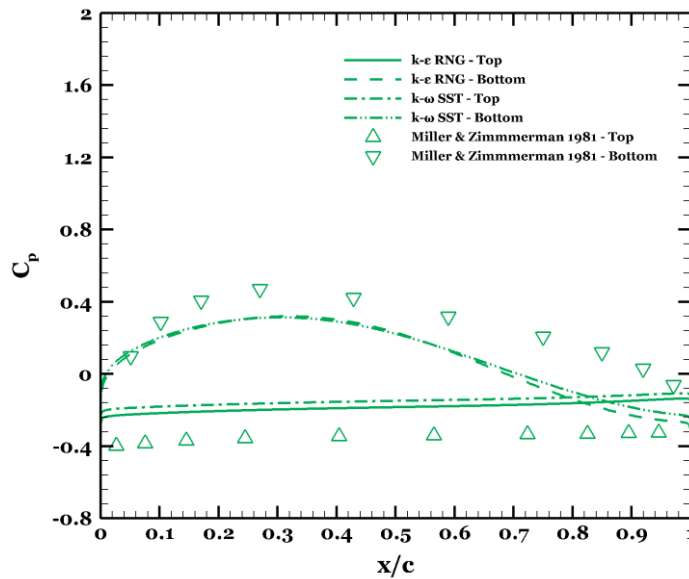


Σχήμα 4-12 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/Β για περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.



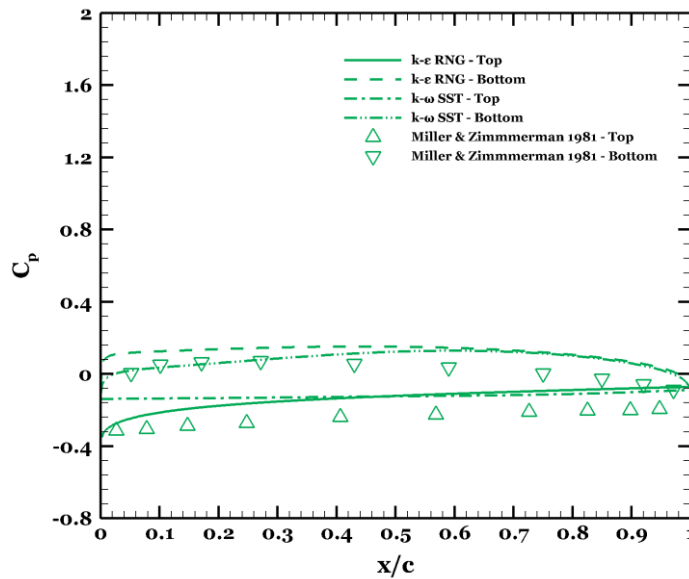
Σχήμα 4-13 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πρώτο Φ/Β της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)

Στο Σχήμα 4-13 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, που έγιναν με χρήση των μοντέλων τύρβης k-ε RNG και k-ω SST, με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981) για το πρώτο Φ/Β της συστοιχίας. Παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα για την άνω πλευρά του Φ/Β, ενώ για την κάτω πλευρά υπάρχει απόκλιση η οποία μεγιστοποιείται κοντά στην άνω ακμή του. Όπως είναι αναμενόμενο, το σημείο ανακοπής στην περίπτωση αυτή βρίσκεται κοντά στην ακμή προσβολής στην κάτω πλευρά του Φ/Β. Επίσης, παρατηρείται ότι υπάρχει αποκόλληση της ροής στην άνω πλευρά του.



Σχήμα 4-14 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$ RNG & $k-\omega$ SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)

Στο Σχήμα 4-14 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, που έγιναν με χρήση των μοντέλων τύρβης $k-\epsilon$ RNG και $k-\omega$ SST, με πειραματικά δεδομένα για το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας, για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Παρατηρείται ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και των πειραματικών δεδομένων. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται κοντά στην ακμή εκφυγής του Φ/B , τόσο για την άνω, όσο και για την κάτω πλευρά του.

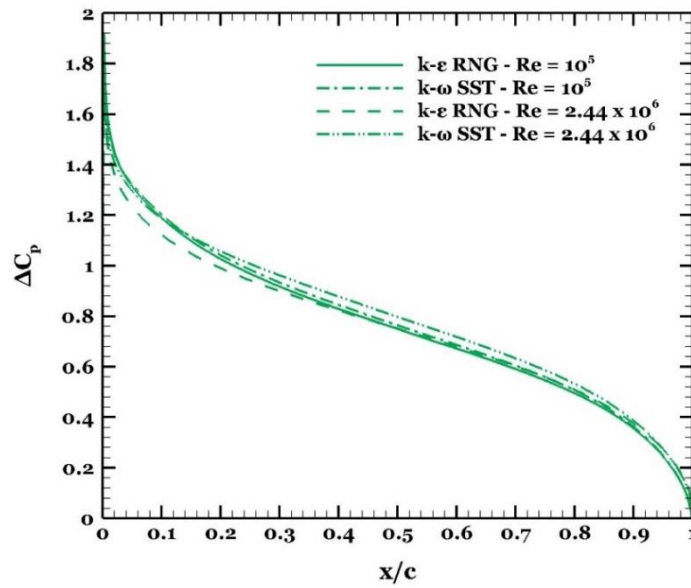


Σχήμα 4-15 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή πίεσης για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$ RNG & $k-\omega$ SST) με πειραματικά δεδομένα από τους Miller and Zimmerman (1981)

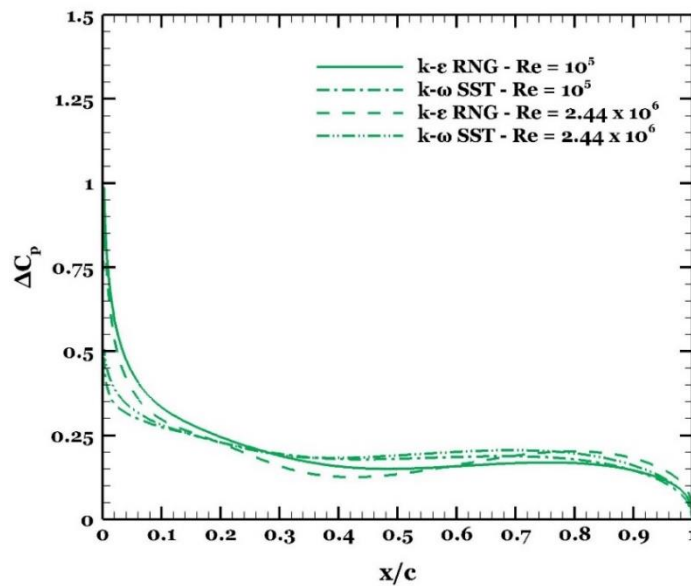
Στο Σχήμα 4-15 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, που έγιναν με χρήση των μοντέλων τύρβης $k-\epsilon$ RNG και $k-\omega$ SST, με πειραματικά δεδομένα για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας, για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Παρατηρείται ότι τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται καλύτερα από το μοντέλο τύρβης $k-\omega$ SST για την περιοχή κοντά στην ακμή προσβολής του Φ/B στην υπήνεμη πλευρά του, ενώ στην προσήνεμη πλευρά του υπάρχει καλύτερη συμφωνία των πειραματικών με το $k-\epsilon$ RNG.

4.2.3 Εξάρτηση της λύσης από τον αριθμό Reynolds

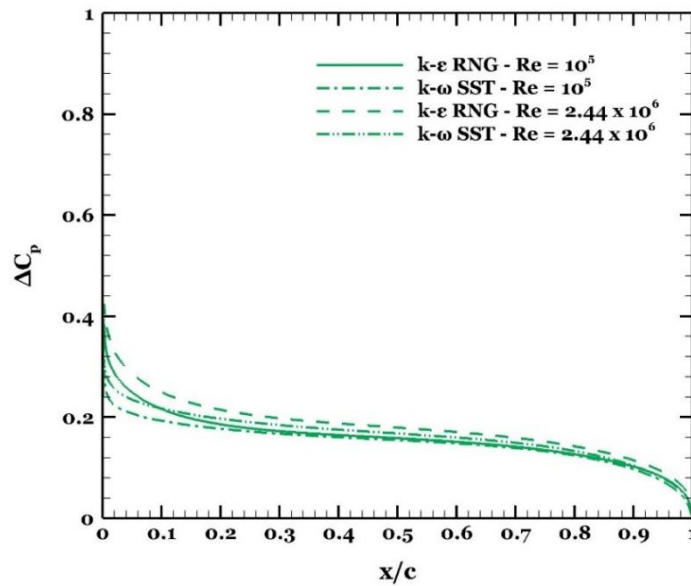
Στο υποκεφάλαιο αυτό εξετάζεται η εξάρτηση του αδιάστατου συντελεστή πίεσης και του συντελεστή δύναμης από τον αριθμό Reynolds. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε περίπτωση μελέτης για την οποία ορίστηκε ομοιόμορφη ταχύτητα στην είσοδο του χωρίου ίση με 15 m/sec με νότια διεύθυνση ανέμου. Η γεωμετρία της συστοιχίας Φ/B παρέμεινε η ίδια με αυτή της περίπτωσης μελέτης που δημιουργήθηκε για την επικύρωση των αποτελεσμάτων. Ο αριθμός Re για την περίπτωση αυτή υπολογίζεται, $Re = \frac{u_{\infty} c}{\nu} = 2.44 \times 10^6$. Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα (Σχήμα 4-16, Σχήμα 4-17, Σχήμα 4-18) της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος του Φ/B , ΔC_p , καθώς και πίνακας με τιμές του συντελεστή δύναμης, C_f , για τις δύο τιμές του αριθμού Re .



Σχήμα 4-16 Συγκριτικό διάγραμμα της διαφοράς αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και του κάτω τμήματος του πρώτου Φ/B της συστοιχίας. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) για δύο αριθμούς Reynolds ($Re = 10^5$ & $Re = 2.44 \times 10^6$).



Σχήμα 4-17 Συγκριτικό διάγραμμα της διαφοράς αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και του κάτω τμήματος του δεύτερου Φ/B της συστοιχίας. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) για δύο αριθμούς Reynolds ($Re = 10^5$ & $Re = 2.44 \times 10^6$).



Σχήμα 4-18 Συγκριτικό διάγραμμα της διαφοράς αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και του κάτω τμήματος του πέμπτου Φ/B της συστοιχίας. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (μοντέλα τύρβης k-ε RNG & k-ω SST) για δύο αριθμούς Reynolds ($Re = 10^5$ & $Re = 2.44 \times 10^6$).

Στα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 4-16, Σχήμα 4-17, Σχήμα 4-18) γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για τα δύο μοντέλα τύρβης και για δύο αριθμούς Reynolds $Re = 10^5$ και $Re = 2.44 \times 10^6$. Από τη σύγκριση των καμπυλών του ΔC_p φαίνεται ότι δεν υπάρχει σημαντική επίδραση του αριθμού Re στον αδιάστατο συντελεστή πίεσης.

Πίνακας 3 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τους δύο αριθμούς Re και μοντέλο τύρβης k-ε RNG

Re	Cf (PV1)	Cf (PV2)	Cf (PV5)
1×10^5	0,762	0,206	0,159
2.44×10^6	0,752	0,201	0,181

Στον Πίνακα 3 υπολογίζεται ο συντελεστής δύναμης, C_f , για τους δύο αριθμούς Re για το μοντέλο τύρβης k-ε RNG. Για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας η ποσοστιαία διαφορά στην τιμή του συντελεστή δύναμης είναι 1%, για το δεύτερο Φ/B είναι 2,4%, ενώ για το πέμπτο είναι 13,8%.

Πίνακας 4 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τους δύο αριθμούς Re και μοντέλο τύρβης k-ω SST

Re	Cf (PV1)	Cf (PV2)	Cf (PV5)
1×10^5	0,774	0,197	0,150
2.44×10^6	0,794	0,207	0,164

Στον Πίνακα 4 υπολογίζεται ο συντελεστής δύναμης, C_f , για τους δύο αριθμούς Re για το μοντέλο τύρβης $k-\omega$ SST. Για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας η ποσοστιαία διαφορά στην τιμή του συντελεστή δύναμης είναι 2,5%, για το δεύτερο Φ/B είναι 4,8%, ενώ για το πέμπτο είναι 8,5%.

Παρατηρείται ότι και για τα δύο μοντέλα τύρβης η μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας, ενώ για το πρώτο και το δεύτερο η ποσοστιαία διαφορά στο συντελεστή δύναμης για τις δύο τιμές του αριθμού Re δεν ξεπερνά το 5%. Επίσης, παρατηρείται ότι το μοντέλο $k-\epsilon$ RNG δείχνει να επηρεάζεται λιγότερο από τον αριθμό Re όσον αφορά στο πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας, ενώ για το πέμπτο Φ/B η επιρροή του αριθμού Re είναι μικρότερη για το μοντέλο $k-\omega$ SST.

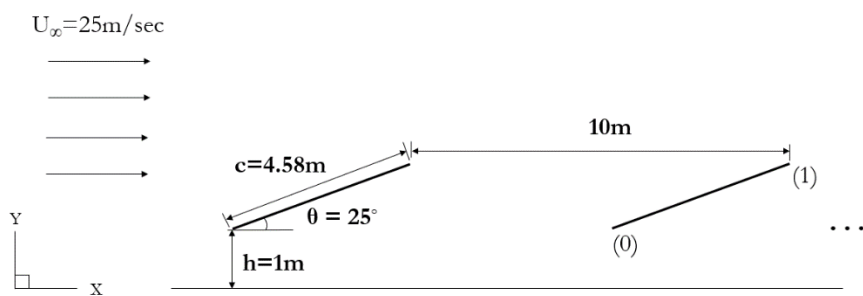
5 Συγκριτική Μελέτη των Μοντέλων Τύρβης

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη των μοντέλων τύρβης k-ε RNG και k-ω SST για τις περιπτώσεις ροής με νότια και βόρεια διεύθυνση ανέμου για συστοιχία δέκα φωτοβολταϊκών συλλεκτών με κλίση 25 μοίρες ως προς το έδαφος και γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο υπο-κεφάλαιο 3.3. Η σύγκριση πραγματοποιείται μέσω καμπυλών της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης μεταξύ του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B , ΔC_p , ΔC_p που υπολογίζεται από τη σχέση (5-1) τιμών του συντελεστή δύναμης, C_f , (σχέση (4-5)) για το κάθε Φ/B , καθώς και μέσω γραφημάτων τα οποία απεικονίζουν τις ροϊκές γραμμές γύρω από τη συστοιχία και τα πεδία της αδιάστατης ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

$$\Delta C_p = \frac{P_{top} - P_{bottom}}{q} \quad (5-1)$$

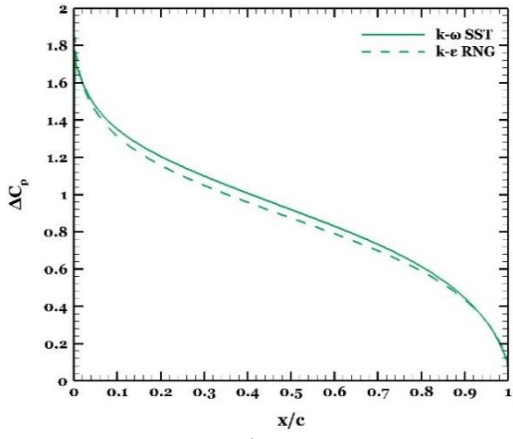
5.1 Περίπτωση Μελέτης Ροής Ανέμου με Νότια Διεύθυνση

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με σκοπό τη συγκριτική μελέτη των μοντέλων τύρβης k-ω SST & k-ε RNG για την περίπτωση μελέτης ροής ανέμου με νότια διεύθυνση.

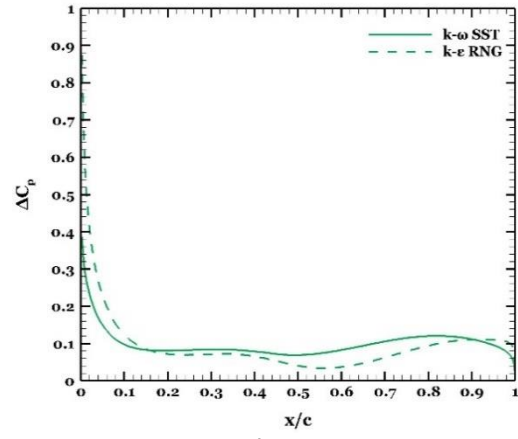


Σχήμα 5-1 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/B για περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.

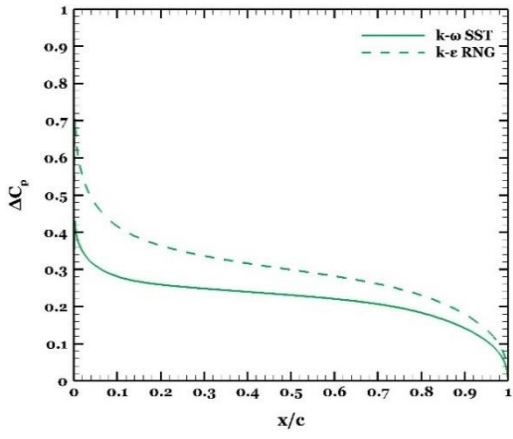
Φ/B v0.1



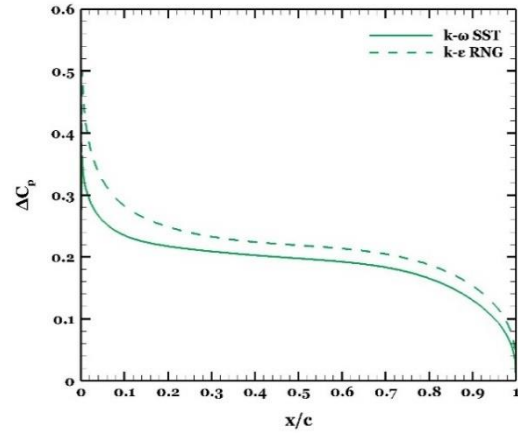
Φ/B v0.2



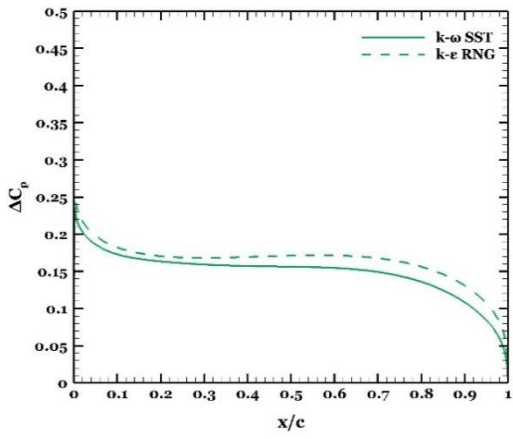
Φ/B v0.3



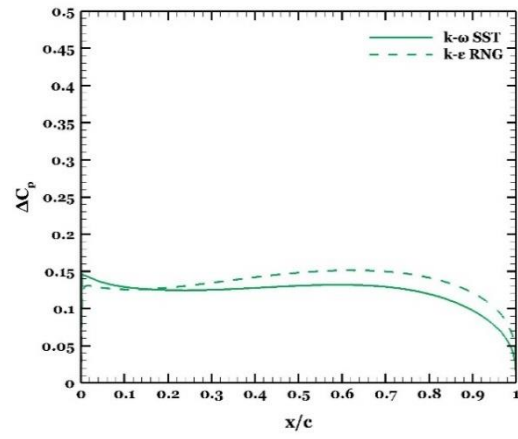
Φ/B v0.4



Φ/B v0.5



Φ/B v0.6

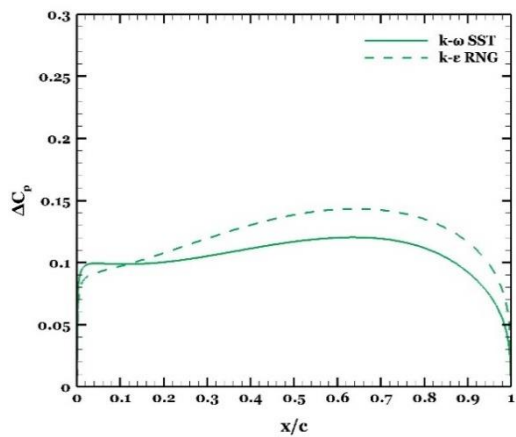


Φ/B v0.7

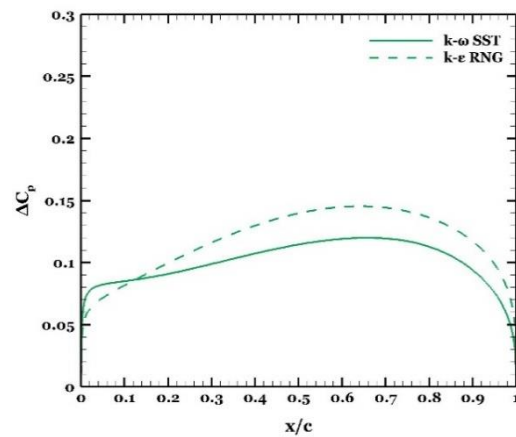


Φ/B v0.8

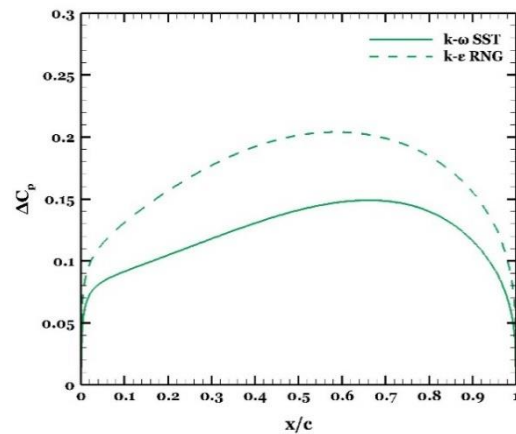
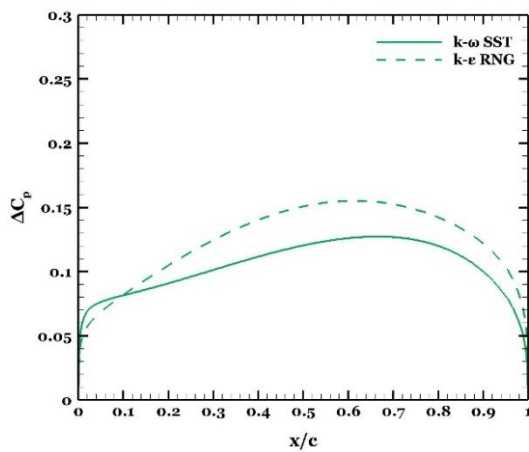




Φ/B no.9



Φ/B no.10



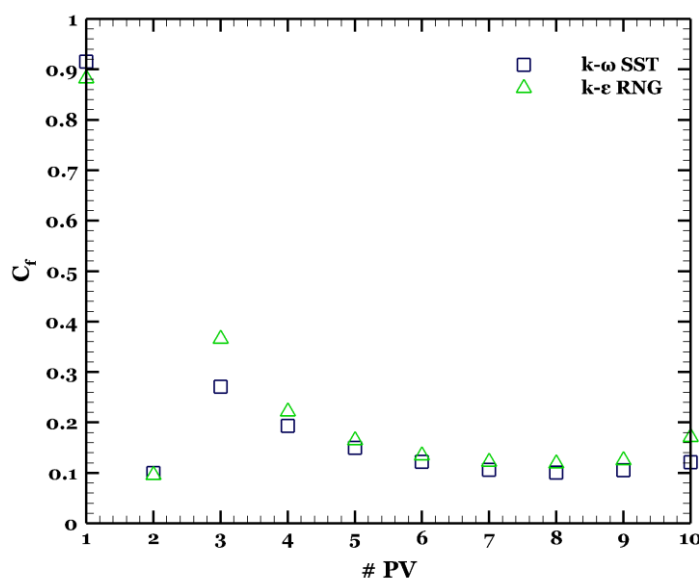
Σχήμα 5-2 Σύγκριση των μοντέλων τύρβης k- ω SST & k- ϵ RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B , ΔC_p , – Περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.

Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζονται οι καμπύλες της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω πλευράς των Φ/B της συστοιχίας και γίνεται σύγκριση των μοντέλων τύρβης k- ω SST & k- ϵ RNG. Παρατηρείται ότι για τα πρώτα έξι Φ/B της συστοιχίας η διαφορά στην εκτίμηση του ΔC_p είναι μικρή μεταξύ των δύο μοντέλων τύρβης k- ω SST & k- ϵ RNG, ενώ για τα υπόλοιπα τέσσερα η διαφορά μεγαλώνει με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται στο δέκατο Φ/B . Επίσης, το μοντέλο τύρβης k- ϵ RNG φαίνεται να υπερεκτιμά τη διαφορά του αδιάστατου συντελεστή πίεσης ΔC_p , σε σχέση με το μοντέλο k- ω SST για το τρίτο έως το δέκατο Φ/B της συστοιχίας, ενώ για τα πρώτα δύο δεν παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά.

Πίνακας 5 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τα δύο μοντέλα τύρβης, – Περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.

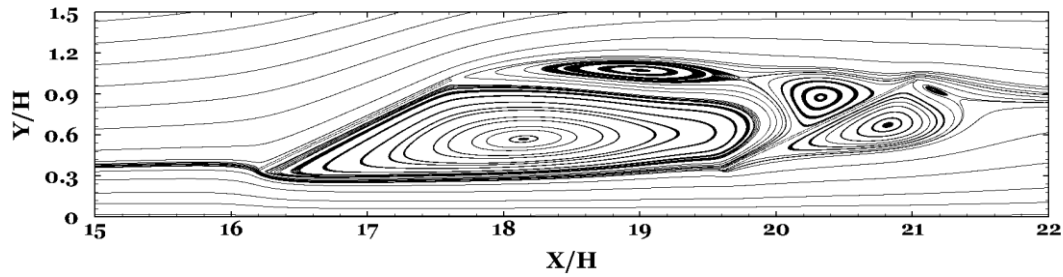
		C_f									
Μοντέλο Τύρβης	k- ω SST	0,915	0,100	0,271	0,193	0,150	0,122	0,106	0,101	0,105	0,121
	k- ϵ RNG	0,882	0,096	0,366	0,222	0,165	0,135	0,122	0,119	0,125	0,171
Φ/B	νο.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Ο Πίνακας 5 περιέχει τις τιμές του συντελεστή δύναμης C_f , που υπολογίστηκαν μέσω της σχέσης (4-5) για το κάθε Φ/B και για τα δύο μοντέλα τύρβης που εξετάζονται. Επίσης, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 5-3. Όπως είναι φανερό και αναμενόμενο το πρώτο Φ/B δέχεται τα μεγαλύτερα φορτία ανέμου, ενώ το δεύτερο δέχεται τη μικρότερη σε μέτρο δύναμη σε σχέση με τα υπόλοιπα Φ/B λόγω της επίδρασης προστασίας που παρέχεται από το πρώτο Φ/B . Παρατηρείται ότι ο συντελεστής δύναμης από το τρίτο Φ/B και έπειτα παρουσιάζει σταδιακή μείωση με εξαίρεση το τελευταίο Φ/B στο οποίο παρατηρείται μικρή αύξηση του συντελεστή σε σχέση με το προηγούμενο Φ/B της συστοιχίας. Επίσης, παρατηρείται ότι, για το πρώτο και δεύτερο Φ/B , το μοντέλο k- ω SST υπολογίζει μεγαλύτερη τιμή του C_f σε σχέση με το k- ϵ RNG, ενώ για τα υπόλοιπα Φ/B της συστοιχίας ισχύει το αντίστροφο.

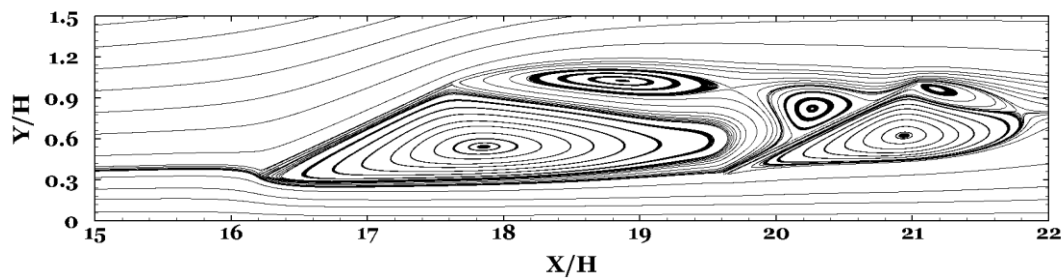


Σχήμα 5-3 Συγκριτικό διάγραμμα των μοντέλων τύρβης k- ω SST & k- ϵ RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/B , ΔC_p , – Περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.

α)



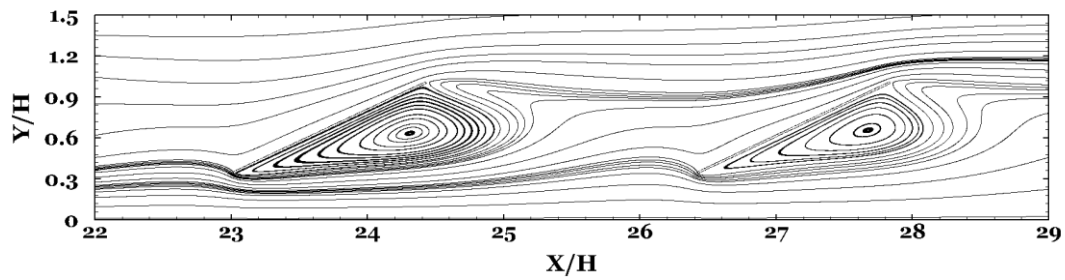
β)



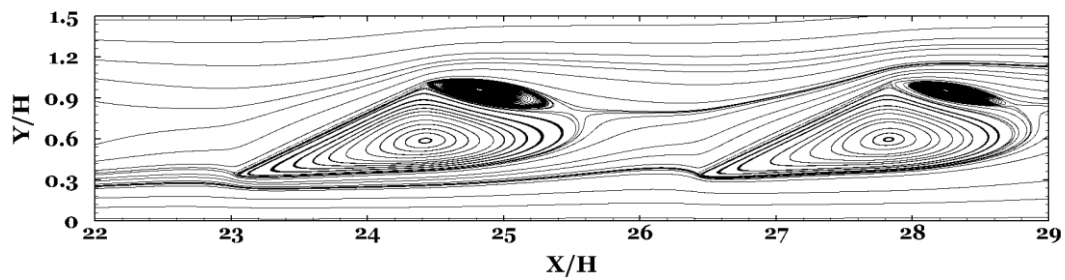
Σχήμα 5-4 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST.

Στο Σχήμα 5-4 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πρώτο και δεύτερο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST. Όπως φαίνεται, κατάντη του πρώτου Φ/B δημιουργούνται δύο κλειστές ανακυκλοφορίες, ενώ στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B δημιουργείται μία ανακυκλοφορία. Κατάντη του δεύτερου Φ/B δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες με μικρότερες διαστάσεις από αυτές του πρώτου. Παρατηρείται ότι τα δύο μοντέλα τύρβης εκτιμούν τις δύο ανακυκλοφορίες κατάντη του Φ/B με όμοιο τρόπο ως προς το μέγεθός τους. Ενώ για τις ανακυκλοφορίες κατάντη του δεύτερου Φ/B , φαίνεται ότι το μοντέλο $k-\omega$ SST υπερεκτιμά το μέγεθός τους σε σχέση με το μοντέλο $k-\epsilon$ RNG.

α)



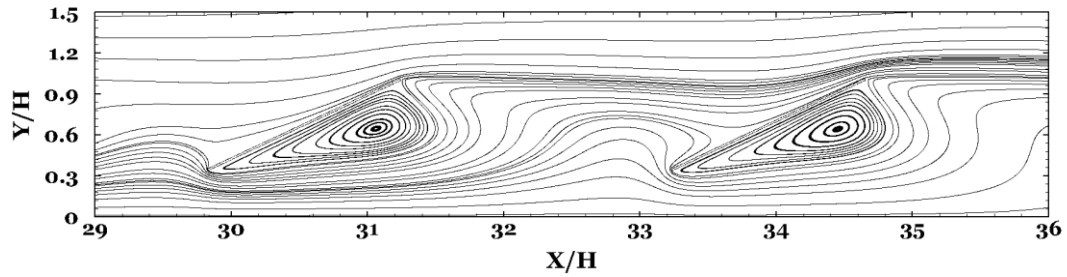
β)



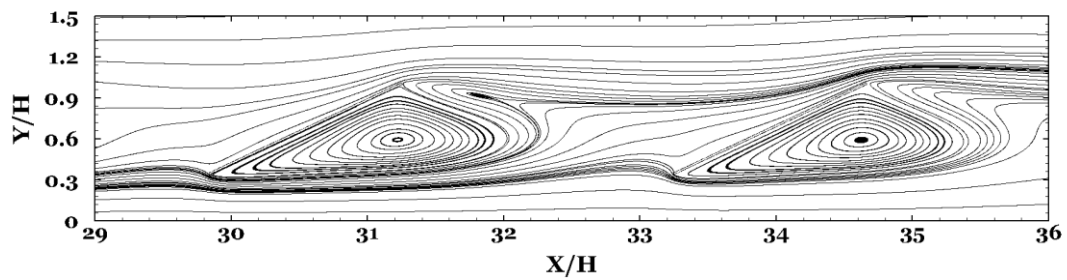
Σχήμα 5-5 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k- ϵ RNG και β) k- ω SST.

Στο Σχήμα 5-5 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το τρίτο και τέταρτο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) k- ϵ RNG και β) k- ω SST. Στο μοντέλο k- ω SST δημιουργούνται δύο κλειστές ανακυκλοφορίες κατάντη των Φ/B ενώ στο k- ϵ RNG δημιουργείται μία. Επίσης, οι ανακυκλοφορίες που υπολογίζονται από το μοντέλο k- ω SST έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις και συγκεκριμένα, μεγαλύτερο μήκος από εκείνες που υπολογίζει το k- ϵ RNG.

α)

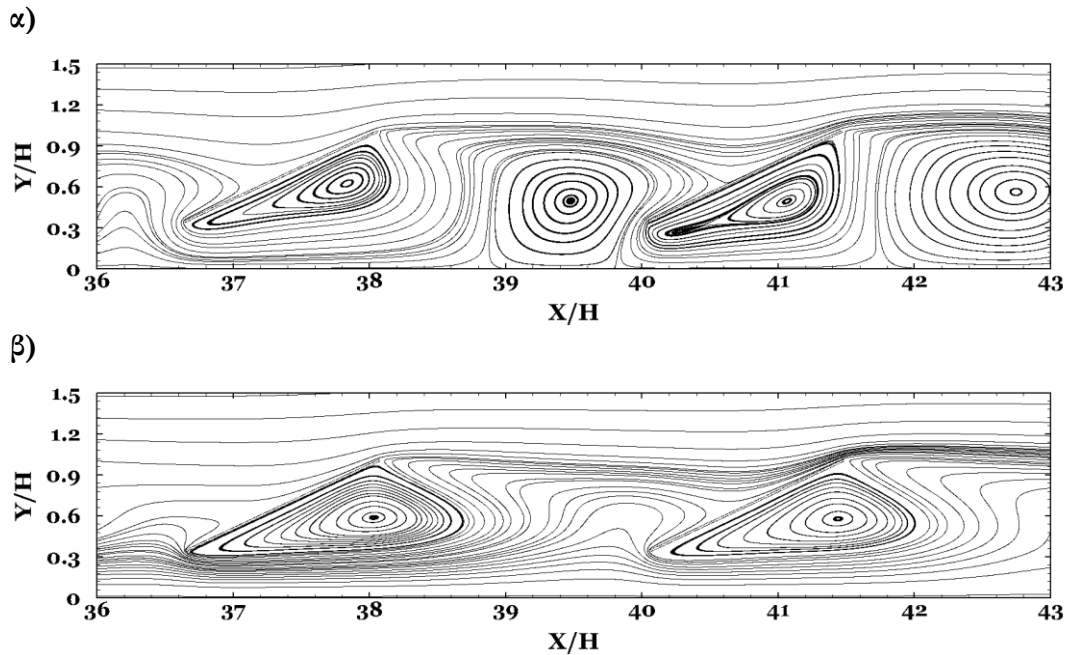


β)



Σχήμα 5-6 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και το έκτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β) k-ω SST.

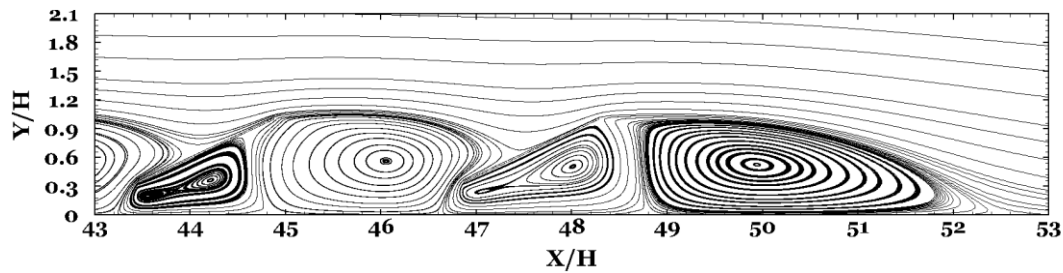
Στο Σχήμα 5-6 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πέμπτο και έκτο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) k-ε RNG και β) k-ω SST. Στο μοντέλο k-ω SST δημιουργούνται δύο κλειστές ανακυκλοφορίες κατάντη του πέμπτου Φ/B ενώ στο k-ε RNG δημιουργείται μία. Επίσης, οι ανακυκλοφορίες που υπολογίζονται από το μοντέλο k-ω SST έχουν και εδώ μεγαλύτερες διαστάσεις και συγκεκριμένα, μεγαλύτερο μήκος από εκείνες που υπολογίζει το k-ε RNG.



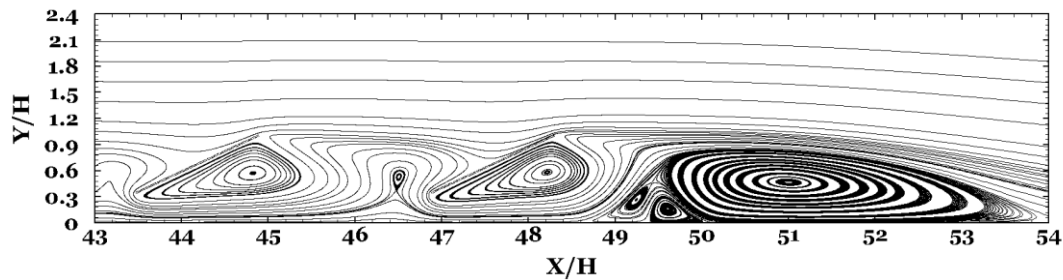
Σχήμα 5-7 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST.

Στο Σχήμα 5-7 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το έβδομο και όγδοο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST. Και στα δύο μοντέλα δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία κατάντη των Φ/B η οποία είναι προσκολλημένη στην κάτω ακμή του Φ/B . Στο μοντέλο $k-\epsilon$ RNG δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία, η οποία φαίνεται να έχει αποκολληθεί από τη γεωμετρία, ανάμεσα στα δύο Φ/B . Επίσης, παρατηρείται ότι στην κάτω πλευρά του όγδου Φ/B δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες οι οποίες αλληλεπιδρούν και συνδέονται μέσω ενός διάσελου. Στο μοντέλο $k-\omega$ SST δημιουργείται μία δίνη υπόστεγου (“shed eddy”), όπως αναφέρεται και στη μελέτη των Perry and Steiner (1987), ανάμεσα στα δύο Φ/B . Επίσης, οι ανακυκλοφορίες που δημιουργούνται στην κάτω πλευρά των Φ/B που υπολογίζονται από το μοντέλο $k-\omega$ SST έχουν και εδώ μεγαλύτερες διαστάσεις και συγκεκριμένα, μεγαλύτερο μήκος από εκείνες που υπολογίζει το $k-\epsilon$ RNG.

α)



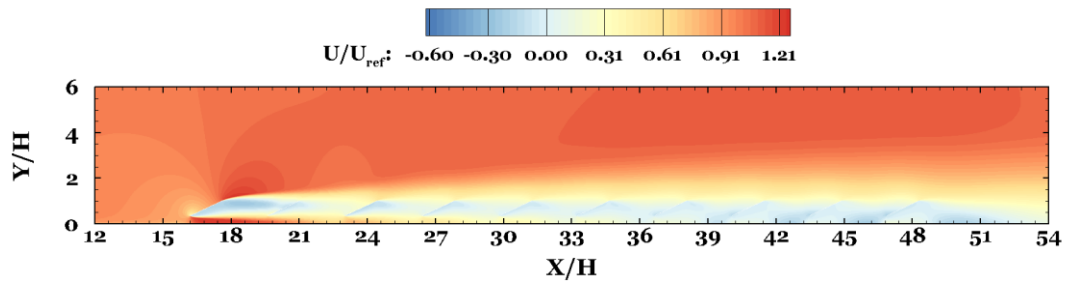
β)



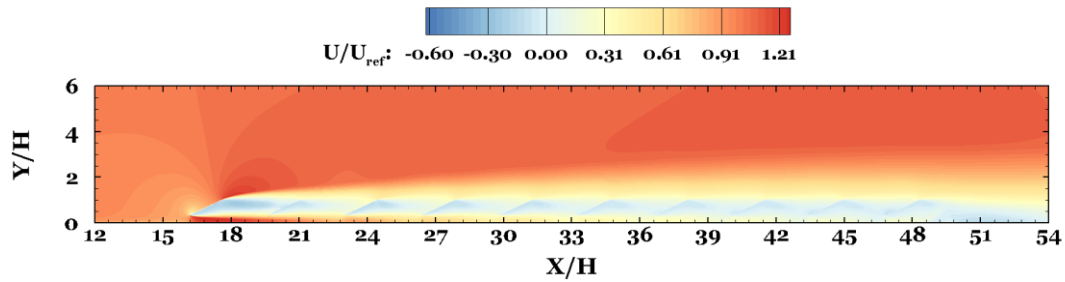
Σχήμα 5-8 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β) k-ω SST.

Στο Σχήμα 5-8 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το ένατο και δέκατο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) k-ε RNG και β) k-ω SST. Στο μοντέλο k-ω SST δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία κατάντη των Φ/B η οποία είναι προσκολλημένη στην κάτω ακμή του Φ/B . Στο μοντέλο k-ε RNG δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία, η οποία φαίνεται να έχει αποκολληθεί από τη γεωμετρία, ανάμεσα στα δύο Φ/B . Επίσης, παρατηρείται ότι στην κάτω πλευρά των Φ/B δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες οι οποίες αλληλεπιδρούν και συνδέονται μέσω ενός διάσελου. Στο μοντέλο k-ω SST δημιουργείται μία αποκολλημένη δίνη (“detached eddy”)(Perry and Steiner (1987)) ανάμεσα στα δύο Φ/B . Επίσης, οι ανακυκλοφορίες που δημιουργούνται στην κάτω πλευρά των Φ/B που υπολογίζονται από το μοντέλο k-ω SST έχουν και εδώ μεγαλύτερες διαστάσεις και συγκεκριμένα, μεγαλύτερο μήκος από εκείνες που υπολογίζει το k-ε RNG. Κατάντη της συστοιχίας δημιουργείται μία μεγάλη κλειστή ανακυκλοφορία και στα δύο μοντέλα. Στο μοντέλο k-ω SST δημιουργούνται δύο επιπλέον μικρότερες δίνες. Η ανακυκλοφορία που υπολογίζεται από το μοντέλο k-ω SST φαίνεται να έχει μικρότερο ύψος ($0.9H$) από αυτή που υπολογίζει το μοντέλο k-ε RNG ($1H$), ενώ το μήκος της είναι περίπου $4.2H$, ενώ αυτό που υπολογίζει το k-ε RNG έχει μήκος $4.1H$.

α)



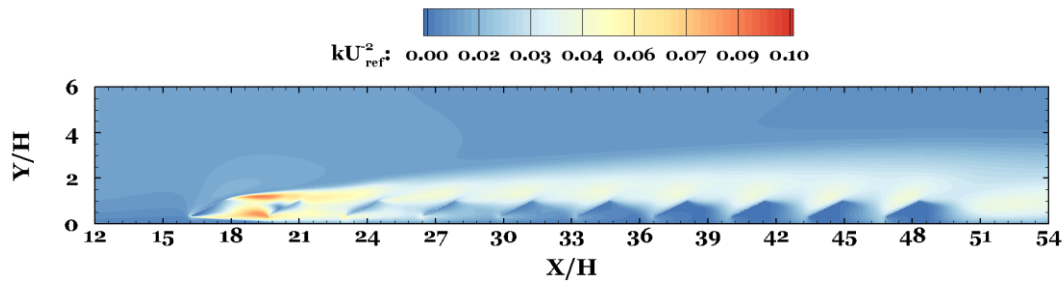
β)



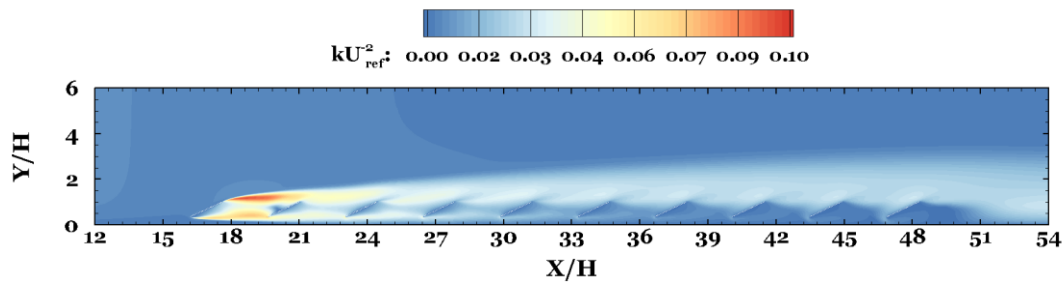
Σχήμα 5-9 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β) k-ω SST.

Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής και γίνεται σύγκριση των πεδίων ροής που υπολογίστηκαν από τα δύο μοντέλα τύρβης. Η αδιαστατοποίηση έγινε μέσω της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος. Όπως αναμένεται, το σημείο ανακοπής της ροής βρίσκεται κοντά στην ακμή προσβολής του πρώτου Φ/Β. Στην περίπτωση της ροής ανέμου με νότια διεύθυνση, η ακμή προσβολής βρίσκεται κοντά στο έδαφος. Το γεγονός αυτό προκαλεί επιτάχυνση της ροής τοπικά και επηρεάζει ταυτόχρονα την ανάπτυξη της ανακυκλοφορίας κατάντη του Φ/Β. Επίσης, παρατηρείται ότι τα Φ/Β της συστοιχίας βρίσκονται εντός του απορροεύματος του πρώτου Φ/Β.

α)

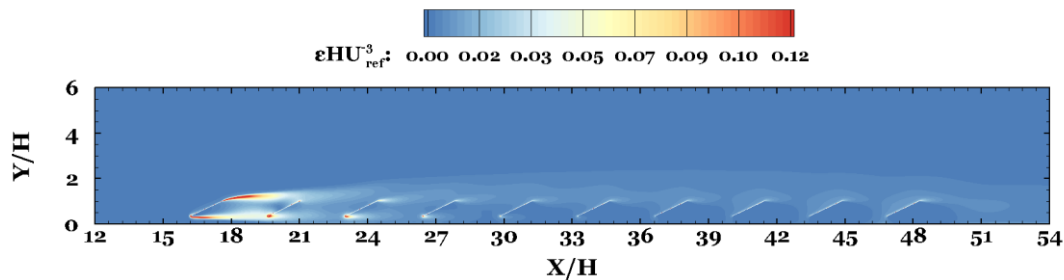


β)

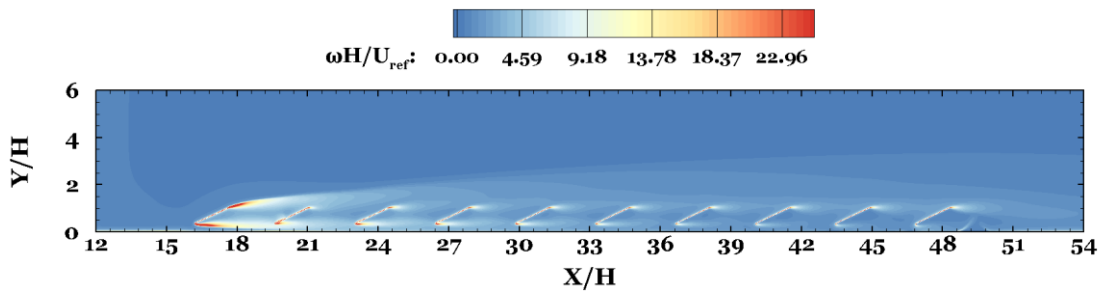


Σχήμα 5-10 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β) k-ω SST.

Στο Σχήμα 5-10 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας που υπολογίστηκαν από τα δύο μοντέλα τύρβης. Παρατηρείται ότι το μοντέλο k-ω SST υπολογίζει μεγαλύτερες τιμές τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο απόρρευμα του πρώτου Φ/Β από τη μεριά της ακμής εκφυγής, σε σχέση με το μοντέλο k-ε RNG. Αντίθετα, το μοντέλο k-ε RNG υπολογίζει μεγαλύτερες τιμές κοντά στην κάτω ακμή του δεύτερου Φ/Β και στο σύνολο του απορρεύματος.



Σχήμα 5-11 Ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.

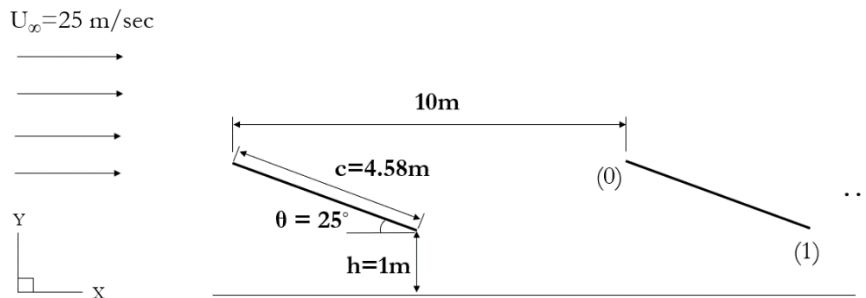


Σχήμα 5-12 Ισοϋφές γράφημα της αδιάστατης ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου.

Στο Σχήμα 5-11 και Σχήμα 5-12 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ϵ , και της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ω . Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των μεγεθών υπολογίζονται κοντά στις ακμές των Φ/B .

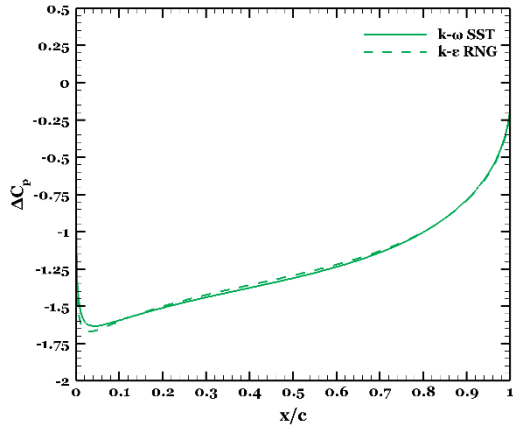
5.2 Περίπτωση Μελέτης Ροής Ανέμου με Βόρεια Διεύθυνση

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης των μοντέλων τύρβης $k-\omega$ SST & $k-\epsilon$ RNG για την περίπτωση μελέτης ροής ανέμου με βόρεια διεύθυνση.

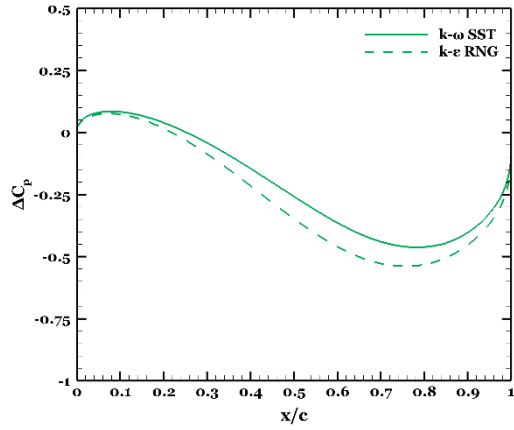


Σχήμα 5-13 Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συστοιχίας Φ/B για περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.

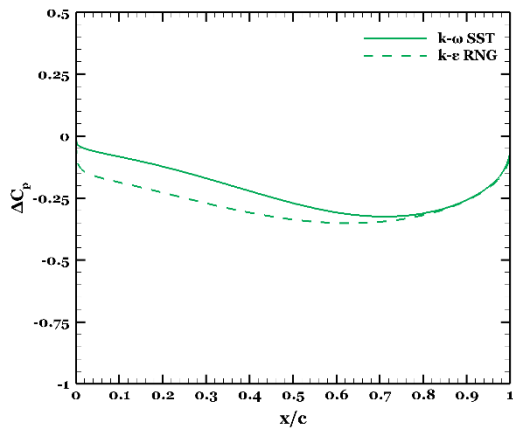
Φ/B vo.1



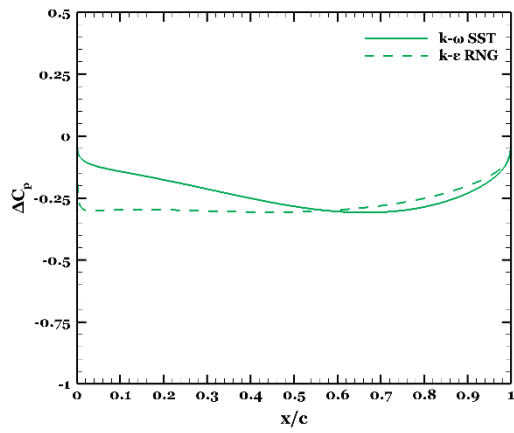
Φ/B vo.2



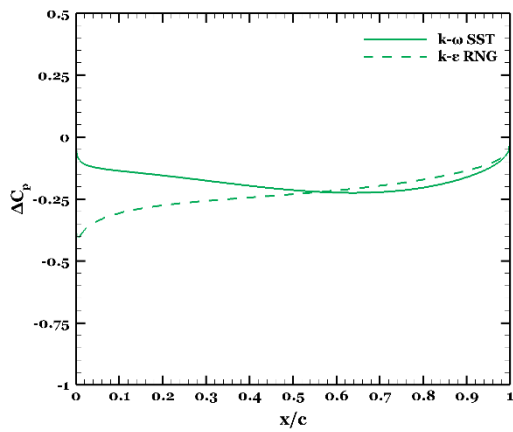
Φ/B vo.3



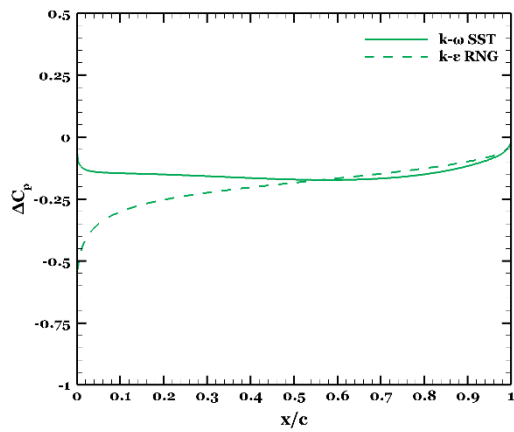
Φ/B vo.4



Φ/B vo.5



Φ/B vo.6

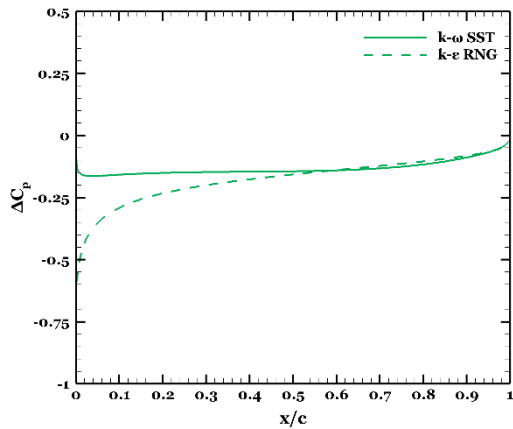


Φ/B vo.7

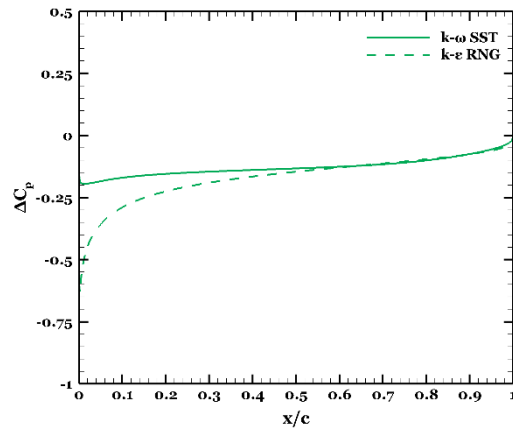


Φ/B vo.8

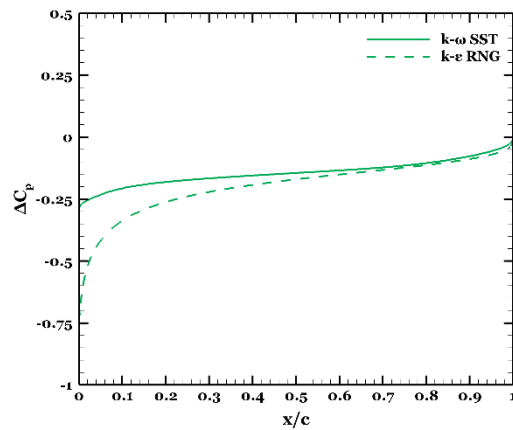
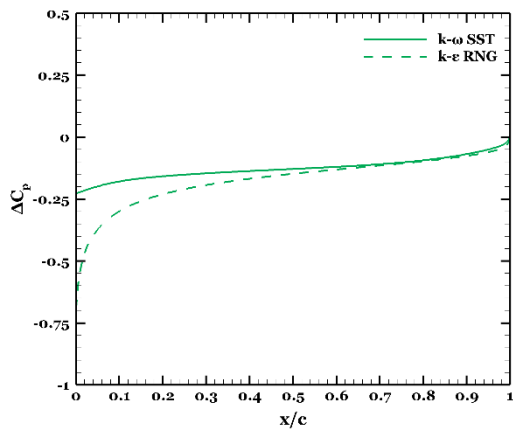




Φ/B no.9



Φ/B no.10



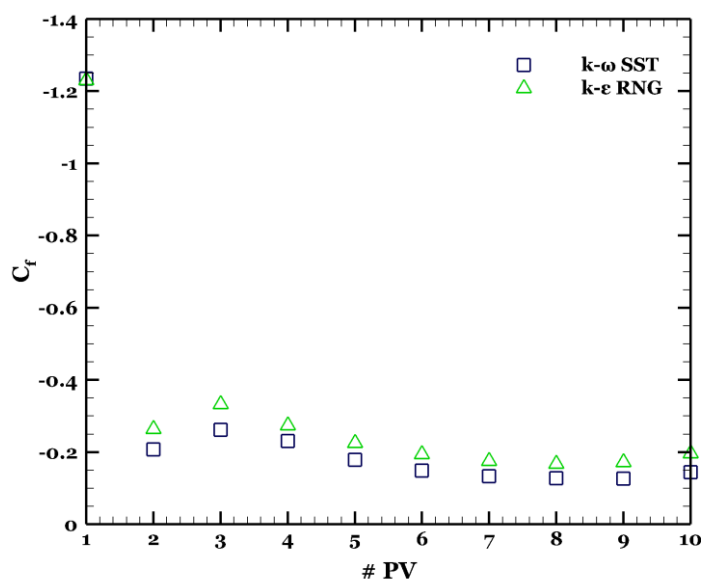
Σχήμα 5-14 Σύγκριση των μοντέλων τύρβης k- ω SST & k- ϵ RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B , ΔC_p , – Περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.

Στο Σχήμα 5-14 παρουσιάζονται οι καμπύλες της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω πλευράς των Φ/B της συστοιχίας και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων τύρβης k- ω SST & k- ϵ RNG. Παρατηρείται ότι για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας φαίνεται να υπάρχει συμφωνία των δύο μοντέλων στον υπολογισμό του ΔC_p . Για το δεύτερο Φ/B παρατηρείται, επίσης μικρή διαφορά στην εκτίμηση. Για τα υπόλοιπα Φ/B της συστοιχίας παρατηρείται σημαντική διαφορά στον υπολογισμό του ΔC_p στο σημείο της ακμής προσβολής των Φ/B , όπου παρουσιάζει μέγιστο και στη συνέχεια φθίνει έως το κέντρο του Φ/B .

Πίνακας 6 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για τα δύο μοντέλα τύρβης, – Περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.

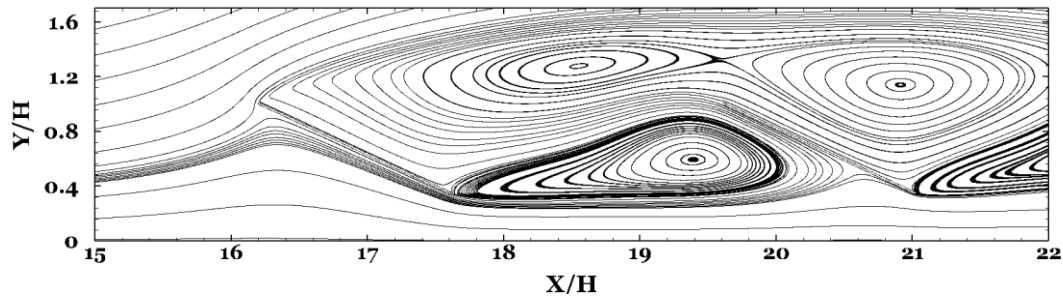
		C_f									
Μοντέλο Τύρβης	$k-\omega$ SST	-1.23	-0.21	-0.26	-0.23	-0.18	-0.15	-0.13	-0.13	-0.13	-0.14
	$k-\epsilon$ RNG	-1.23	-0.26	-0.33	-0.27	-0.23	-0.19	-0.17	-0.17	-0.17	-0.20
Φ/B	νο.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Ο Πίνακας 6 περιέχει τις τιμές του συντελεστή δύναμης C_f , που υπολογίστηκαν μέσω της σχέσης (4-5) για το κάθε Φ/B και για τα δύο μοντέλα τύρβης που εξετάζονται. Επίσης, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 5-4. Όπως είναι αναμενόμενο το πρώτο Φ/B δέχεται τα μεγαλύτερα, σε μέτρο, φορτία ανέμου. Αντίθετα με τα αποτελέσματα του προηγούμενου υποκεφαλαίου, το δεύτερο δεν δέχεται τη μικρότερη σε μέτρο δύναμη σε σχέση με τα υπόλοιπα Φ/B , οπότε συμπεραίνεται ότι στην περίπτωση με βόρεια διεύθυνση ανέμου η προστατευτική επίδραση του πρώτου Φ/B έχει μικρότερη επιρροή. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής δύναμης από το δεύτερο Φ/B και έπειτα παρουσιάζει σταδιακή μείωση κατά μέτρο με εξαίρεση το τελευταίο Φ/B στο οποίο παρατηρείται μικρή αύξηση του συντελεστή σε σχέση με το προηγούμενο Φ/B της συστοιχίας.

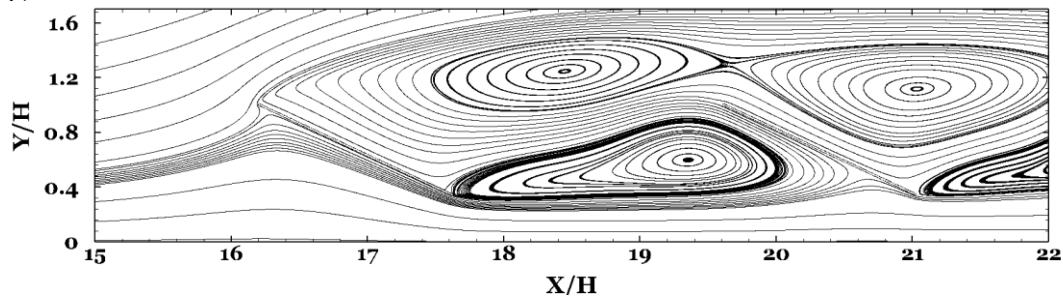


Σχήμα 5-15 Συγκριτικό διάγραμμα των μοντέλων τύρβης $k-\omega$ SST & $k-\epsilon$ RNG μέσω της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/B , ΔC_f , – Περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.

α)

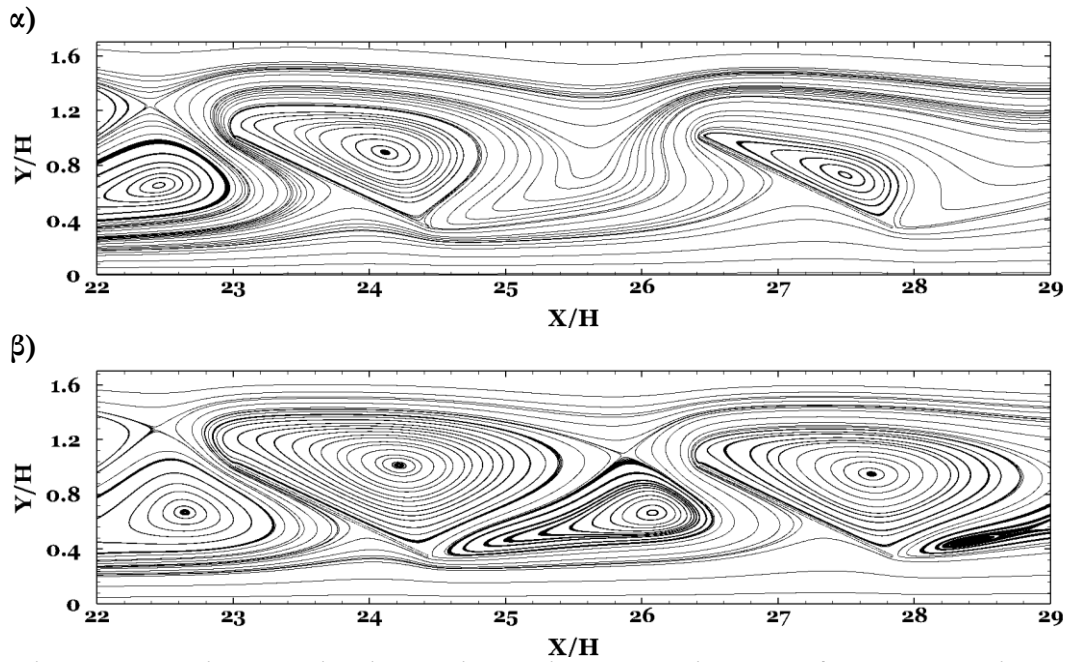


β)



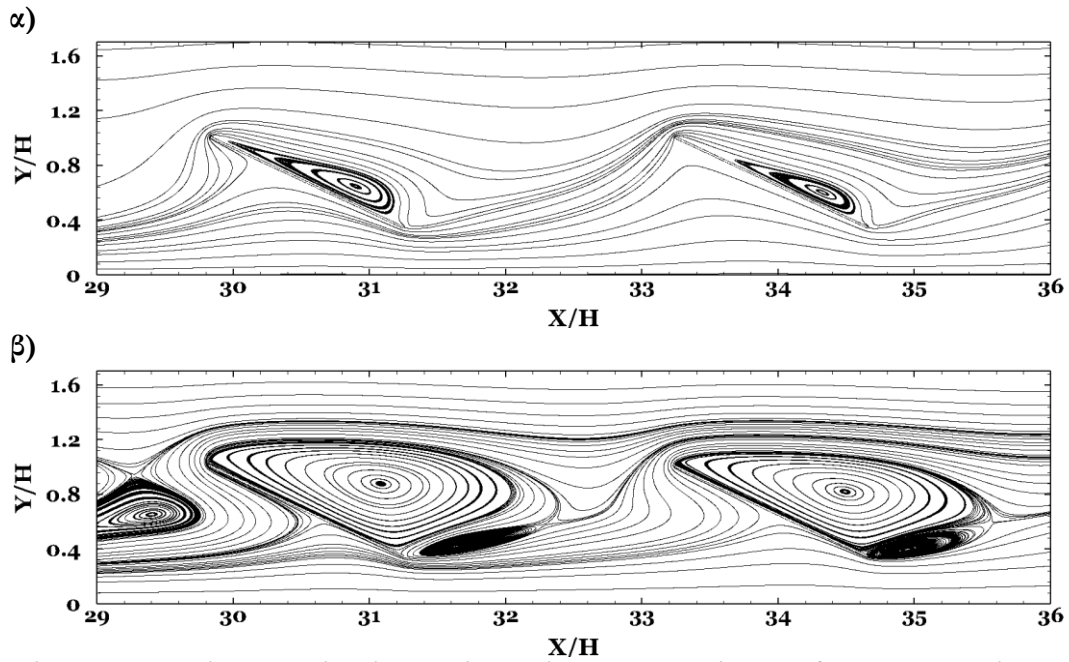
Σχήμα 5-16 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k- ϵ RNG και β) k- ω SST.

Στο Σχήμα 5-16 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πρώτο και δεύτερο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) k- ϵ RNG και β) k- ω SST. Όπως φαίνεται δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες κατάντη του πρώτου Φ/B . Η ανακυκλοφορία που έχει δημιουργηθεί λόγω της απόσπασης δινών από την ακμή προσβολής αλληλεπιδρά με την ανακυκλοφορία που δημιουργείται στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B η οποία φαίνεται να έχει αποκολληθεί από την επιφάνειά του. Η δεύτερη ανακυκλοφορία που δημιουργείται από την ακμή εκφυγής του πρώτου Φ/B έχει μήκος περίπου ίσο με την απόσταση, $L/H=3.4$, μεταξύ των Φ/B . Επίσης, παρατηρείται ότι τα δύο μοντέλα τύρβης έχουν αποτυπώσει με παρόμοιο τρόπο τις ροϊκές γραμμές.



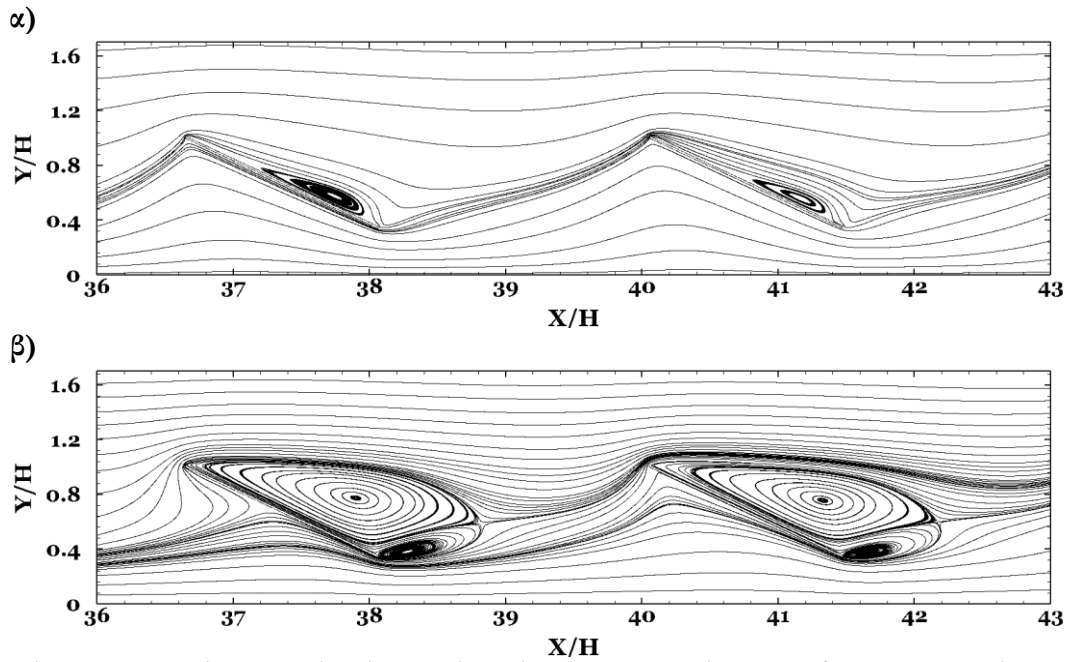
Σχήμα 5-17 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β) k- ω SST.

Στο Σχήμα 5-17 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το τρίτο και τέταρτο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) k-ε RNG και β) k- ω SST. Όπως φαίνεται δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες κατάντη του τρίτου και τέταρτου Φ/B για την περίπτωση του μοντέλου k- ω SST, ενώ στο μοντέλο k-ε RNG δημιουργείται μία.



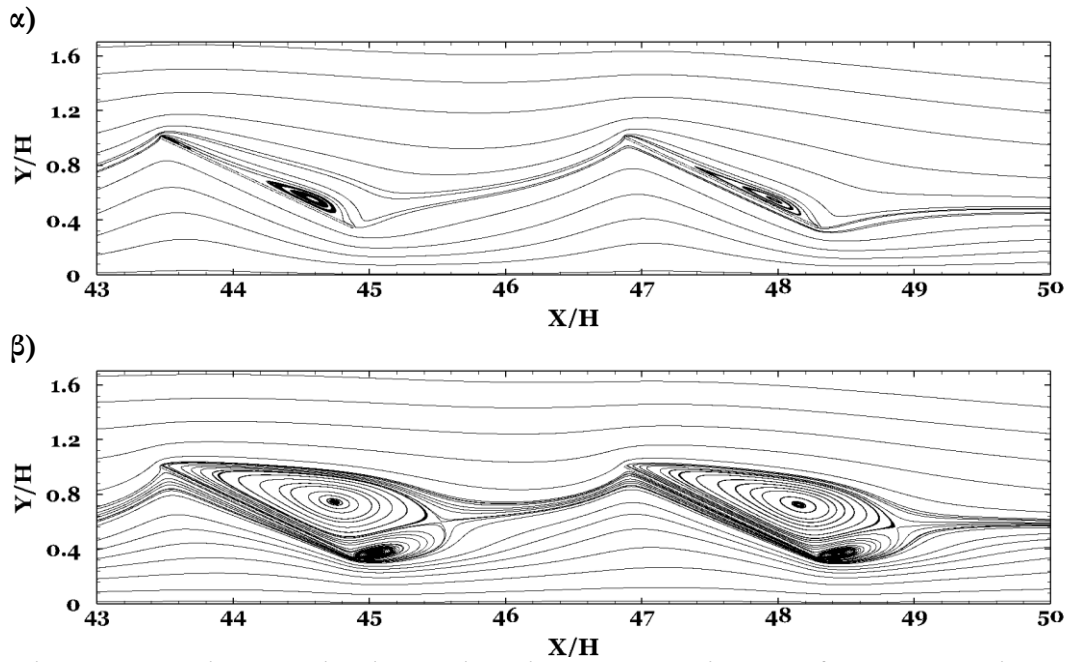
Σχήμα 5-18 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και έκτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST.

Στο Σχήμα 5-18 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πέμπτο και έκτο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST. Ομοίως με το προηγούμενο σχήμα φαίνεται να δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες κατάντη των Φ/B για την περίπτωση του μοντέλου $k-\omega$ SST, ενώ στο μοντέλο $k-\epsilon$ RNG δημιουργείται μία.



Σχήμα 5-19 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST.

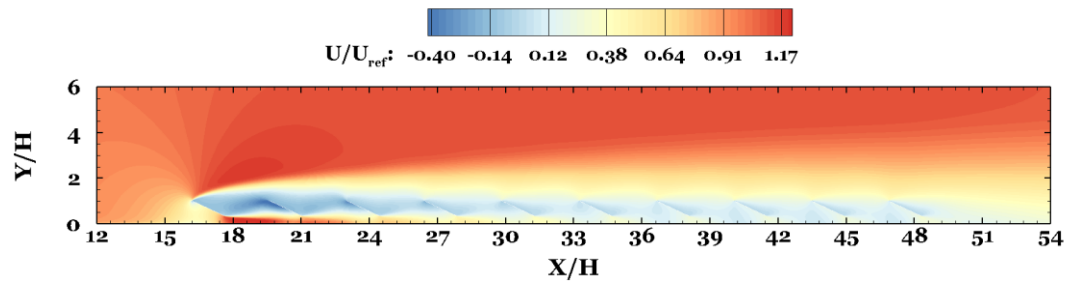
Στο Σχήμα 5-19 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το έβδομο και όγδοο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) $k-\epsilon$ RNG και β) $k-\omega$ SST. Ομοίως με το προηγούμενο σχήμα φαίνεται να δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες κατάντη των Φ/B για την περίπτωση του μοντέλου $k-\omega$ SST, ενώ στο μοντέλο $k-\epsilon$ RNG δημιουργείται μία, η οποία πλέον έχει συρρικνωθεί και βρίσκεται κοντά στην ακμή εκφυγής του Φ/B . Σημειώνεται ότι οι ανακυκλοφορίες και για τα δύο μοντέλα μειώνονται σε μέγεθος όσο η απόσταση αυξάνεται.



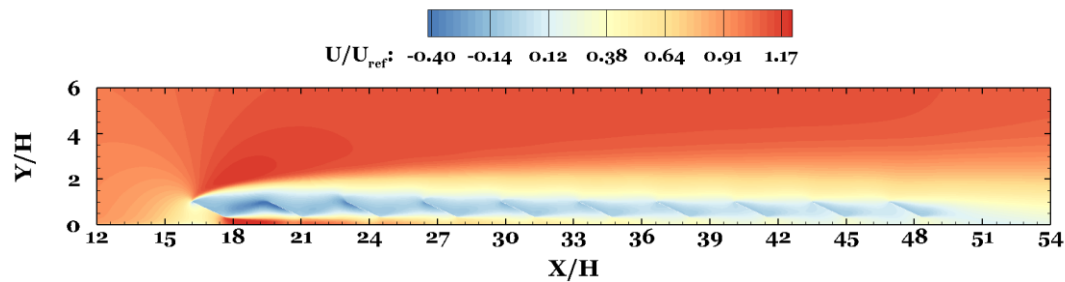
Σχήμα 5-20 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k- ω SST.

Στο Σχήμα 5-20 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το ένατο και δέκατο Φ/B της συστοιχίας οι οποίες προέκυψαν από το μοντέλο α) k-ε RNG και β) k- ω SST. Ομοίως με το προηγούμενο σχήμα φαίνεται να δημιουργούνται δύο ανακυκλοφορίες κατάντη των Φ/B για την περίπτωση του μοντέλου k- ω SST, ενώ στο μοντέλο k-ε RNG δημιουργείται μία, η οποία πλέον έχει συρρικνωθεί και βρίσκεται κοντά στην αιχμή εκφυγής του Φ/B .

a)



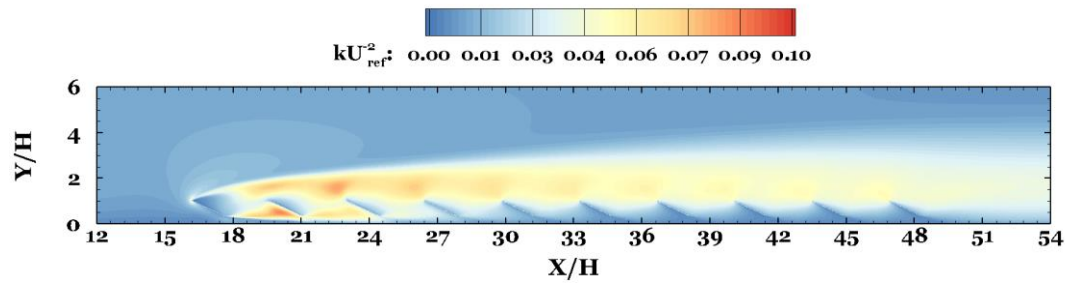
β)



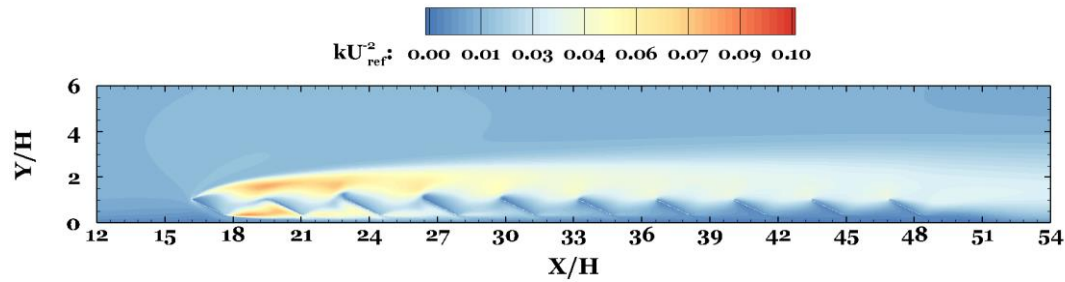
Σχήμα 5-21 Ισοϕή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β)k-ω SST.

Στο Σχήμα 5-21 παρουσιάζονται τα ισοϕή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής και γίνεται σύγκριση των πεδίων ροής που υπολογίστηκαν από τα δύο μοντέλα τύρβης. Η αδιαστατοποίηση έγινε μέσω της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος. Όπως αναμένεται, το σημείο ανακοπής της ροής βρίσκεται κοντά στην ακμή προσβολής του πρώτου Φ/Β. Στην περίπτωση της ροής ανέμου με βόρεια διεύθυνση, η ακμή προσβολής βρίσκεται στην άνω πλευρά του Φ/Β μακριά από το έδαφος. Το γεγονός αυτό προκαλεί επιτάχυνση της ροής στην κάτω πλευρά του Φ/Β το οποίο λειτουργεί ως ακροφύσιο και επηρεάζει ταυτόχρονα την ανάπτυξη της ανακυκλοφορίας κατάντη του Φ/Β. Επίσης, παρατηρείται ότι τα Φ/Β της συστοιχίας βρίσκονται εντός του απορρεύματος του πρώτου Φ/Β. Τέλος, παρατηρούνται μεγαλύτερες, κατά μέτρο ταχύτητες ανέμου στην άνω πλευρά των Φ/Β, από το τρίτο της συστοιχίας και έπειτα, όσον αφορά στο μοντέλο τύρβης k-ε RNG.

α)

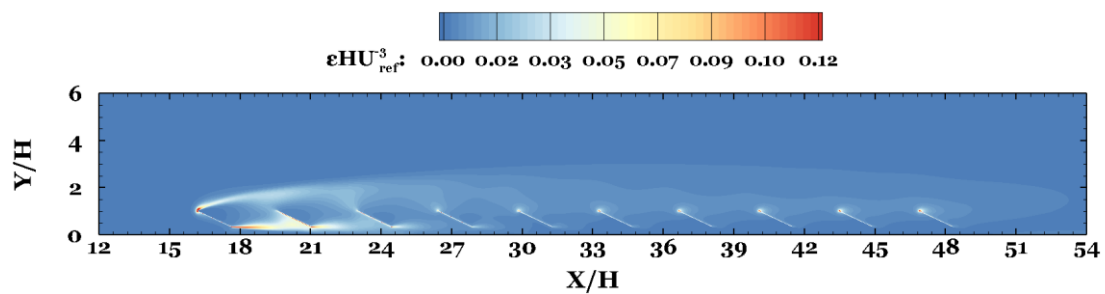


β)

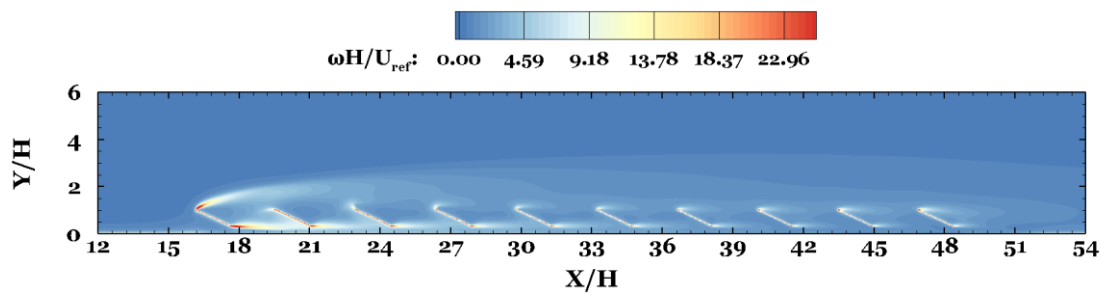


Σχήμα 5-22 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου. Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων τύρβης α) k-ε RNG και β) k-ω SST.

Στο Σχήμα 5-22 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας που υπολογίστηκαν από τα δύο μοντέλα τύρβης. Παρατηρείται ότι το μοντέλο k-ω SST υπολογίζει μεγαλύτερες τιμές τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο απόρρευμα του πρώτου Φ/Β από τη μεριά της ακμής προσβολής και συγκεκριμένα πάνω από το δεύτερο Φ/Β, σε σχέση με το μοντέλο k-ε RNG. Αντίθετα, το μοντέλο k-ε RNG υπολογίζει μεγαλύτερες τιμές κοντά στην κάτω ακμή του δεύτερου Φ/Β και στο σύνολο του απορρέυματος. Αυτό θα μπορούσε να αποτελεί μία εξήγηση για τη μείωση του μεγέθους της ανακυκλοφορίας και δυνητικά της επανακόλλησης μέρους της ροής στην επιφάνεια του Φ/Β.



Σχήμα 5-23 Ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.

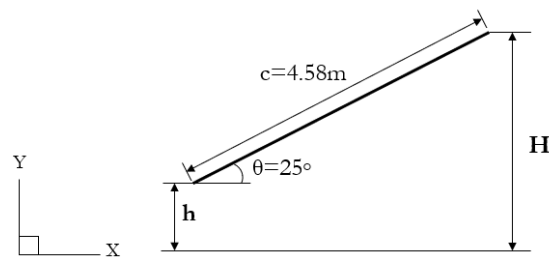


Σχήμα 5-24 Ισοϋψές γράφημα της αδιάστατης ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με βόρεια διεύθυνση ανέμου.

Στο Σχήμα 5-23 και Σχήμα 5-24 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ϵ , και της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ω . Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των μεγεθών υπολογίζονται κοντά στις αιμές των Φ/B .

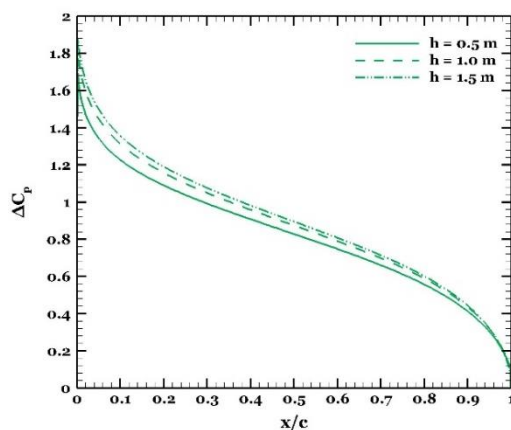
6 Παραμετρική Μελέτη της Απόστασης των Φ/B από το έδαφος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης του ύψους, h , των Φ/B από το έδαφος, όσον αφορά στη περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Συγκεκριμένα, έγινε σύγκριση της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης, ΔC_p , του άνω και του κάτω τμήματος του Φ/B για τρία ύψη από το έδαφος, h ($h=0.5\text{m}=0.17H$, $h=1\text{m}=0.34H$ και $h=1.5\text{m}=0.51H$). Επίσης, υπολογίσθηκε και ο συντελεστής δύναμης για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος και παρουσιάζονται γραφήματα τα οποία απεικονίζουν τις ροϊκές γραμμές γύρω από τη συστοιχία και τα πεδία της αδιάστατης ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του μοντέλου τύρβης $k-\epsilon$ RNG.



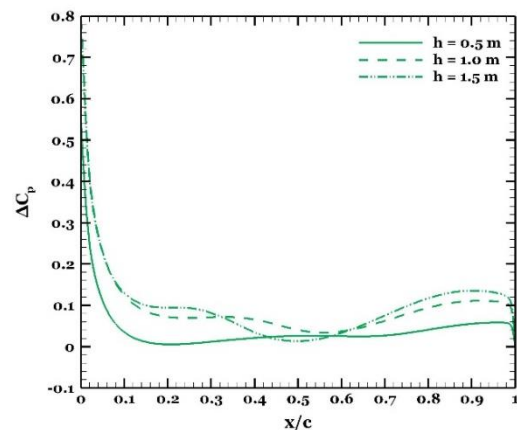
Σχήμα 6-1 Σχηματική απεικόνιση ενός Φ/B πλαισίων της συστοιχίας. – γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αφορούν την παραμετρική μελέτη του ύψους των Φ/B από το έδαφος.

Φ/B νο.1

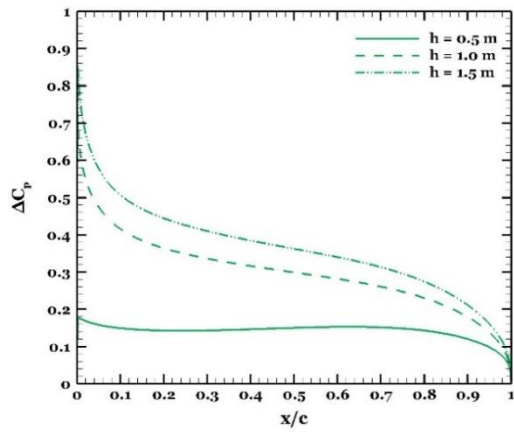


Φ/B νο.3

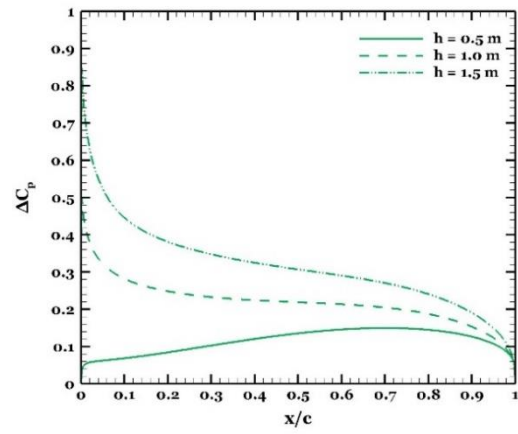
Φ/B νο.2



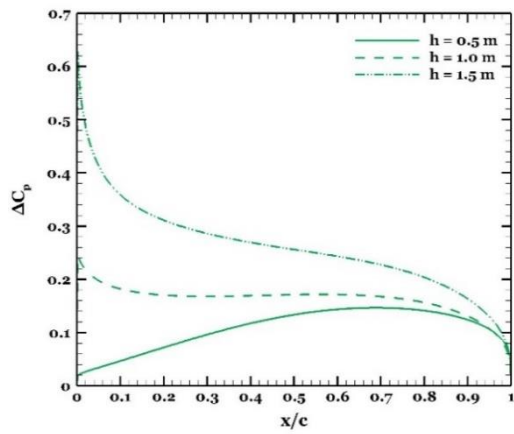
Φ/B νο.4



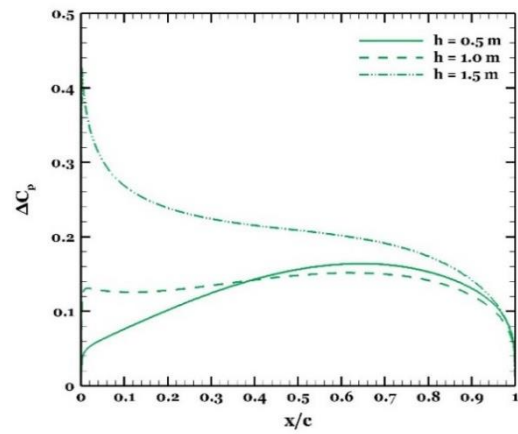
Φ/B v0.5



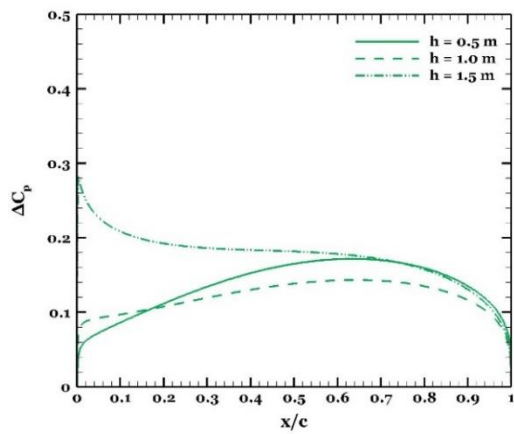
Φ/B v0.6



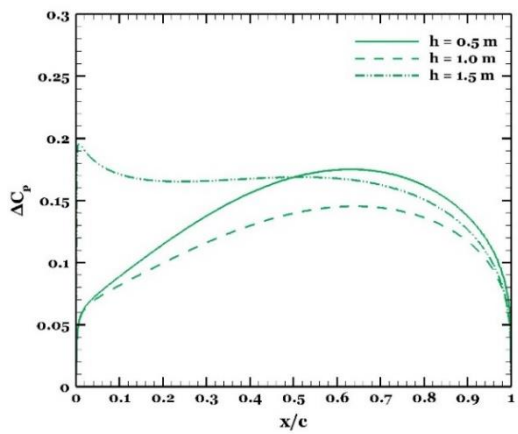
Φ/B v0.7



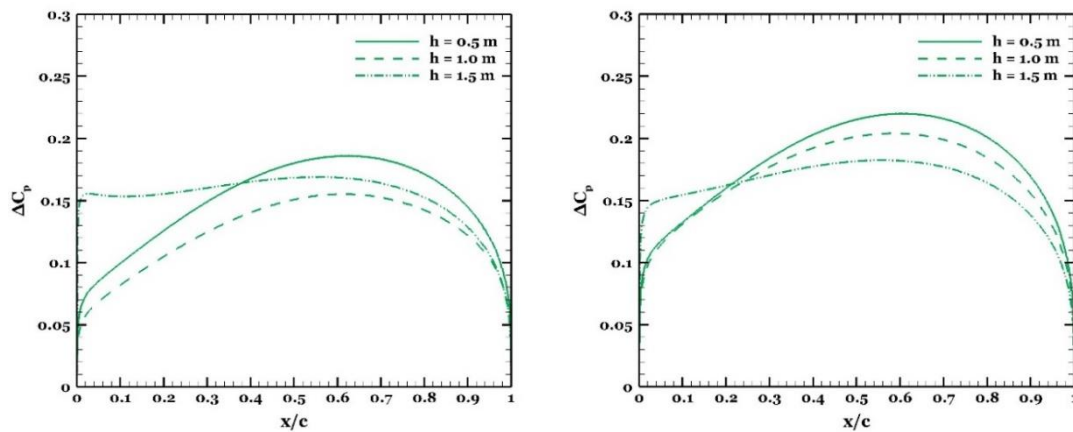
Φ/B v0.8



Φ/B v0.9



Φ/B v0.10



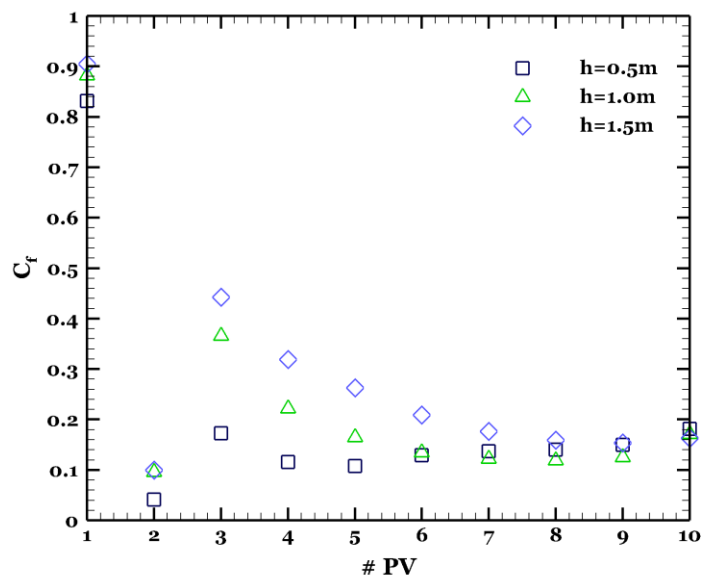
Σχήμα 6-2 Σύγκριση της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B , ΔC_p για τρία διαφορετικά ύψη ($h=0.5m=0.17H$, $h=1m=0.34H$ και $h=1.5m=0.51H$) των Φ/B πάνω από το έδαφος.

Στο Σχήμα 6-2 γίνεται σύγκριση του ΔC_p , για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, $h=0.5m=0.17H$, $h=1m=0.34H$ και $h=1.5m=0.51H$. Παρατηρείται ότι μέχρι το έκτο Φ/B οι τιμές που παίρνει το ΔC_p είναι κατά κύριο λόγο μεγαλύτερες για $h=1.5m$, με τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται για $h=0.5m$. Από το έκτο Φ/B της συστοιχίας και έπειτα οι τιμές του ΔC_p για $h=0.5m$ αυξάνονται έως να ξεπεράσουν κατά κύριο λόγο τις τιμές για τα άλλα δύο ύψη. Εξαιρέση αυτών αποτελεί το σημείο κοντά στην ακμή προσβολής, όπου οι τιμές του ΔC_p , για $h=1.5m$ παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή. Επίσης, παρατηρείται ότι για το τελευταίο Φ/B οι τιμές του ΔC_p για $h=1m$ ξεπερνούν τις τιμές του ΔC_p για $h=1.5m$.

Πίνακας 7 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για διαφορετικά ύψη, h , των πλασιών από το έδαφος.

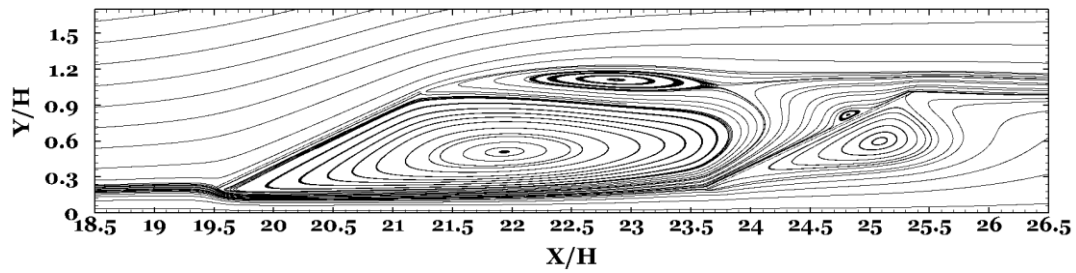
h (m)	C_f									
0.5	0.831	0.041	0.173	0.116	0.108	0.129	0.137	0.140	0.150	0.181
1.0	0.882	0.096	0.366	0.222	0.165	0.135	0.122	0.119	0.125	0.171
1.5	0.905	0.100	0.443	0.319	0.263	0.209	0.177	0.159	0.154	0.163
Φ/B (no.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Ο Πίνακας 7 περιέχει τις τιμές του συντελεστή δύναμης, C_f , για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, $h=0.5m=0.17H$, $h=1m=0.34H$ και $h=1.5m=0.51H$. Επίσης, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 6-3. Παρατηρείται ότι ως επί το πλείστον, οι τιμές του C_f είναι μεγαλύτερες για $h=1.5m$, με τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται για $h=0.5m$. Από το έκτο Φ/B της συστοιχίας και έπειτα οι τιμές του C_f για $h=0.5m$ αυξάνονται έως ότου να ξεπεράσουν κατά κύριο λόγο τις τιμές για τα άλλα δύο ύψη στο τελευταίο Φ/B . Επίσης, παρατηρείται ότι για το τελευταίο Φ/B οι τιμές του C_f για $h=1m$ ξεπερνούν τις τιμές του C_f για $h=1.5m$.

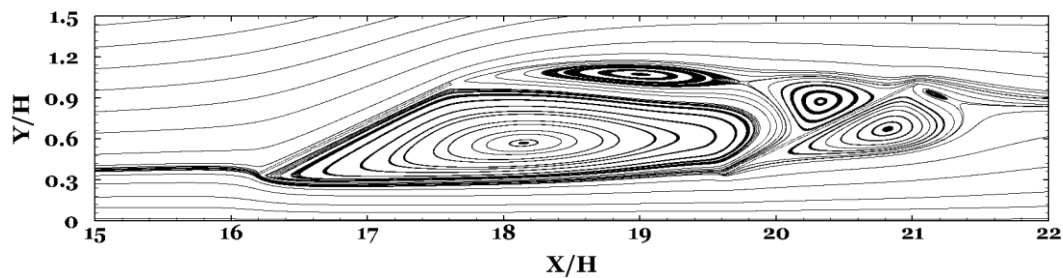


Σχήμα 6-3 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/B , ΔC_p για τρία διαφορετικά ύψη ($h=0.5m=0.17H$, $h=1m=0.34H$ και $h=1.5m=0.51H$) των Φ/B πάνω από το έδαφος.

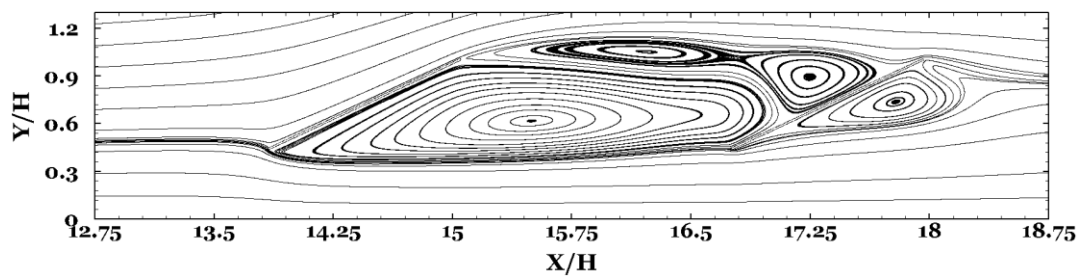
α)



β)



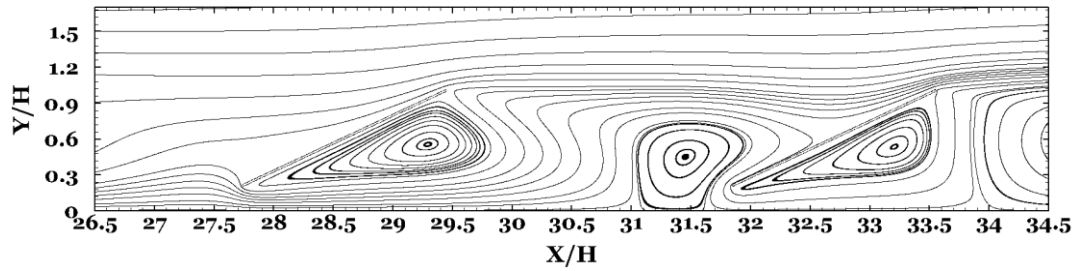
γ)



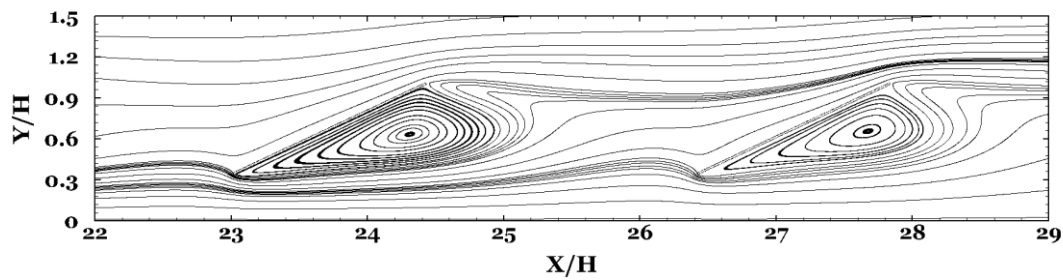
Σχήμα 6-4 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

Στο Σχήμα 6-4 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πρώτο και δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, κατόντη του πρώτου Φ/B δημιουργούνται δύο κλειστές ανακυκλοφορίες, ενώ στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B δημιουργείται μία ανακυκλοφορία. Όπως φαίνεται, το μέγεθος της ανακυκλοφορίας, που δημιουργείται στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B , αυξάνεται καθώς η απόσταση της συστοιχίας από το έδαφος αυξάνεται.

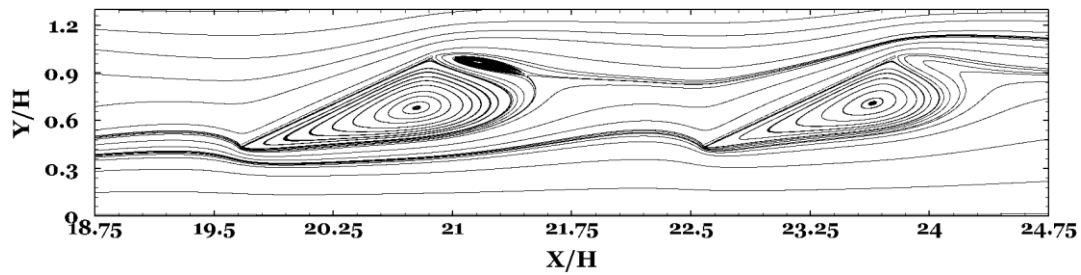
α)



β)



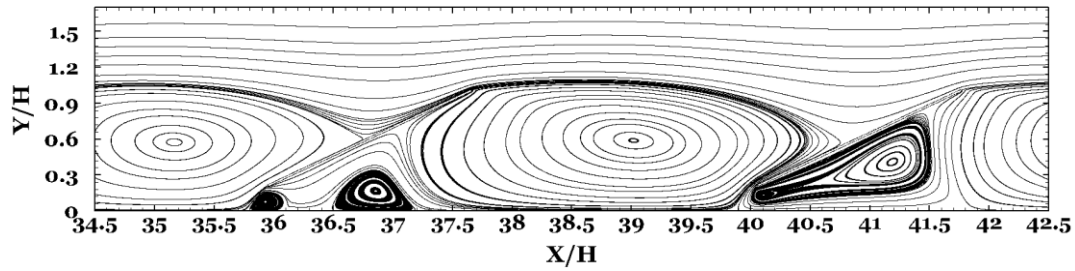
γ)



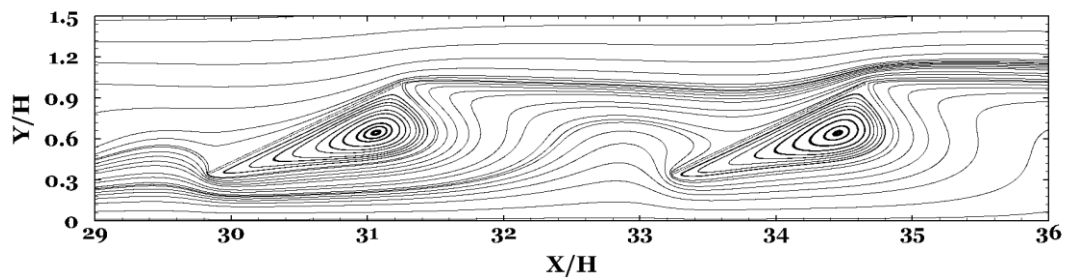
Σχήμα 6-5 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

Στο Σχήμα 6-5 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το τρίτο και τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Για $h=1.5m$ παρατηρείται ότι κατάντη του τρίτου Φ/B δημιουργούνται δύο κλειστές ανακυκλοφορίες σε αντίθεση με τις άλλες δύο αποστάσεις. Επίσης, παρατηρείται ότι για $h=0.5m$ εμφανίζεται μία αποκολλημένη δίνη ανάμεσα από τα δύο Φ/B . Κατάντη του τέταρτου Φ/B απουσιάζει ο «λοβός» (Perry and Steiner (1987)) που εμφανίζεται για τα άλλα δύο ύψη.

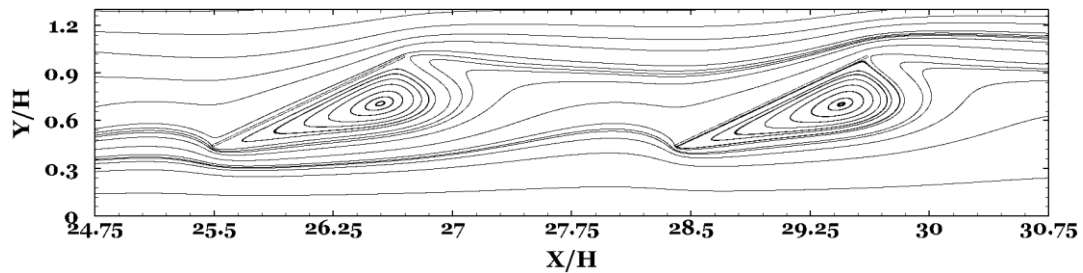
α)



β)



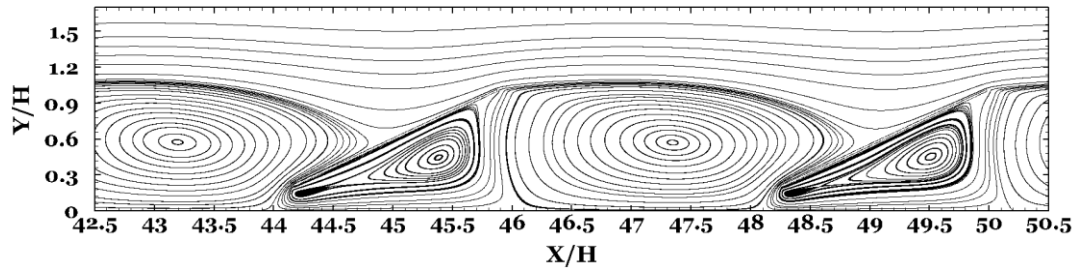
γ)



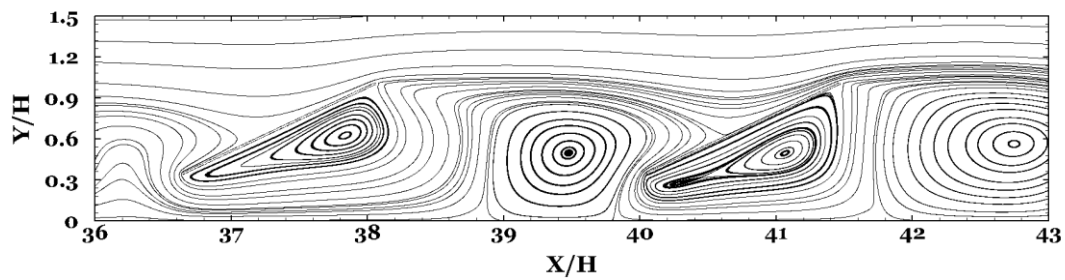
Σχήμα 6-6 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και το έκτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

Στο Σχήμα 6-6 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πέμπτο και έκτο Φ/B της συστοιχίας για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Παρατηρείται ότι για $h=0.5m$ δημιουργείται μία ανακυκλοφορία μεταξύ του τέταρτου και του πέμπτου και μία μεταξύ του πέμπτου και του έκτου Φ/B , σε αντίθεση με τις άλλες δύο περιπτώσεις για $h=1m$ και $h=1.5m$ όπου δε δημιουργούνται κλειστές ανακυκλοφορίες. Το μήκος της είναι ίσο με την απόσταση μεταξύ των Φ/B και το ύψος είναι ίσο με το ύψος του Φ/B . Επίσης, παρατηρείται ότι οι δύο ανακυκλοφορίες που θα εμφανίζονταν κατάντη του τρίτου Φ/B για $h=0.5m$, έχουν αποκολληθεί και βρίσκονται κοντά στο έδαφος.

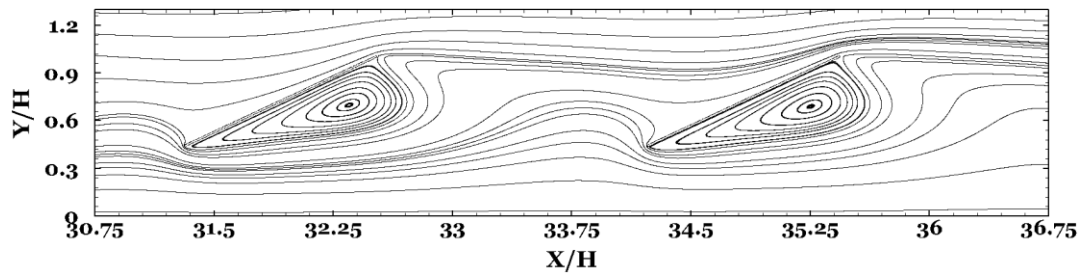
α)



β)



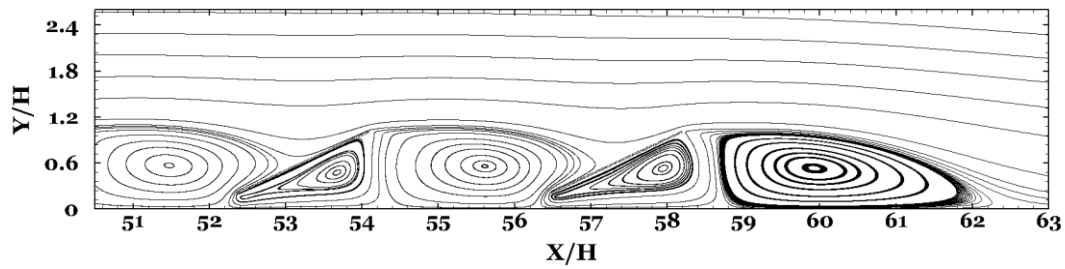
γ)



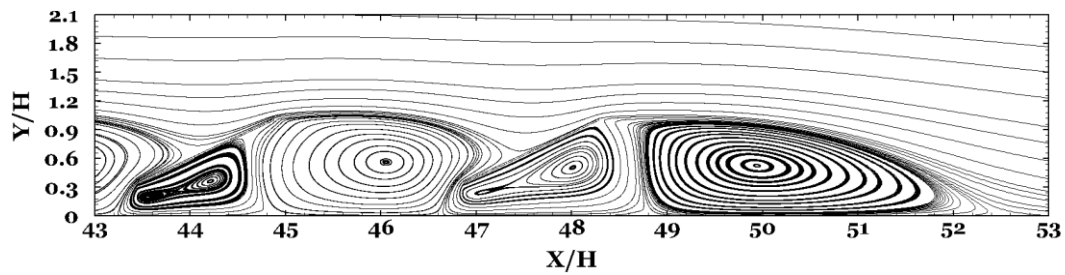
Σχήμα 6-7 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

Στο Σχήμα 6-7 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το έβδομο και όγδοο Φ/B της συστοιχίας για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Παρατηρείται ότι για $h=0.5m$ δημιουργείται μία ανακυκλοφορία μεταξύ του έκτου και του έβδομου και μία μεταξύ του έβδομου και του όγδου Φ/B , σε αντίθεση με την περίπτωση για $h=1.5m$ όπου δε δημιουργούνται κλειστές ανακυκλοφορίες ανάμεσα στα Φ/B πέρα από αυτές που είναι προσκολλημένες στις κατάντη πλευρές τους. Για $h=1m$ δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία ανάμεσα στο έβδομο και όγδοο Φ/B , όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο με μικρότερο μέγεθος, σχεδόν το μισό, από αυτό για την περίπτωση με $h=0.5m$.

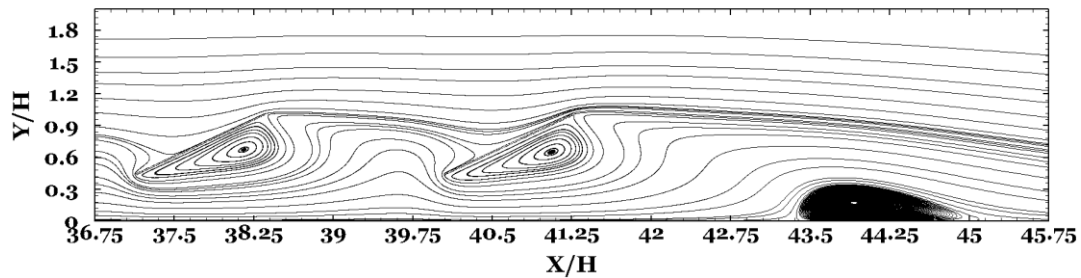
α)



β)



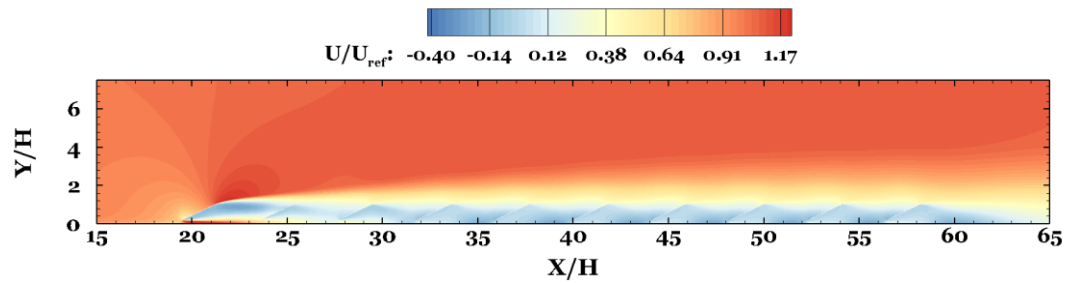
γ)



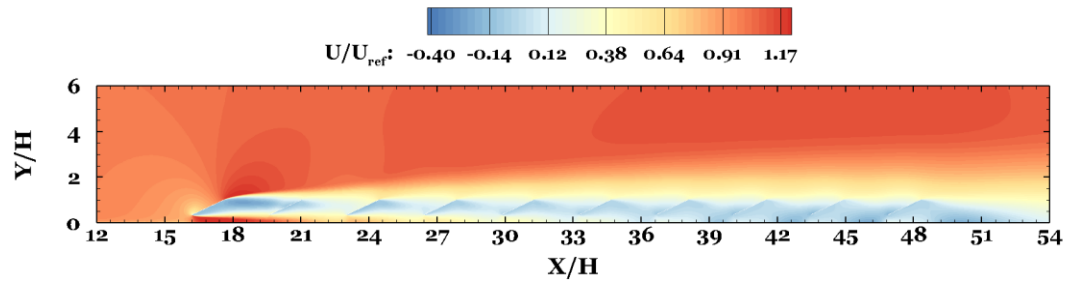
Σχήμα 6-8 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

Στο Σχήμα 6-8 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το ένατο και δέκατο Φ/B της συστοιχίας για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Παρατηρείται ότι για $h=0.5m$ και $h=1m$ δημιουργείται μία ανακυκλοφορία μεταξύ του όγδοου και του ένατου και μία μεταξύ του ένατου και του δέκατου Φ/B , σε αντίθεση με την περίπτωση για $h=1.5m$ όπου δε δημιουργούνται κλειστές ανακυκλοφορίες ανάμεσα στα Φ/B πέρα από αυτές που είναι προσκολλημένες στις κατάντη πλευρές τους, αλλά μία «δίνη υποστέγου». Στο απόρρευμα της συστοιχίας δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία και στις τρεις περιπτώσεις. Για $h=0.5m$ και $h=1m$ το μέγεθος της ανακυκλοφορίας είναι το ίδιο, δηλαδή, έχει μήκος ίσο με $3.4H$, όσο και η απόσταση μεταξύ των Φ/B και ύψος $1H$. Για $h=1.5m$ η ανακυκλοφορία αυτή έχει αρκετά μικρότερο μέγεθος. Το ύψος της είναι περίπου $0,375H$, περίπου όσο και η απόσταση του Φ/B από το έδαφος, και το μήκος της περίπου $1.5H$.

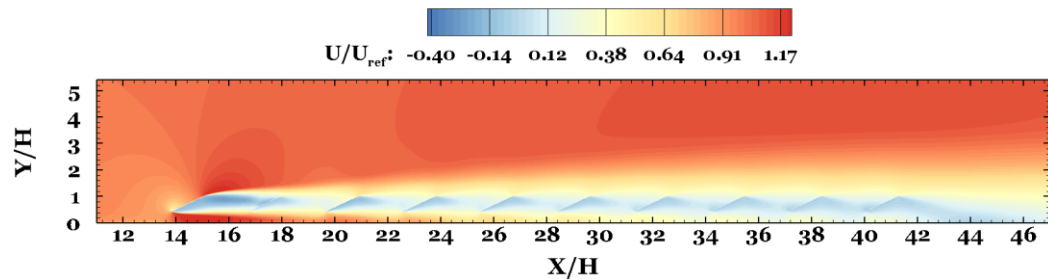
α)



β)



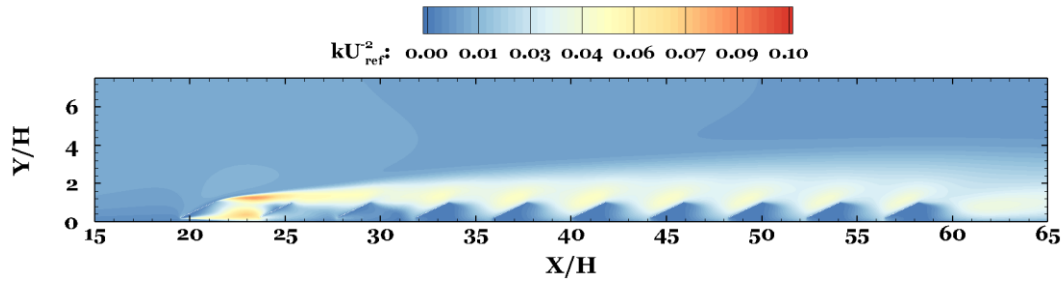
γ)



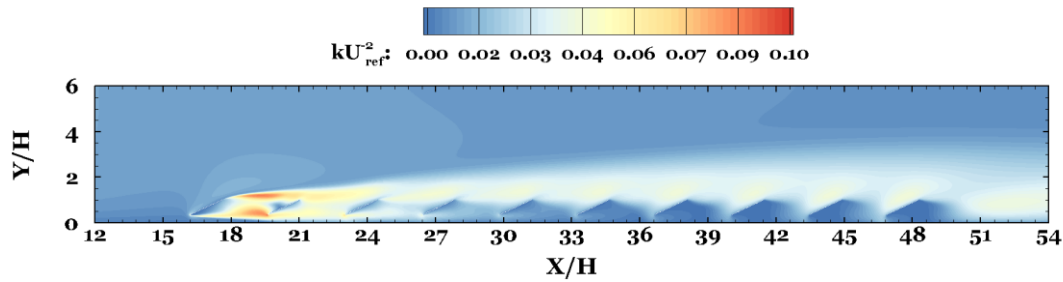
Σχήμα 6-9 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

Στο Σχήμα 6-9 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής και γίνεται σύγκριση των πεδίων ροής που υπολογίστηκαν για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Η αδιαστατοποίηση έγινε μέσω της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος. Όπως αναμένεται, το σημείο ανακοπής της ροής βρίσκεται κοντά στην ακμή προσβολής του πρώτου Φ/B . Παρατηρείται ότι καθώς το ύψος των Φ/B από το έδαφος μειώνεται, η περιοχή στην οποία η ροή επιταχύνεται λόγω της σύγκλισης των ροϊκών γραμμών κοντά στην ακμή προσβολής, μικραίνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται διαφορετικά η περιοχή ανακυκλοφορίας κατάντη των Φ/B . Τέλος, παρατηρούνται μεγαλύτερες κατά μέτρο ταχύτητες στην κάτω πλευρά των Φ/B , όσο η απόσταση από το έδαφος μειώνεται.

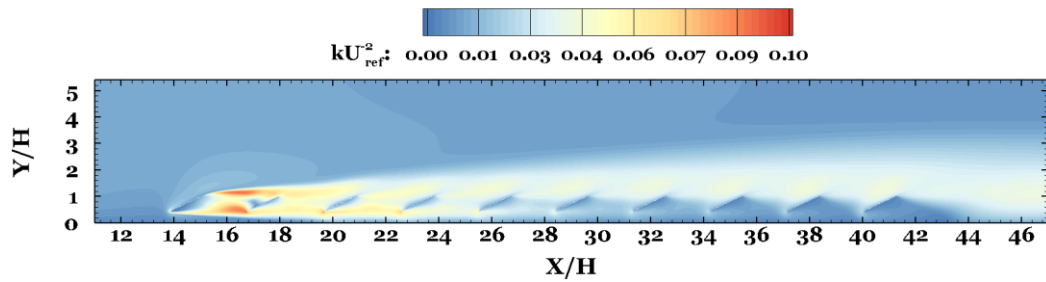
α)



β)



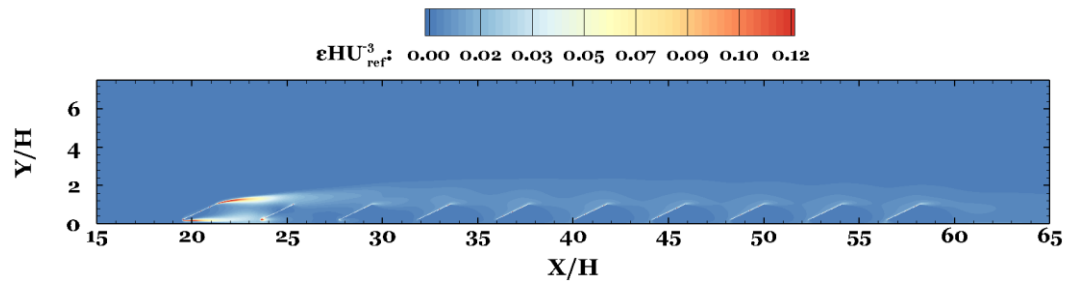
γ)



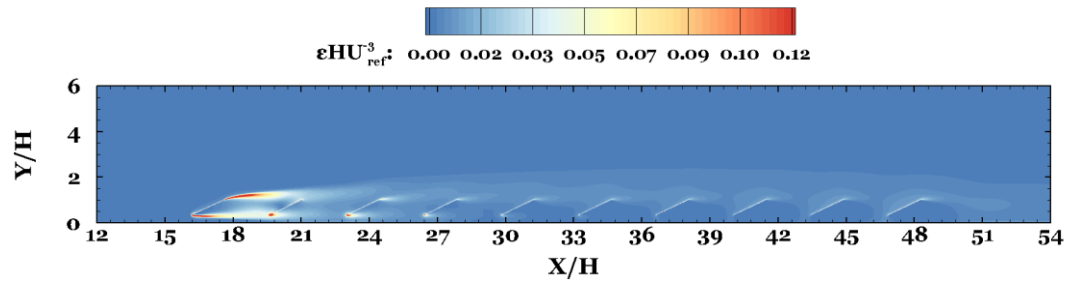
Σχήμα 6-10 Ισοϕή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

Στο Σχήμα 6-10 παρουσιάζονται τα ισοϕή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας που υπολογίστηκαν για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Παρατηρείται ότι καθώς η απόσταση από το έδαφος αυξάνεται, εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές του, k , σε όλο και μεγαλύτερη απόσταση από το πρώτο Φ/B . Επίσης, παρατηρείται ότι οι τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας κατάντη του πρώτου Φ/B , όπου παρουσιάζουν μέγιστο, είναι μεγαλύτερες για την περίπτωση με $h=1.5m$.

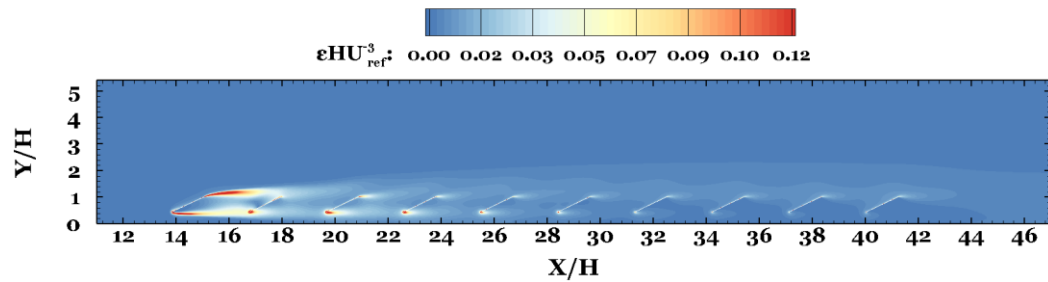
α)



β)



γ)

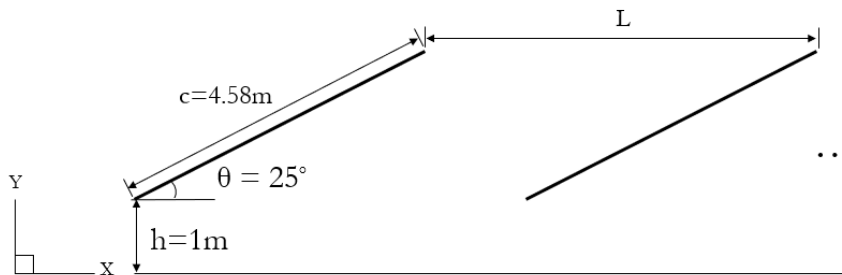


Σχήμα 6-11 Ισοϋψές γραφήμα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρία ύψη των Φ/B από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$.

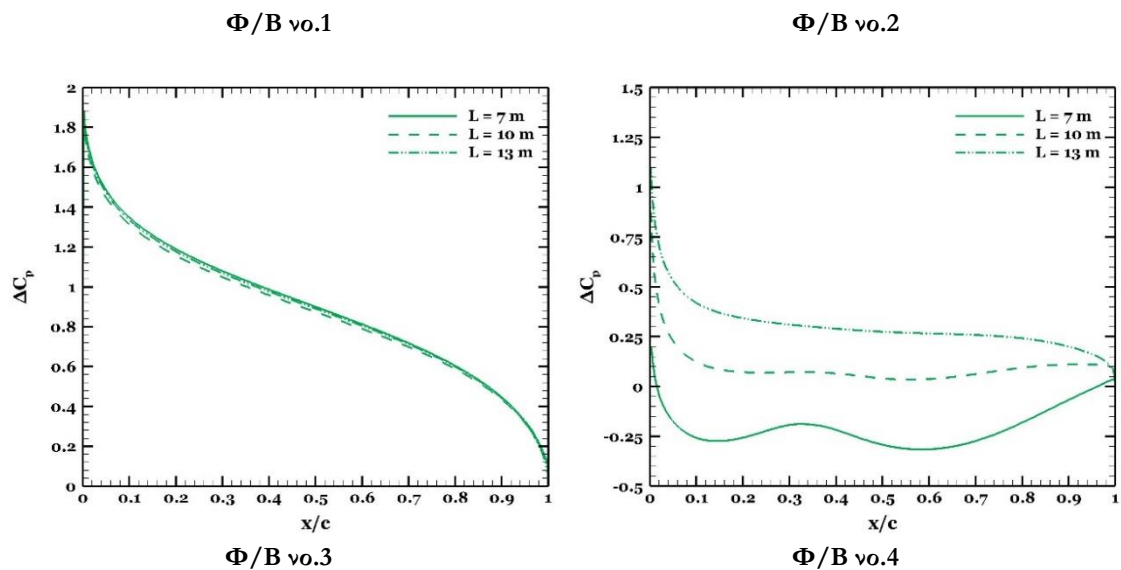
Στο Σχήμα 6-11 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που υπολογίστηκαν για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος, α) $h=0.5m$, β) $h=1m$ και γ) $h=1.5m$. Παρατηρείται ότι καθώς η απόσταση από το έδαφος αυξάνεται, εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές του, ϵ , σε όλο και μεγαλύτερη απόσταση από το πρώτο Φ/B κοντά στις ακμές τους. Επίσης, παρατηρείται ότι οι τιμές της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας κατάντη του πρώτου Φ/B , είναι μεγαλύτερες για την περίπτωση με $h=1.5m$.

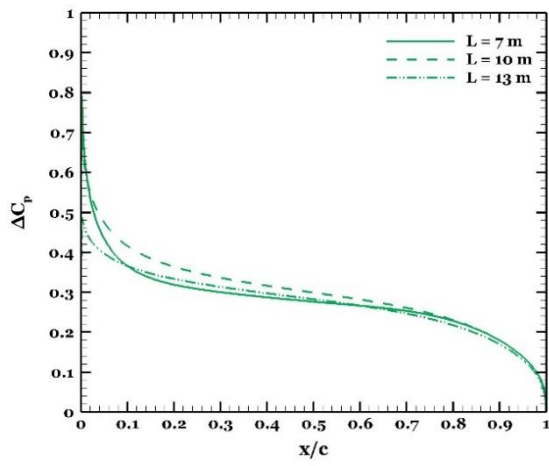
7 Παραμετρική Μελέτη της Απόστασης μεταξύ των Φ/B

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης της απόστασης μεταξύ των Φ/B , όσον αφορά στη περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Συγκεκριμένα, έγινε σύγκριση της καμπύλης της διαφοράς του C_p του άνω και του κάτω τμήματος του Φ/B για τρεις αποστάσεις μεταξύ των Φ/B . $L=7m \approx 2.4H$, $L=10m \approx 3.4H$ και $L=13m \approx 4.4H$. Επίσης, υπολογίσθηκε και ο συντελεστής δύναμης για τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος και παρουσιάζονται γραφήματα τα οποία απεικονίζουν τις ροϊκές γραμμές γύρω από τη συστοιχία και τα πεδία της αδιάστατης ταχύτητας, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, της καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της ειδικής καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του μοντέλου τύρβης k-ε RNG.

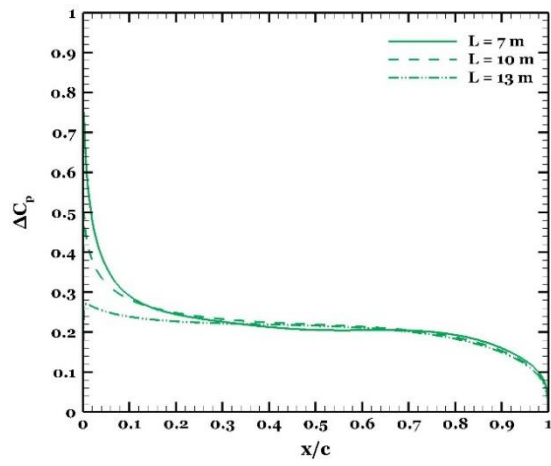


Σχήμα 7-1 Σχηματική απεικόνιση δύο Φ/B πλαισίων της συστοιχίας – γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αφορούν την παραμετρική μελέτη της απόστασης μεταξύ των Φ/B .

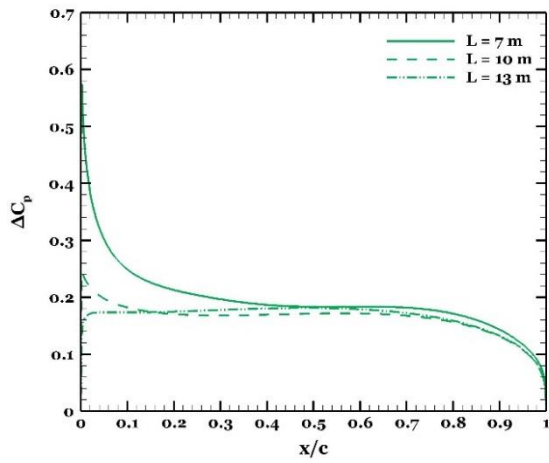




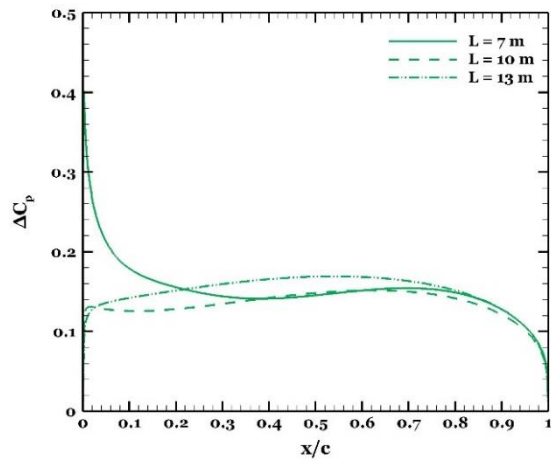
Φ/B v0.5



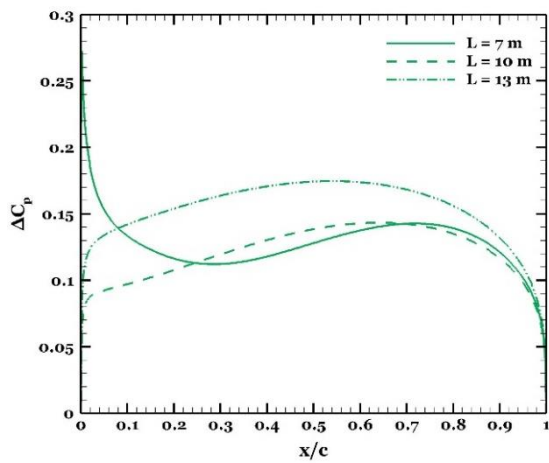
Φ/B v0.6



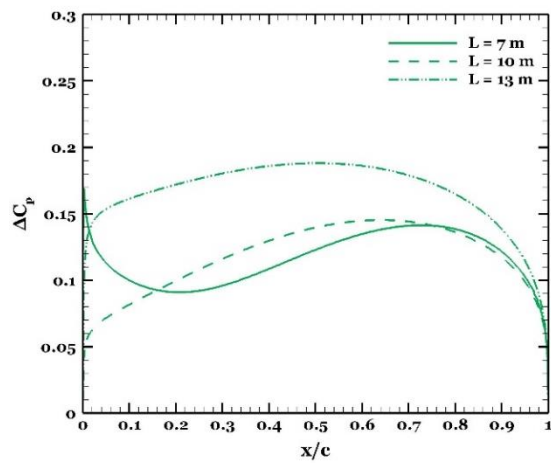
Φ/B v0.7



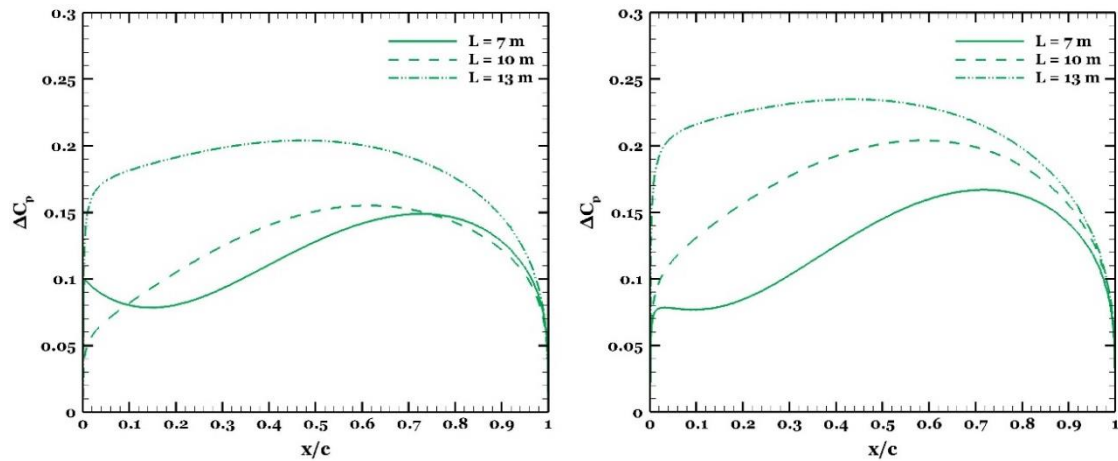
Φ/B v0.8



Φ/B v0.9



Φ/B v0.10

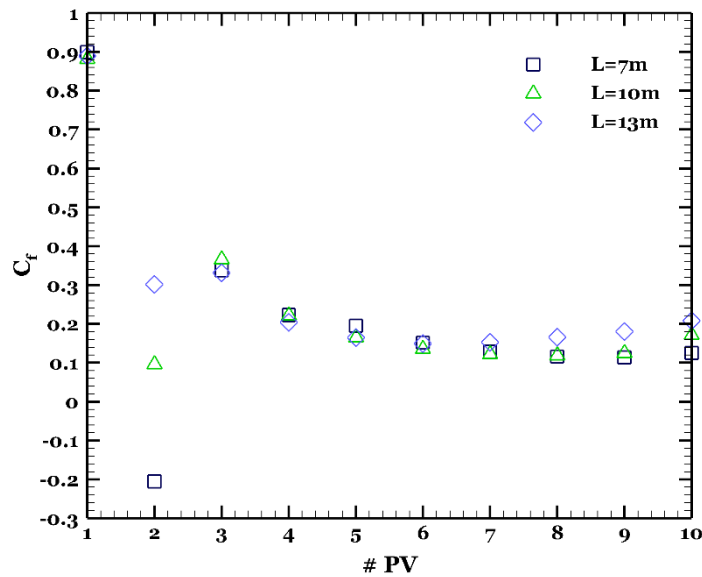


Σχήμα 7-2 Σύγκριση του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του άνω και κάτω τμήματος των Φ/B , ΔC_p για τρεις διαφορετικές αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$.

Στο Σχήμα 7-2 γίνεται σύγκριση του ΔC_p , για τρεις διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των Φ/B , α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Παρατηρείται ότι για το πρώτο Φ/B δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των καμπυλών του ΔC_p για τις τρεις αποστάσεις μεταξύ των Φ/B . Για το δεύτερο Φ/B παρατηρείται ότι για την περίπτωση με $L=13m$ οι τιμές της καμπύλης του ΔC_p είναι μεγαλύτερες από αυτές για $L=10m$, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς όταν αυξάνεται η απόσταση των δύο Φ/B , μειώνεται η προστατευτική επίδραση που παρέχεται στο δεύτερο Φ/B από το πρώτο. Παρόλα αυτά για $L=7m$ παρατηρείται ότι η καμπύλη παίρνει αρνητικές τιμές, το οποίο σημαίνει ότι στην άνω πλευρά του Φ/B εμφανίζεται υποπίεση. Το γεγονός αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να προκληθούν δυνάμεις άντωσης στο Φ/B . Από το τρίτο μέχρι το έκτο Φ/B της συστοιχίας παρατηρούνται μικρές διαφορές στις καμπύλες του ΔC_p . Η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται κοντά στην ακμή προσβολής. Για την περίπτωση με $L=7m$ παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές του ΔC_p κοντά στην ακμή προσβολής. Για τα Φ/B από το έβδομο μέχρι το δέκατο, παρατηρείται ότι οι τιμές του ΔC_p αυξάνονται για τις περιπτώσεις με απόσταση $L=10m$ και $L=13m$ έως ότου ξεπεράσουν την καμπύλη του ΔC_p για $L=7m$ με την καμπύλη του ΔC_p για $L=13m$ να ξεπερνάει αυτή του ΔC_p για $L=10m$.

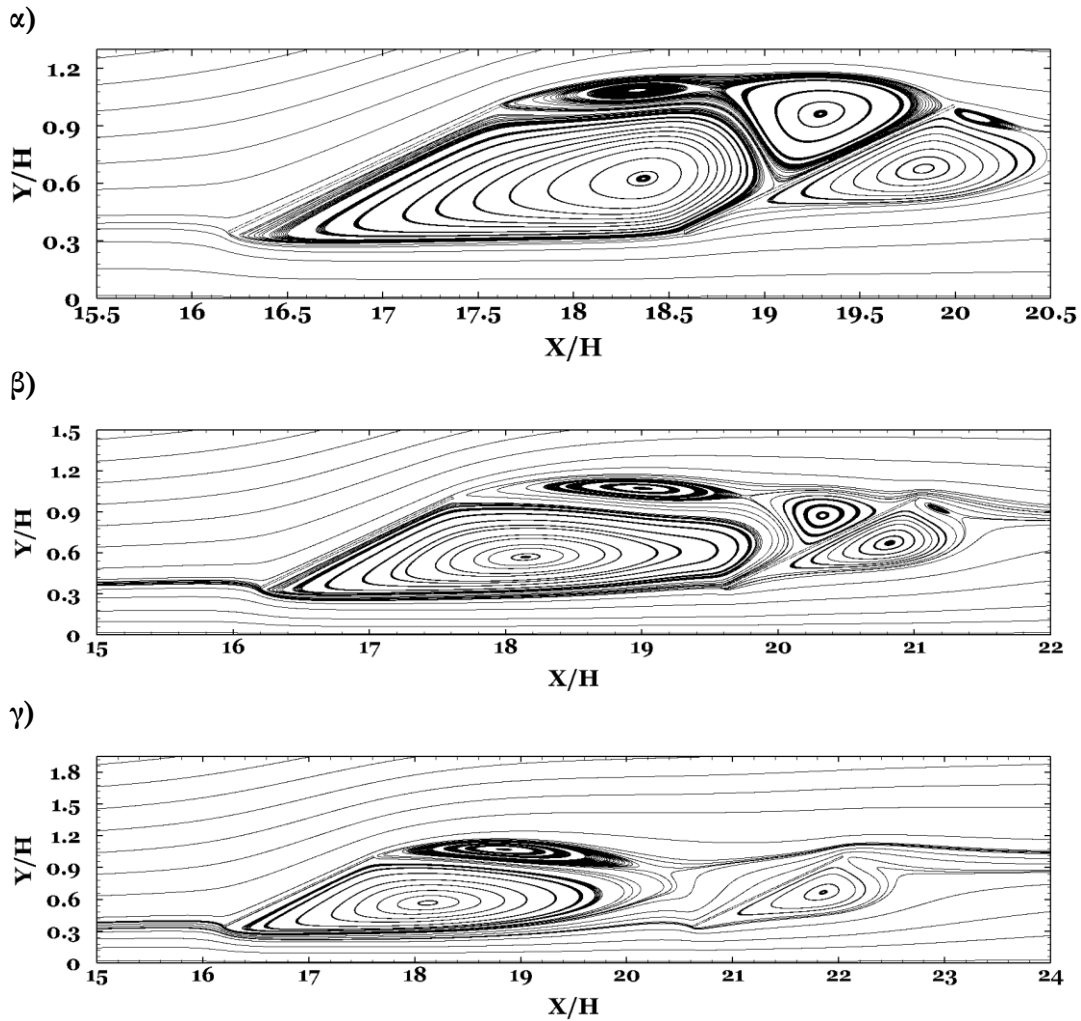
Πίνακας 8 Υπολογισμός του συντελεστή δύναμης που επιδρά στα Φ/B της συστοιχίας για διαφορετικές αποστάσεις, L , μεταξύ των πλασιών.

L (m)	C_f									
7	0.899	-0.205	0.338	0.223	0.195	0.152	0.128	0.116	0.114	0.125
10	0.882	0.096	0.366	0.222	0.165	0.135	0.122	0.119	0.125	0.171
13	0.890	0.302	0.332	0.204	0.165	0.150	0.153	0.166	0.181	0.209
Φ/B (νο.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



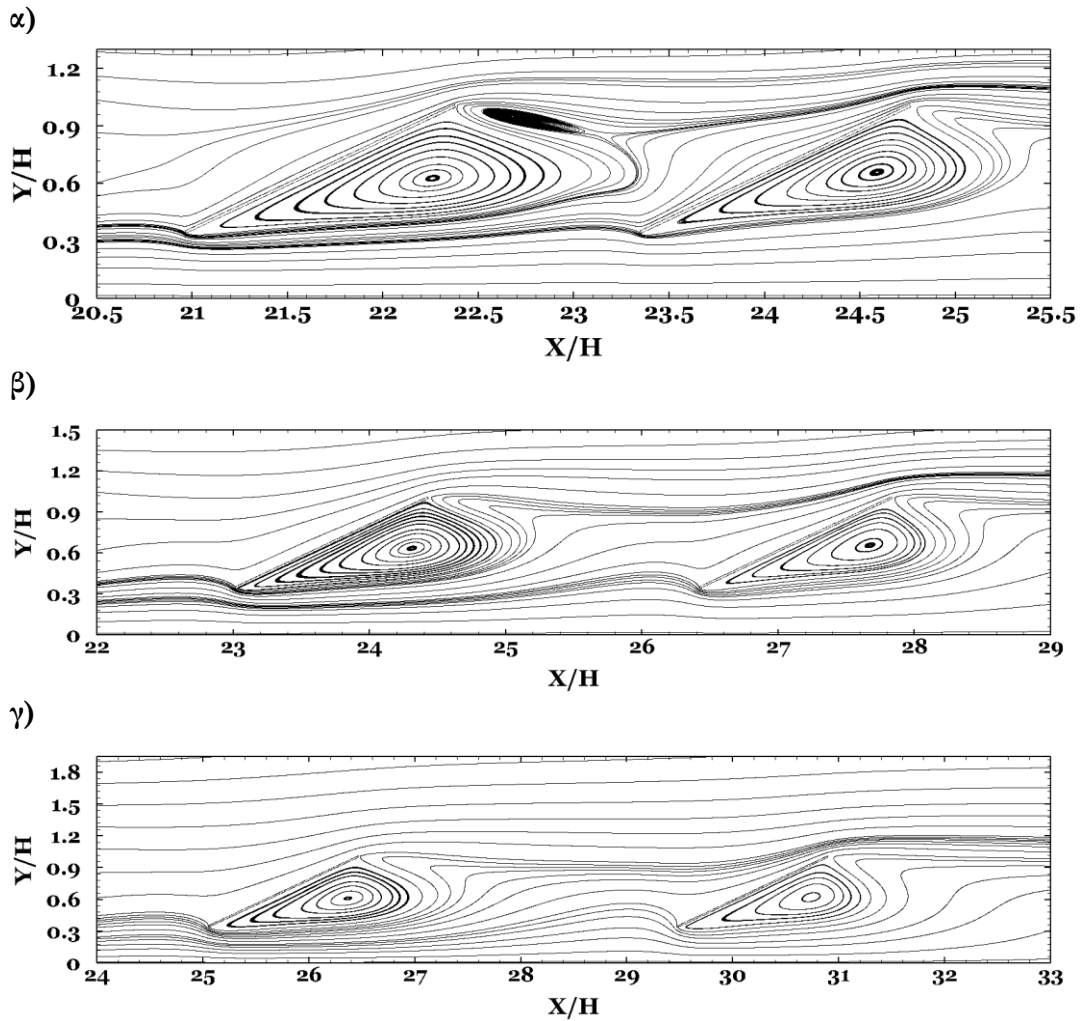
Σχήμα 7-3 Συγκριτικό διάγραμμα του αδιάστατου συντελεστή δύναμης των Φ/B , ΔC_p για τρεις διαφορετικές αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$.

Ο Πίνακας 8 περιέχει τις τιμές του συντελεστή δύναμης, C_f , που υπολογίστηκαν για τρεις διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των Φ/B , α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$. Επίσης, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 7-3. Αρχικά, παρατηρείται ότι για το πρώτο Φ/B οι διαφορές του C_f για τις τρεις διαφορετικές αποστάσεις δεν είναι σημαντικές. Αντίθετα, για το δεύτερο Φ/B η επίδραση της απόστασης φαίνεται να είναι μεγάλης σημασίας, καθώς για $L=7m$ ο συντελεστής δύναμης αλλάζει πρόσημο με αποτέλεσμα αυτό να μεταφράζεται σε δυνάμεις άντωσης πάνω στο Φ/B . Επιπρόσθετα, το μέτρο της τιμής του είναι σαφώς μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίζεται για $L=10m$ σε αντίθεση με αυτό που αναμενόταν, δηλαδή με τη μείωση της απόστασης μεταξύ των Φ/B , να αυξάνεται και η προστατευτική επίδραση που παρέχεται από το πρώτο. Ομοίως για $L=13m$ παρατηρείται, όπως αναμενόταν, μεγαλύτερη τιμή του C_f από εκείνη για $L=10m$, καθώς με την αύξηση της απόστασης μειώνεται η προστατευτική επίδραση που παρέχει το πρώτο Φ/B . Από το τέταρτο μέχρι το έκτο Φ/B της συστοιχίας, η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή δύναμης υπολογίζεται για την περίπτωση με απόσταση $L=7m$ μεταξύ των Φ/B . Για το τρίτο Φ/B η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή δύναμης υπολογίζεται για $L=10m$. Για τα υπόλοιπα Φ/B της συστοιχίας οι μεγαλύτερες τιμές του C_f υπολογίζονται για $L=13m$.



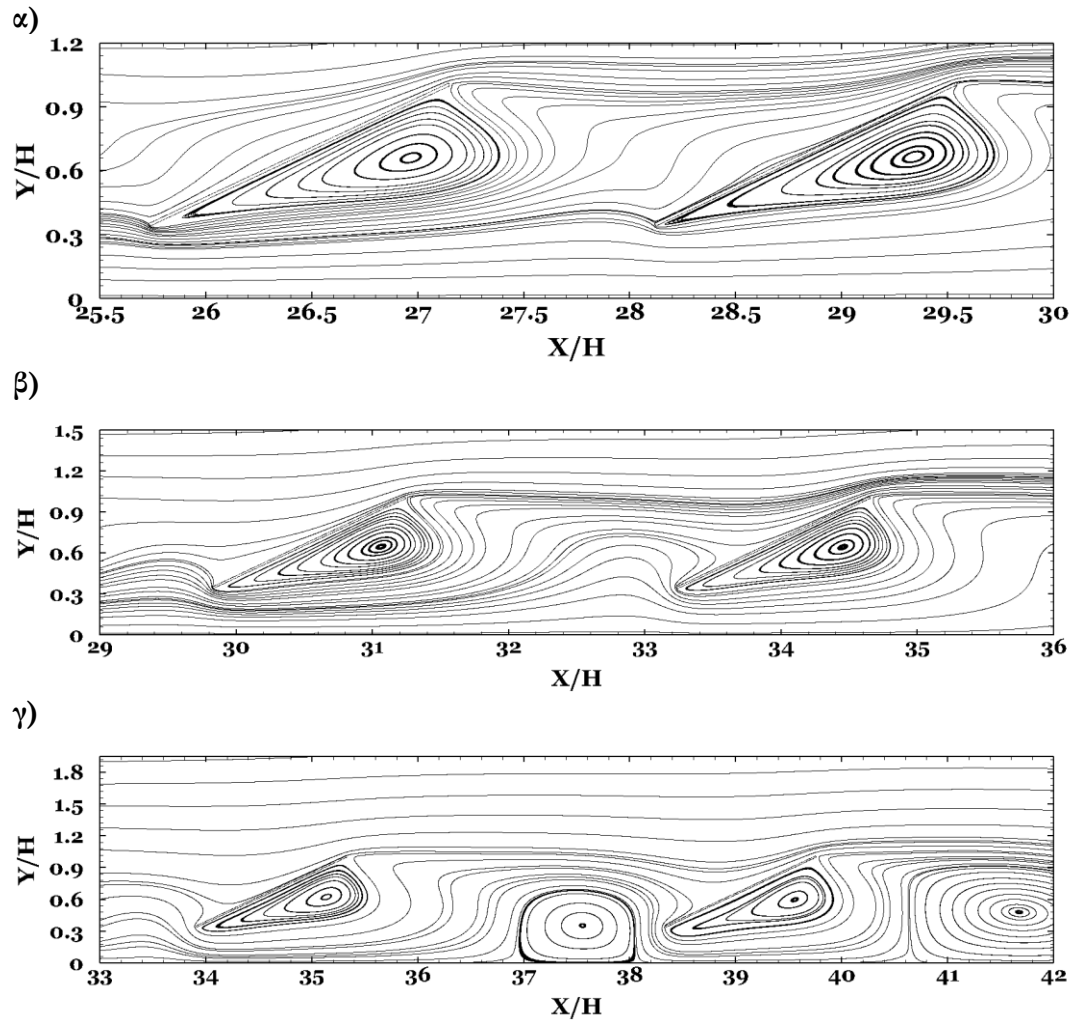
Σχήμα 7-4 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$.

Στο Σχήμα 7-4 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πρώτο και δεύτερο Φ/B της συστοιχίας για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, κατάντη του πρώτου Φ/B δημιουργούνται δύο κλειστές ανακυκλοφορίες, ενώ στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B δημιουργείται μία ανακυκλοφορία κλειστή ανακυκλοφορία για τις περιπτώσεις με $L=7m$ και $L=10m$, αλλά όπως φαίνεται και από το σχήμα, για την περίπτωση με $L=13m$ μεταξύ των Φ/B η δεν δημιουργείται ανακυκλοφορία στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B . Το μέγεθος της ανακυκλοφορίας, που δημιουργείται στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B για τις περιπτώσεις με $L=7m$ και $L=10m$, αυξάνεται καθώς η απόσταση μεταξύ των Φ/B μικραίνει και η επίδραση της ανακυκλοφορίας κατάντη του πρώτου μεγαλώνει.



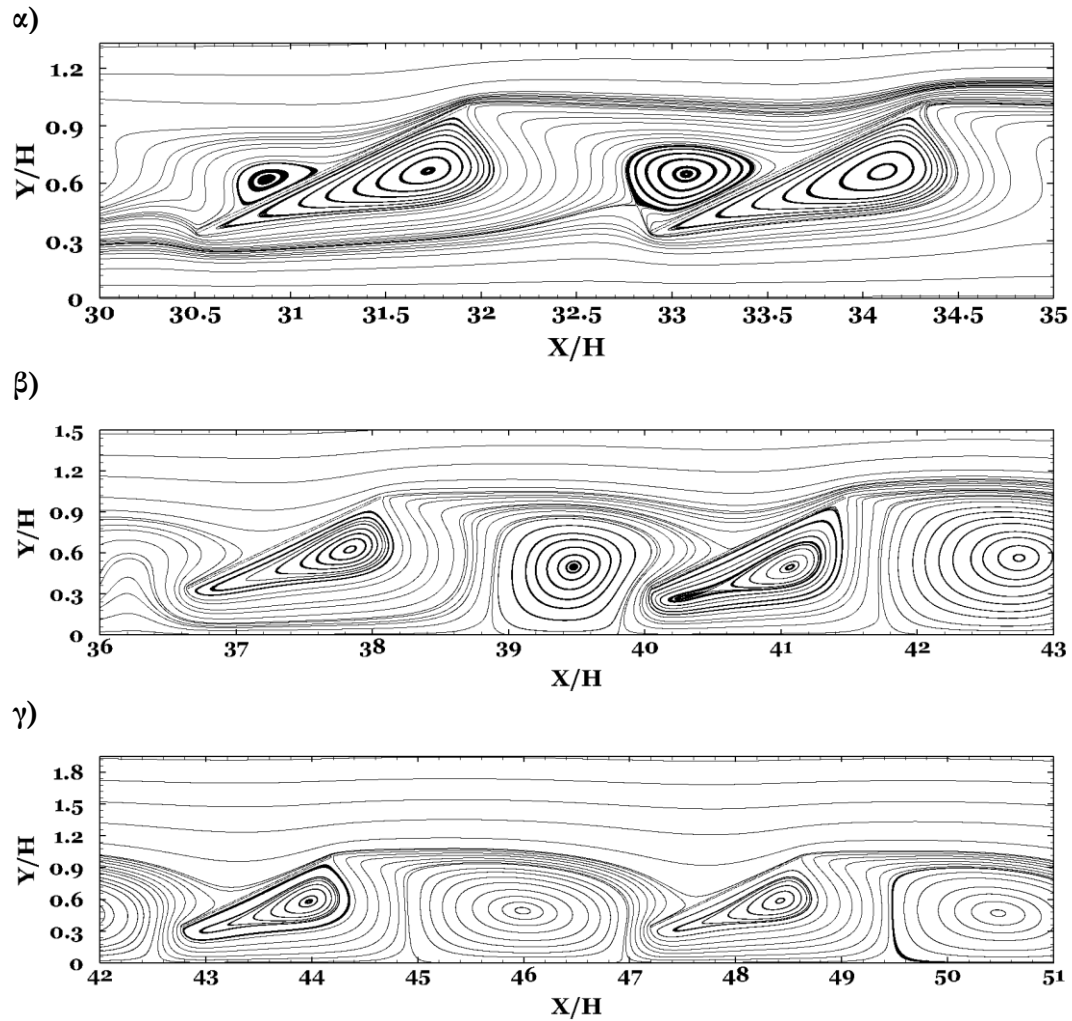
Σχήμα 7-5 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το τρίτο και το τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$.

Στο Σχήμα 7-5 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το τρίτο και τέταρτο Φ/B της συστοιχίας για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια κατάντη των Φ/B δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία, πάνω από την οποία δημιουργείται ένας «λοβός». Για την περίπτωση με $L=7m$ δημιουργείται μία δευτερεύουσα ανακυκλοφορία κατάντη της ακμής εκφυγής του τρίτου Φ/B .



Σχήμα 7-6 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το πέμπτο και το έκτο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$.

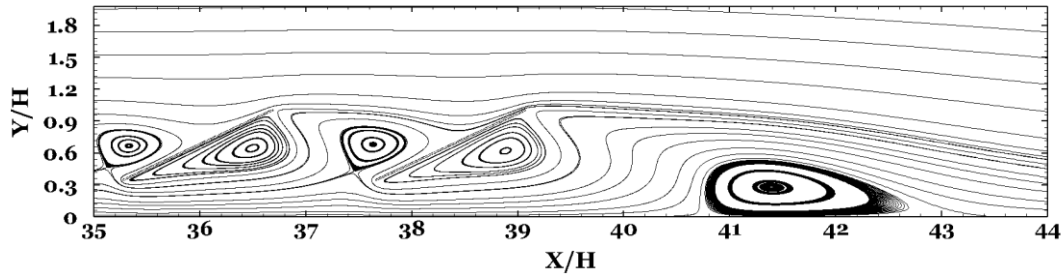
Στο Σχήμα 7-6 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το πέμπτο και έκτο Φ/B της συστοιχίας για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Παρατηρείται ο σχηματισμός μιας κλειστής ανακυκλοφορίας ανάμεσα στα Φ/B για την περίπτωση με $L=13m$, ενώ για την περίπτωση με $L=10m$ δημιουργείται μία «δίνη υποστέγου», όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για την περίπτωση με $L=7m$ δε δημιουργείται κάποια δίνη μεταξύ των Φ/B . Επίσης για την περίπτωση με $L=13m$ δημιουργείται κατάντη του έκτου Φ/B μία κλειστή ανακυκλοφορία ή οποία είναι αποκολλημένη από τη γεωμετρία.



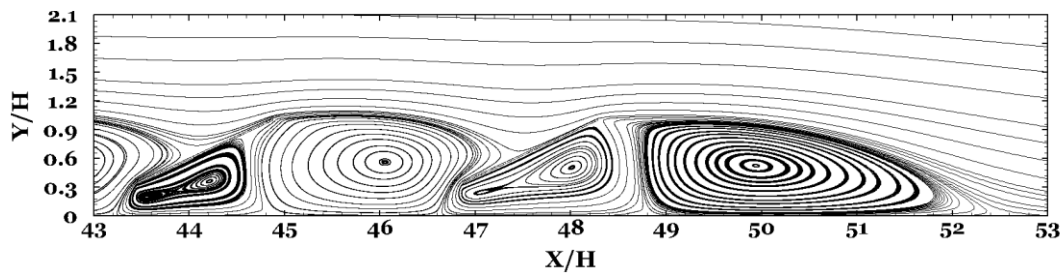
Σχήμα 7-7 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το έβδομο και το όγδοο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7\text{m}$, β) $L=10\text{m}$ και γ) $L=13\text{m}$.

Στο Σχήμα 7-7 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το έβδομο και όγδοο Φ/B της συστοιχίας για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7\text{m} \approx 2.4H$, β) $L=10\text{m} \approx 3.4H$ και γ) $L=13\text{m} \approx 4.4H$. Για τις περιπτώσεις με $L=10\text{m}$ και $L=13\text{m}$ δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία ανάμεσα από τα δύο Φ/B και μία κατάντη του όγδου Φ/B οι οποίες έχουν αποκολληθεί από τη γεωμετρία. Όπως φαίνεται το μέγεθος της ανακυκλοφορίας που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο Φ/B είναι μικρότερο στην περίπτωση με $L=10\text{m}$. Για την περίπτωση με $L=7\text{m}$ δημιουργείται μία ανακυκλοφορία στην άνω πλευρά των δύο Φ/B . Η ανακυκλοφορία που δημιουργείται στην άνω πλευρά του έβδομου Φ/B είναι μικρότερη από εκείνη του όγδου, η οποία βρίσκεται πιο κοντά στην ακμή προσβολής.

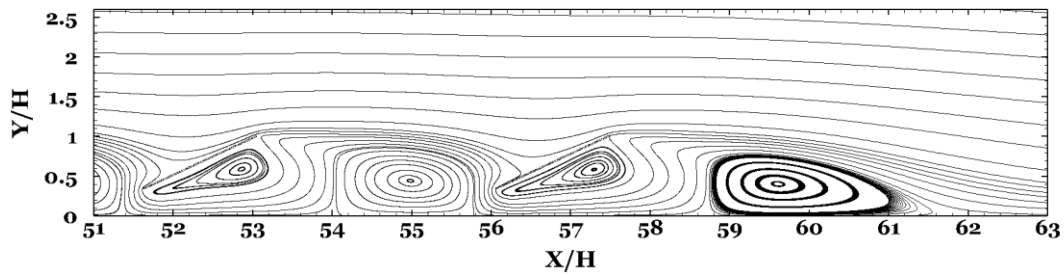
α)



β)



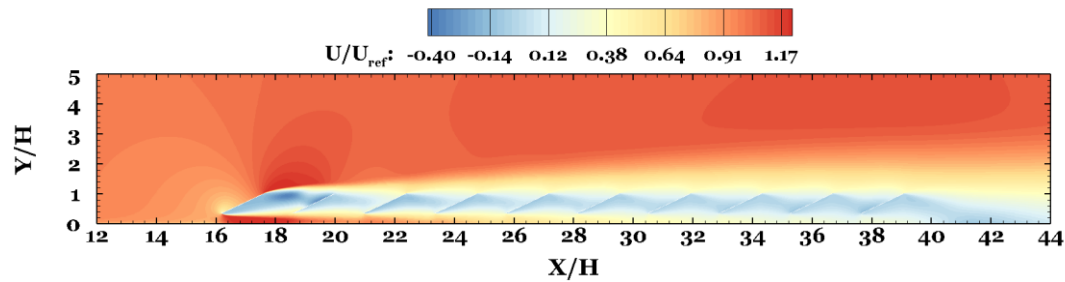
γ)



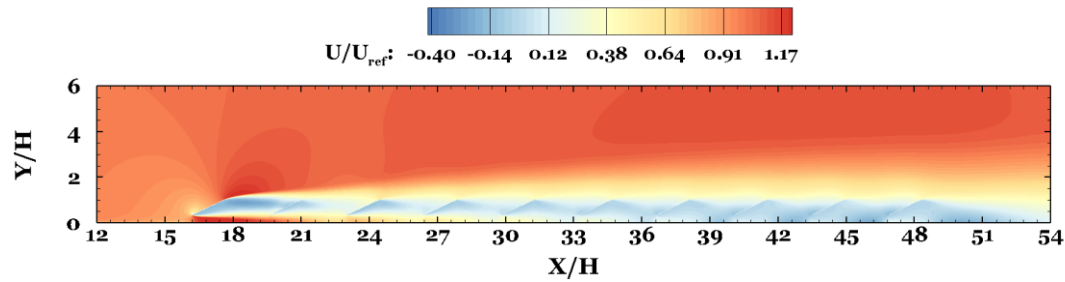
Σχήμα 7-8 Ροϊκές Γραμμές γύρω από το ένατο και το δέκατο Φ/B της συστοιχίας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$.

Στο Σχήμα 7-8 απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές γύρω από το ένατο και δέκατο Φ/B της συστοιχίας για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Για τις περιπτώσεις με $L=10m$ και $L=13m$ δημιουργείται μία κλειστή ανακυκλοφορία ανάμεσα από τα δύο Φ/B η οποία έχει αποκολληθεί από τη γεωμετρία. Όπως φαίνεται το μέγεθος της ανακυκλοφορίας που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο Φ/B είναι μικρότερο στην περίπτωση με $L=13m$, σε αντίθεση με την ανακυκλοφορία που δημιουργείται ανάμεσα στα δύο προηγούμενα Φ/B . Για την περίπτωση με $L=7m$ δημιουργούνται δύο αποκολλημένες δίνες κοντά στην άνω πλευρά των δύο Φ/B . Στο απόρρευμα της συστοιχίας δημιουργείται και στις τρεις περιπτώσεις μία κλειστή ανακυκλοφορία. Η μεγαλύτερη σε μέγεθος ανακυκλοφορία εμφανίζεται για την περίπτωση με $L=10m$ και η μικρότερη για την περίπτωση με $L=7m$.

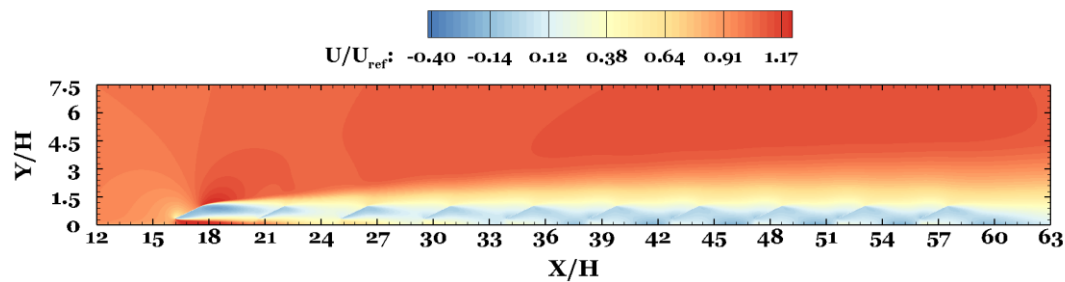
α)



β)



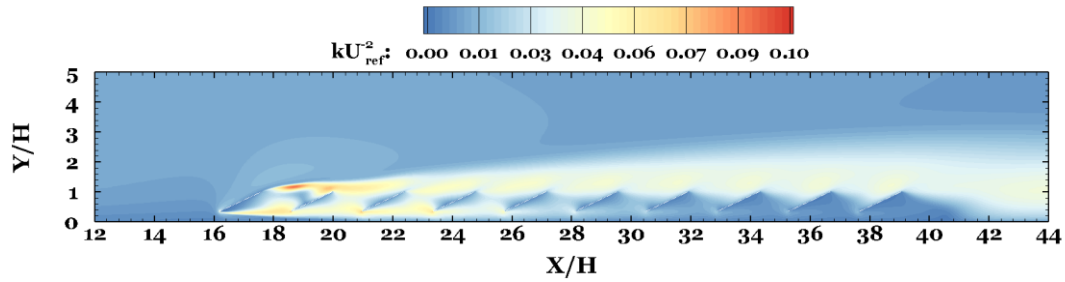
γ)



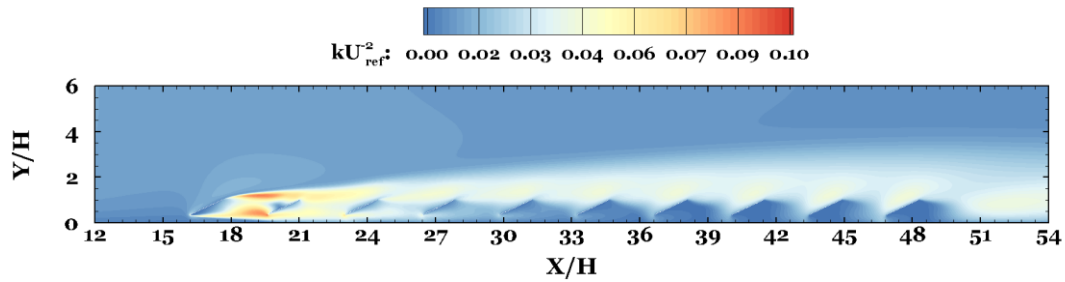
Σχήμα 7-9 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας ως προς την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$.

Στο Σχήμα 7-9 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής και γίνεται σύγκριση των πεδίων ροής που υπολογίστηκαν για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Η αδιαστατοποίηση έγινε μέσω της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος. Παρατηρείται ότι η παράμετρος της απόστασης ανάμεσα στα Φ/B επηρεάζει το πεδίο ταχυτήτων στις περιοχές ανάμεσα τους και στο απόρρευμα της συστοιχίας. Παρατηρείται ότι στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B οι ταχύτητες αυξάνονται κατά μέτρο όσο η απόσταση μεταξύ των Φ/B μειώνεται. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση με $L=7m$, η ταχύτητα στην άνω πλευρά του δεύτερου Φ/B είναι μεγαλύτερη κατά μέτρο από την ταχύτητα στην κάτω πλευρά, δικαιολογώντας τις ανωστικές δυνάμεις που παρατηρήθηκαν παραπάνω κατά τον υπολογισμό του συντελεστή δύναμης.

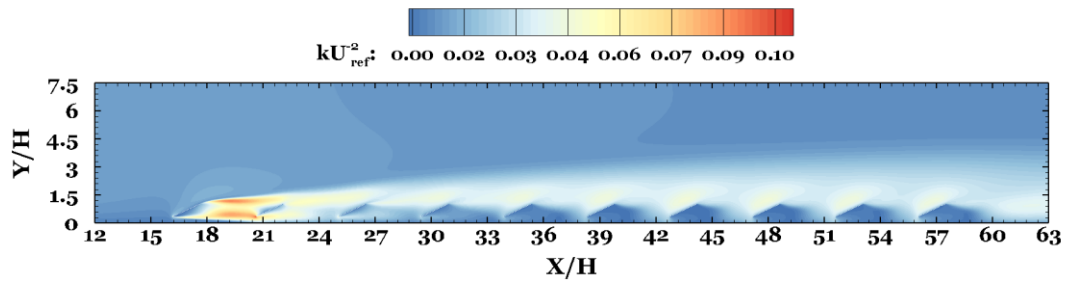
α)



β)



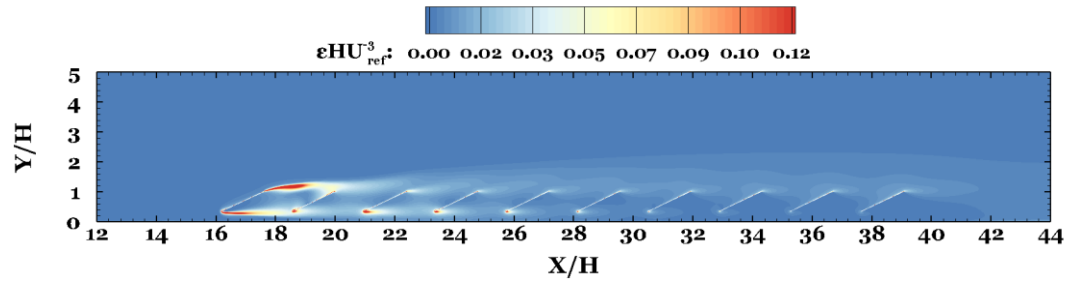
γ)



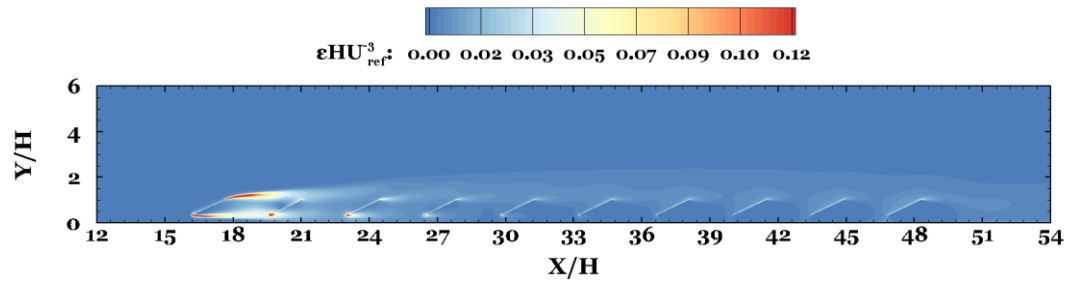
Σχήμα 7-10 Ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$.

Στο Σχήμα 7-10 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης τυρβώδους κινητικής ενέργειας που υπολογίστηκαν για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Στην περίπτωση για $L=7m$ παρατηρείται ότι υπολογίζονται μικρότερες τιμές του, k , κοντά στην ακμή προσβολής του δεύτερου Φ/B σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Επίσης, παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές του k , κοντά στην ακμή εκφυγής του δεύτερου Φ/B σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις.

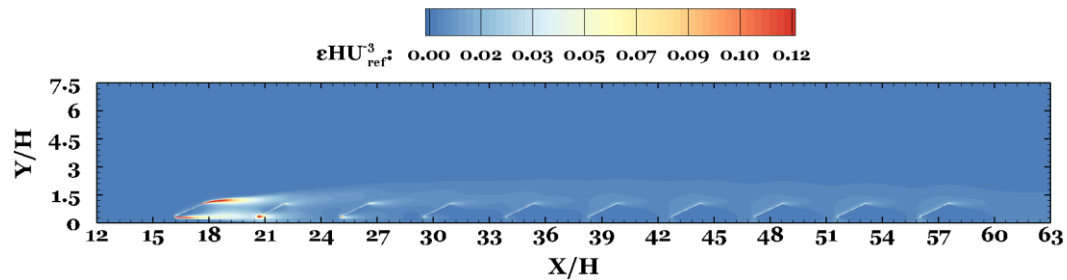
α)



β)



γ)

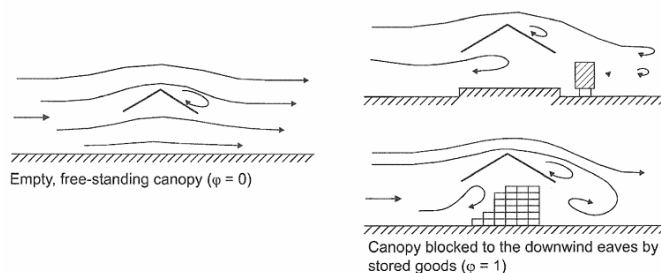


Σχήμα 7-11 Ισοϋφές γραφήμα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για την περίπτωση μελέτης με νότια διεύθυνση ανέμου. Παραμετρική μελέτη για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m$, β) $L=10m$ και γ) $L=13m$.

Στο Σχήμα 7-11 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που υπολογίστηκαν για τρεις αποστάσεις των Φ/B μεταξύ τους, α) $L=7m \approx 2.4H$, β) $L=10m \approx 3.4H$ και γ) $L=13m \approx 4.4H$. Για το πρώτο Φ/B δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές με την αλλαγή της απόστασης μεταξύ των Φ/B . Για την περίπτωση με $L=7m$ εμφανίζονται μεγάλες τιμές της αδιάστατης καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην ακμή προσβολής των Φ/B έως το έκτο σε σειρά Φ/B . Ενώ για τις άλλες δύο περιπτώσεις δεν παρατηρούνται υψηλές τιμές μετά το τέταρτο, για $L=10m$ και μετά το τρίτο Φ/B για $L=13m$.

8 Σύγκριση του Συντελεστή Δύναμης που υπολογίστηκε από τις Προσομοιώσεις με τιμές του EN 1991-1-4:200

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η σύγκριση των τιμών του συντελεστή δύναμης, C_f όπως υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις, με τιμές του συντελεστή που υπολογίζονται από τον Ευρωκώδικα - EN 1991-1-4:200 (Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions). Συγκεκριμένα, η σύγκριση που γίνεται στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται στις τιμές του πίνακα 7.6 του κεφαλαίου 7.3 του Ευρωκώδικα, το οποίο αναφέρεται στις δυνάμεις που ασκούνται σε στέγες με στέγαστρο. Ως στέγη με στέγαστρο ορίζει τις στέγες μίας κατασκευής η οποία δεν έχει μόνιμους τοίχους. Ο βαθμός παρεμπόδισης κάτω από μια στέγη με στέγαστρο φαίνεται στο Σχήμα 8-1 και εξαρτάται από την παρεμπόδιση, φ , η οποία είναι ο λόγος του εμβαδού των εμποδίων κάτω από το στέγαστρο προς το εμβαδόν της διατομής κάτω από το στέγαστρο, με τις δύο περιοχές να είναι κάθετες στη διεύθυνση του ανέμου.



Σχήμα 8-1 Ροή γύρω από στέγες – Βαθμός παρεμπόδισης, φ , για διαφορετικές διατάξεις υποστέγων.

Σημειώνεται ότι για $\varphi=0$ αναπαρίσταται ένα υπόστεγο με κενό χώρο κάτω από αυτό και για $\varphi=1$ το υπόστεγο είναι κλεισμένο. Οι συνολικοί συντελεστές δύναμης, C_f , και οι συντελεστές καθαρής πίεσης $C_{p,net}$ που δίνονται στους πίνακες 7.6 έως 7.8 του Ευρωκώδικα για $\varphi = 0$ και $\varphi = 1$ λαμβάνουν υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση του ανέμου που ενεργεί τόσο στην άνω όσο και στην κάτω επιφάνεια των στεγαστρών για όλες τις διευθύνσεις του ανέμου. Για τη σύγκριση του συντελεστή δύναμης επιλέχθηκε η περίπτωση της μονόριχτης στέγης (πίνακας 7.6 του Ευρωκώδικα) με κλίση ίση με αυτή των Φ/Β ως προς το έδαφος, δηλαδή 25° . Η μέγιστη τιμή του συντελεστή δύναμης που δίνει ο πίνακας για όλες τις τιμές παρεμπόδισης, φ , είναι $C_f=1.0$, ενώ οι ελάχιστες τιμές διαφοροποιούνται για $\varphi=0$ και $\varphi=1$, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9 Τιμές του συντελεστή δύναμης όπως υπολογίζονται από τον Ευροκώδικα για διαφορετικές τιμές του φ .

Μέγιστη τιμή C_f για όλα τα φ	1.0
Ελάχιστη τιμή C_f για $\varphi=0$	-1.6
Ελάχιστη τιμή C_f για $\varphi=1$	-1.4

Στα προηγούμενα κεφάλαια (κεφ.5.1, κεφ.5.2, κεφ.6 και κεφ.7) υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή δύναμης, C_f , μέσω προσομοιώσεων για δύο μοντέλα τύρβης (k- ϵ RNG & k- ω SST). Επίσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής δύναμης για δύο περιπτώσεις μελέτης κατά τις οποίες εξετάστηκε η επίδραση των παραμέτρων της απόστασης των Φ/B από το έδαφος και της απόστασης μεταξύ τους. Οι τιμές αυτές καταγράφονται στους πίνακες: Πίνακας 5, Πίνακας 6, Πίνακας 7 και Πίνακας 8 αντίστοιχα. Οι τιμές με τη μεγαλύτερη αντιστοιχία με αυτές που υπολογίζει ο Ευροκώδικας αφορούν το πρώτο Φ/B της συστοιχίας. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το πρώτο Φ/B της συστοιχίας δέχεται τα μεγαλύτερα φορτία ανέμου.

Από τη συγκριτική μελέτη που έγινε για τα δύο μοντέλα τύρβης για βόρεια και νότια διεύθυνση ανέμου, υπολογίστηκαν οι συντελεστές δύναμης που επιδρούν στα Φ/B . Το μοντέλο k- ϵ RNG υπολόγισε την τιμή του συντελεστή $C_f=0.88$, ενώ το μοντέλο k- ω SST υπολόγισε $C_f=0.91$ για το πρώτο Φ/B της συστοιχίας, για την περίπτωση με νότια διεύθυνση ανέμου. Ενώ για την περίπτωση με βόρεια διεύθυνση ανέμου, τα δύο μοντέλα υπολόγισαν την ίδια τιμή του συντελεστή δύναμης, $C_f=-1.23$, για το πρώτο Φ/B . Παρατηρείται ότι η τιμή που υπολογίζει το μοντέλο k- ω SST, για την περίπτωση με νότια διεύθυνση ανέμου, είναι σε μεγαλύτερη συμφωνία με την τιμή που υπολογίζει ο Ευροκώδικας, δηλαδή τη μέγιστη τιμή του συντελεστή για όλα τα φ , $C_f=1.0$, από αυτή που υπολογίζει το k- ϵ RNG. Για την περίπτωση με βόρεια διεύθυνση ανέμου η τιμή του συντελεστή δύναμης προσεγγίζεται καλύτερα από τον Ευροκώδικα, μέσω της ελάχιστης τιμής του $C_f=-1.4$ για $\varphi=1$, δηλαδή για υπόστεγο το οποίο περιέχει εμπόδια. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς οι συστοιχίες για τις οποίες έγινε η προσομοίωση βρίσκονταν κοντά σε έδαφος, το οποίο είχε σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση της ροής και στο συντελεστή δύναμης. Και στις δύο περιπτώσεις, ο Ευροκώδικας φαίνεται να υπερδιαστασιολογεί κατά μέτρο την τιμή του συντελεστή δύναμης σε σχέση με τις προσομοιώσεις.

Από την παραμετρική μελέτη της απόστασης των Φ/B από το έδαφος, υπολογίστηκαν, επίσης, οι συντελεστές δύναμης που επιδρούν στα Φ/B . Για ύψος των Φ/B από το έδαφος, $h=0.5\text{m}$ ή για $h/H=0.17$, η τιμή του συντελεστή υπολογίστηκε, $C_f=0.83$ για το πρώτο Φ/B . Για $h=1.0\text{m}$ ή για $h/H=0.34$, η τιμή του συντελεστή υπολογίστηκε, $C_f=0.88$ και για $h=1.5\text{m}$ ή για $h/H=0.51$, $C_f=0.905$. Παρατηρείται ότι η τιμή που υπολογίζεται από τις προσομοιώσεις για $h=1.5\text{m}$, είναι σε μεγαλύτερη συμφωνία με την τιμή που υπολογίζει ο Ευρωκώδικας, δηλαδή τη μέγιστη τιμή του συντελεστή για όλα τα φ , $C_f=1.0$.

Από την παραμετρική μελέτη της απόστασης των Φ/B μεταξύ τους, υπολογίστηκαν, επίσης, οι συντελεστές δύναμης που επιδρούν στα Φ/B . Για απόσταση μεταξύ των Φ/B , $L=7\text{m}$ ή για $L/H=2.4$, η τιμή του συντελεστή υπολογίστηκε, $C_f=0.899$ για το πρώτο Φ/B . Για $L=10\text{m}$ ή για $L/H=3.4$, η τιμή του συντελεστή υπολογίστηκε, $C_f=0.88$ και για $L=13\text{m}$ ή για $L/H=4.4$, $C_f=0.89$. Παρατηρείται ότι η τιμή που υπολογίζεται από τις προσομοιώσεις για $L=7\text{m}$, είναι σε μεγαλύτερη συμφωνία με την τιμή που υπολογίζει ο Ευρωκώδικας, δηλαδή τη μέγιστη τιμή του συντελεστή για όλα τα φ , $C_f=1.0$. Παρόλα αυτά και οι υπόλοιπες τιμές δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά, καθώς η επίδραση της απόστασης των Φ/B μεταξύ τους δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική για το πρώτο Φ/B .

9 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της ροής ανέμου γύρω από συστοιχία δέκα φωτοβολταϊκών πλασιών, τα οποία ήταν τοποθετημένα κοντά στο έδαφος. Η μοντελοποίηση της ροής αφορά 2Δ, μόνιμης κατάστασης (“steady state”) προσομοιώσεις RANS οι οποίες έγιναν με τη χρήση δύο μοντέλων τύρβης (k-ε RNG & k-ω SST).

Στο κεφ. 4 πραγματοποιήθηκε μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος για ένα Φ/B (4.1) και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της ροής ανέμου γύρω από τη συστοιχία με πειραματικά δεδομένα από αεροσήραγγα με σκοπό την επικύρωση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων (4.2). Κατά τη μελέτη ανεξαρτησίας υπολογίστηκε ο συντελεστής πίεσης, C_p , κατά μήκος του Φ/B για τρία διαφορετικά πλέγματα. Επίσης, έγινε εκτίμηση τους σφάλματος ανάμεσα στο μεσαίο και το πυκνό πλέγμα και υπολογίστηκε ο δείκτης σύγκλισης του πλέγματος. Η μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος έδειξε ότι η λύση ήταν ανεξάρτητη από το αραιό πλέγμα. Παρόλα αυτά, για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος επιλέχθηκαν τα χαρακτηριστικά του πυκνού πλέγματος για να γίνουν οι προσομοιώσεις της ροής ανέμου γύρω από τη συστοιχία. Για το σκοπό της επικύρωσης των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ροής ανέμου γύρω από συστοιχία Φ/B για νότια (4.2.1) και βόρεια (4.2.2) διεύθυνση ανέμου με χρήση των δύο μοντέλων τύρβης. Η γεωμετρία των Φ/B είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτή του πειράματος, αλλά σε πλήρη κλίμακα. Η ταχύτητα στην είσοδο ορίστηκε τέτοια, ώστε ο αριθμός Re να είναι ίδιος με το υπό κλίμακα μοντέλο του πειράματος. Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με αυτά της προσομοίωσης έδειξε η διαφορά στον υπολογισμό του αδιάστατου συντελεστή πίεσης ανάμεσα στα δύο μοντέλα τύρβης δεν είναι σημαντική. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι το μοντέλο k-ε RNG υπερεκτιμά τη διαφορά του C_p στην ακμή προσβολής σε κάποια Φ/B της συστοιχίας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι παραμετρικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν έγιναν με το μοντέλο τύρβης k-ε RNG, καθώς δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά στον υπολογισμό του αδιάστατου συντελεστή πίεσης, άρα και στις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό. Επίσης, η επιλογή του k-ε RNG έγινε και με γνώμονα την ευκολότερη και ταχύτερη σύγκλιση του σε σχέση με το μοντέλο k-ω SST. Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση του αριθμού Re στη λύση και κατ’ επέκταση στον υπολογισμό του αδιάστατου συντελεστή πίεσης και του συντελεστή δύναμης. Εξετάστηκαν δύο αριθμοί Re : $Re=2.4 \times 10^6$ και $Re=1.0 \times 10^5$. Παρατηρήθηκε ότι και για τα δύο μοντέλα τύρβης η μεγαλύτερη ποσοστιαία διαφορά εμφανίζεται για το πέμπτο Φ/B της συστοιχίας, ενώ για το πρώτο και το

δεύτερο η ποσοστιαία διαφορά στο συντελεστή δύναμης για τις δύο τιμές του αριθμού Re δεν ξεπερνά το 5%. Επίσης, παρατηρείται ότι το μοντέλο k-ε RNG δείχνει να επηρεάζεται λιγότερο από τον αριθμό Re όσον αφορά στο πρώτο και το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας, ενώ για το πέμπτο Φ/B η επιρροή του αριθμού Re είναι μικρότερη για το μοντέλο k- ω SST.

Στο κεφ. 5 πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ροής ανέμου γύρω από συστοιχία Φ/B για περιπτώσεις με νότια (5.1) και βόρεια (5.2) διεύθυνση ανέμου με τη χρήση δύο μοντέλων τύρβης, k-ε RNG & k- ω SST. Υπολογίστηκε η κατανομή της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης της άνω και κάτω πλευράς των Φ/B , ΔC_p , καθώς και ο συντελεστής δύναμης C_f μέσω των δύο μοντέλων τύρβης και πραγματοποιήθηκε η σύγκριση τους. Επίσης, παρουσιάστηκαν διαγράμματα των ροϊκών γραμμών του πεδίου ροής, καθώς και ισοϋψή γραφήματα των μεγεθών της ροής για τις δύο περιπτώσεις διεύθυνσης ανέμου και για τα δύο μοντέλα τύρβης. Αρχικά, παρατηρείται ότι, για τις δύο περιπτώσεις διεύθυνσης ανέμου και μοντέλων τύρβης, τα Φ/B βρίσκονται εντός του απορρεύματος του πρώτου Φ/B και το πρώτο Φ/B της συστοιχίας δέχεται τα μεγαλύτερα φορτία ανέμου. Για την περίπτωση με νότια διεύθυνση ανέμου, το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας δέχεται τις ελάχιστες δυνάμεις. Για την περίπτωση με βόρεια διεύθυνση ανέμου δε συμβαίνει κάτι τέτοιο. Παρατηρείται ότι, για την περίπτωση με νότια διεύθυνση ανέμου και έως το έκτο Φ/B της συστοιχίας, η μεγαλύτερη διαφορά στον αδιάστατο συντελεστή πίεσης μεταξύ της προσήνεμης και υπήνεμης πλευράς, ΔC_p , παρουσιάζεται στην ακμή προσβολής των Φ/B , καθιστώντας, έτσι, τις περιοχές αυτές πιο ευάλωτες στη φόρτιση από τον άνεμο. Για βόρεια διεύθυνση ανέμου, η διαφορά πίεσης στην ακμή προσβολής έχει μικρότερη ένταση. Ως επί το πλείστον, και για τις δύο διευθύνσεις ανέμου, και εκτός από το πρώτο και το δεύτερο Φ/B , το μοντέλο k-ε RNG υπερεκτιμά τη διαφορά πίεσης και τις δυνάμεις που ασκούνται στο Φ/B και ιδιαίτερα στην ακμή προσβολής. Όσον αφορά στην υπήνεμη πλευρά των Φ/B , το μοντέλο k-ε RNG φαίνεται να υποτιμά το μέγεθος της ζώνης ανακυκλοφορίας και των δινών και για τις δύο διευθύνσεις ανέμου. Τέλος, παρατηρείται ότι για την περίπτωση της διεύθυνσης ανέμου με νότια διεύθυνση, οι δυνάμεις που ασκούνται στα Φ/B είναι μεγαλύτερες από αυτές για την περίπτωση με βόρεια διεύθυνση ανέμου.

Στα κεφάλαια 6 και 7 πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές μελέτες που αφορούν την απόσταση των Φ/B από το έδαφος και την απόσταση των Φ/B μεταξύ τους, αντίστοιχα, για ροή ανέμου με νότια διεύθυνση. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ροής πάνω από τη

συστοιχία Φ/B για αναλογίες ύψους $h/H=0.17$, $h/H=0.34$ και $h/H=0.51$ και αναλογίες αποστάσεων $L/H=2.4$, $L/H=3.4$ και $L/H=4.4$. Υπολογίστηκε η κατανομή της διαφοράς του αδιάστατου συντελεστή πίεσης της άνω και κάτω πλευράς των Φ/B , ΔC_p , καθώς και ο συντελεστής δύναμης C_f για κάθε περίπτωση. Επίσης, παρουσιάστηκαν διαγράμματα των ροϊκών γραμμών του πεδίου ροής, καθώς και ισοϋψή γραφήματα των μεγεθών της ροής. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η αύξηση της απόστασης από το έδαφος προκάλεσε μεγαλύτερη διαφορά πίεσης μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης επιφάνειας και είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο φορτίο ανέμου στα πλαίσια της συστοιχίας με μόνη εξαίρεση το τελευταίο Φ/B για το οποίο τα μεγαλύτερα φορτία ανέμου παρουσιάστηκαν για τη μικρότερη απόσταση από το έδαφος. Επίσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για το μικρότερο λόγο αποστάσεων, δηλαδή για $L/H=2.4$, ο συντελεστής δύναμης για το δεύτερο Φ/B είχε αρνητικό πρόσημο. Αντίθετα με όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία, παρατηρείται ότι, ο μικρότερος λόγος αποστάσεων προκαλεί μεγαλύτερη φόρτιση των πλαισίων της συστοιχίας έως το έκτο σε σειρά Φ/B . Από το έκτο Φ/B και έως το δέκατο, μεγαλύτερη φόρτιση παρατηρείται για την περίπτωση με το μεγαλύτερο λόγο αποστάσεων, $L/H=4.4$. Το δεύτερο Φ/B της συστοιχίας, για λόγο αποστάσεων $L/H=3.4$, δεχόταν την ελάχιστη φόρτιση. Για τους άλλους δύο λόγους αποστάσεων φαίνεται να μειώνεται η προστατευτική επίδραση του πρώτου Φ/B προς το δεύτερο, καθώς επιδρούν μεγαλύτερα κατά μέτρο φορτία σε αυτό.

Στο 8ο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση του συντελεστή δύναμης που υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις με αυτό που υπολογίζει ο Ευροκώδικας (EN 1991-1-4:200). Από τη σύγκριση συμπεραίνεται ότι οι τιμές με τη μεγαλύτερη αντιστοιχία με αυτές που υπολογίζει ο Ευροκώδικας αφορούν το πρώτο Φ/B της συστοιχίας. Παρατηρήθηκε ότι η τιμή που υπολογίζει το μοντέλο $k-\omega$ SST, για την περίπτωση με νότια διεύθυνση ανέμου, είναι σε μεγαλύτερη συμφωνία με την τιμή που υπολογίζει ο Ευροκώδικας από αυτή που υπολογίζει το $k-\epsilon$ RNG. Για την περίπτωση με βόρεια διεύθυνση ανέμου η τιμή του συντελεστή δύναμης προσεγγίζεται καλύτερα από τον Ευροκώδικα, μέσω της ελάχιστης τιμής του $C_f=-1.4$ για $\varphi=1$, δηλαδή για υπόστεγο το οποίο περιέχει εμπόδια. Και στις δύο περιπτώσεις, ο Ευροκώδικας φαίνεται να υπερδιαστασιολογεί κατά μέτρο την τιμή του συντελεστή δύναμης σε σχέση με τις προσομοιώσεις. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η τιμή που υπολογίζεται από τις προσομοιώσεις για το μεγαλύτερο λόγο ύψους $h/H=0.51$, είναι σε μεγαλύτερη συμφωνία με την τιμή που υπολογίζει ο Ευροκώδικας, δηλαδή τη μέγιστη τιμή του συντελεστή για όλα τα φ , $C_f=1.0$. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η τιμή που υπολογίζεται από τις προσομοιώσεις για τον μικρότερο

λόγο απόστασης, $L/H=2.4$, είναι σε μεγαλύτερη συμφωνία με την τιμή που υπολογίζει ο Ευροκώδικας, δηλαδή τη μέγιστη τιμή του συντελεστή για όλα τα φ , $C_f=1.0$. Παρόλα αυτά και οι υπόλοιπες τιμές δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά, καθώς η επίδραση της απόστασης των Φ/B μεταξύ τους δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική για το πρώτο Φ/B .

Τέλος, περαιτέρω προσομοιώσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σχετικά με τη ροή ανέμου με βόρεια διεύθυνση για διαφορετικούς λόγους αποστάσεων των Φ/B μεταξύ τους και λόγους ύψους των Φ/B από το έδαφος. Επίσης, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις LES ή και DES με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των χρονικά μεταβαλλόμενων φαινομένων στον υπολογισμό των μέσων μεγεθών και να γίνει σύγκριση με τις προσομοιώσεις RANS. Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να εξεταστεί η εναπόθεση σκόνης ή και η πρόσκρουση σωματιδίων (Lu and Zhao (2019), Dagher and Kandil (2023)) και η επίδρασή τους σε Φ/B συστοιχίες οι οποίες βρίσκονται σε ανοιχτό πεδίο. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να εξεταστεί η επίδραση από πολύπλοκα φορτία ανέμου (Castellani et al (2021)). Στο πλαίσιο αυτό, η ροή του ανέμου και η δυναμική διέγερση που προκαλείται από τη απόσπαση δινών μπορούν να προικαλέσουν απροσδόκητες αεροελαστικές αποκρίσεις.

Βιβλιογραφία

1998. Guide: Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA G-077-1998(2002)), Guide: Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA G-077-1998(2002)). American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. DOI: doi:10.2514/4.472855.001.
- Akbarzadeh, A., borazjani, i., *Reducing flow separation of an inclined plate via travelling waves*. Journal of Fluid Mechanics, 2019. **880**: p. 831-863. DOI: 10.1017/jfm.2019.705.
- Aly, A.M., Bitsuamlak, G., *Aerodynamics of ground-mounted solar panels: Test model scale effects*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013. **123**: p. 250-260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.007>.
- Bechtel National, I., 1980. Wind design of flat panel photovoltaic array structures. National Technical Information Service, US Department of Commerce Springfield.
- Breuer, M., Jovičić, N., *Separated flow around a flat plate at high incidence: an LES investigation*. Journal of Turbulence, 2001. **2**(null): p. N18. DOI: 10.1088/1468-5248/2/1/018.
- Breuer, M., Jovičić, N., Mazaev, K., *Comparison of DES, RANS and LES for the separated flow around a flat plate at high incidence*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2003. **41**: p. 357-388. DOI: 10.1002/flid.445.
- Castellani, F., Eltayesh, A., Natili, F., Tocci, T., Becchetti, M., Capponi, L., Astolfi, D., Rossi, G. *Wind Flow Characterisation over a PV Module through URANS Simulations and Wind Tunnel Optical Flow Methods*. Energies, 2021. **14**, DOI: 10.3390/en14206546.
- Dagher, M.M., Kandil, H.A., *Computational prediction of dust deposition on solar panels*. Environmental Science and Pollution Research, 2023. **30**(5): p. 12545-12557. DOI: 10.1007/s11356-022-22993-y.
- Fage, A., Johansen, F.C.J.P.o.T.R.S.A.M., Physical, Sciences, E., *On the Flow of Air behind an Inclined Flat Plate of Infinite Span*. 1927. **116**: p. 170-197.
- Greenshields, C., Weller, H., 2022. Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles. CFD Direct Ltd.
- Irtaza, H., Agarwal, A., *CFD Simulation of Turbulent Wind Effect on an Array of Ground-Mounted Solar PV Panels*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 2018. **99**(2): p. 205-218. DOI: 10.1007/s40030-018-0283-x.
- Jubayer, C.M., Hangan, H., *Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014. **134**: p. 56-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.008>.
- Jubayer, C.M., Hangan, H., *A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016. **153**: p. 60-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.009>.

- Kopp, G.A., Farquhar, S., Morrison, M.J., *Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012. **111**: p. 40-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.08.004>.
- Lu, H., Zhao, W., *CFD prediction of dust pollution and impact on an isolated ground-mounted solar photovoltaic system*. Renewable Energy, 2019. **131**: p. 829-840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.112>.
- Menter, F.R., *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. 1994. **32**(8): p. 1598-1605. DOI: 10.2514/3.12149.
- Miller, R.D., Zimmerman, D.K., 1981. Wind loads on flat plate photovoltaic array fields, United States. DOI: 10.2172/6782774.
- Narasimhamurthy, V.D., Andersson, H.I., *Numerical simulation of the turbulent wake behind a normal flat plate*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009. **30**(6): p. 1037-1043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.09.002>.
- Oberkampf, W.L., Trucano, T.G., *Verification and validation in computational fluid dynamics*. Progress in Aerospace Sciences, 2002. **38**(3): p. 209-272. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00005-2).
- Perry, A.E., Steiner, T.R., *Large-scale vortex structures in turbulent wakes behind bluff bodies. Part 1. Vortex formation processes*. Journal of Fluid Mechanics, 1987. **174**: p. 233-270. DOI: 10.1017/S0022112087000119.
- Pieris, S., Yarusevych, S., Peterson, S.D., *Flow development over inclined flat plates in ground effect and relation to aerodynamic loads*. Physics of Fluids, 2022. **34**(9). DOI: 10.1063/5.0102406.
- REN21, 2023. Renewable Energy and Sustainability Report.
- Roache, P.J., *Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics*. 1997. **29**(1): p. 123-160. DOI: 10.1146/annurev.fluid.29.1.123.
- Shademan, M., Barron, R.M., Balachandar, R., Hangan, H., *Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations*. 2014. **41**(8): p. 728-738. DOI: 10.1139/cjce-2013-0537.
- Stathopoulos, T., Zisis, I., Xypnitou, E., *Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014. **125**: p. 195-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.007>.
- Suárez, J.L., Cadenas, D., Rubio, H., Ouro, P. *Vortex Shedding Dynamics Behind a Single Solar PV Panel Over a Range of Tilt Angles in Uniform Flow*. Fluids, 2022. **7**, DOI: 10.3390/fluids7100322.
- Teimourian, A., Yazdi, S.G., Hacisevki, H.J.F.D., *Vortex shedding: a review on flat plate*. 2018. **53**: p. 212-221.
- Van Doormaal, J.P., Raithby, G.D., *ENHANCEMENTS OF THE SIMPLE METHOD FOR PREDICTING INCOMPRESSIBLE FLUID FLOWS*. Numerical Heat Transfer, 1984. **7**(2): p. 147-163. DOI: 10.1080/01495728408961817.

Warsido, W.P., Bitsuamlak, G.T., Barata, J., Gan Chowdhury, A., *Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array*. Journal of Fluids and Structures, 2014. **48**: p. 295-315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.005>.

Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T., Speziale, C., *Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion technique*. Physics of Fluids A Fluid Dynamics, 1992. **4**. DOI: 10.1063/1.858424.

Yang, D., Pettersen, B., Andersson, H.I., Narasimhamurthy, V.D., *Vortex shedding in flow past an inclined flat plate at high incidence*. Physics of Fluids, 2012. **24**(8). DOI: 10.1063/1.4744982.

Yemenici, O., Aksoy, M.O., *An experimental and numerical study of wind effects on a ground-mounted solar panel at different panel tilt angles and wind directions*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021. **213**: p. 104630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104630>.